

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(государственный университет)

На правах рукописи

КОНДРАТЬЕВА Наталья Викторовна

**МНОГОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА СБОРА ВРЕМЕННОЙ И
АМПЛИТУДНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЕТЕКТОРА T0
ЭКСПЕРИМЕНТА ALICE (ЦЕРН, LHC).**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук.**

Научный руководитель:
доктор физико-математических
наук, профессор *В.А. Григорьев*

Москва

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	4
 ГЛАВА 1. Стартовый триггерный детектор T0.	12
1.1. Общая схема эксперимента ALICE.	12
1.2. Структура стартового триггерного детектора T0.	16
1.3. Функциональная схема электроники стартового детектора.	20
 ГЛАВА 2. Моделирование и анализ основных физических параметров детектора T0.	32
2.1. Программные средства моделирования физических процессов.	32
2.2. Моделирование функции отклика детектора с учётом реальной геометрии.	34
2.3. Расчёт временных характеристик и вероятности выработки триггерных сигналов детектором T0.	39
 ГЛАВА 3. Методика разработки, создание и результаты испытаний электроники сбора временной и амплитудной информации детектора T0.	48
3.1. Установка для настройки и тестирования электронных узлов детектора T0.	50
3.2. Анализ параметров формирователей временной отметки и выбор оптимальной схемы формирования.	53
3.3. Разработка методики и реализация схемы измерения амплитуд сигналов методом амплитудно-временного преобразования.	59
3.4. Модуль управляемых линий задержек DCDL-4.	63
3.5. Модуль логического отбора сигналов OR.	70
3.6. Усреднитель временных интервалов «Mean Timer».	78

ГЛАВА 4. Методика и результаты настройки электроники и калибровки детектора на импульсном лазерном пучке.	85
4.1. Лазерная система калибровки.	85
4.2. Методика настройки стартового детектора Т0.	87
4.3. Методы и результаты калибровки детектора Т0.	94
4.4. Методика амплитудно-временной коррекции on-line и off-line.	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.	104
Список используемой литературы.. . . .	107
Принятые в диссертации обозначения и сокращения. . . .	113

ВВЕДЕНИЕ

По общепринятой в настоящее время гипотезе наша Вселенная была создана более 12 миллиардов лет назад во время так называемого «Big Bang» - «Большого Взрыва» [1]. В первые микросекунды после «взрыва» в экстремальных условиях, когда температура и концентрация энергии были чрезмерно высоки, возникла и существовала некоторое время особая форма материи. Эта материя состояла из кварков и глюонов, существовавших «свободно» в кварк-глюонной плазме (КГП) [2] на протяжении 10^{-5} с после «Большого Взрыва». КГП - термализованный газ кварков и глюонов, находящихся в состоянии деконфаймента, при котором характерные расстояния их перемещения составляли > 1 фм (это значение есть приблизительный радиус нуклона, в котором при обычных условиях «заперты» кварки).

Поискам кварк-глюонной плазмы было посвящено немало экспериментальных работ в ЦЕРН с конца прошлого века по настоящее время [3 - 8]. Был получен ряд экспериментальных указаний на возможность её существования, но решающих данных получено не было. Это связано в первую очередь с тем, что для надёжного обнаружения кварк-глюонной плазмы необходимо наличие целой совокупности признаков [9 - 23].

В 2000 - 2005 годах на ускорителе - коллайдере RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) в Брукхейвенской национальной лаборатории поиску кварк-глюонной плазмы были посвящены четыре эксперимента: STAR, BRAMS, PHENIX и PHOBOS [24 - 27]. Было получено большое количество чрезвычайно интересных экспериментальных результатов, анализ которых не входит в задачу данного обзора. Однако отметим основные выводы, которые можно сделать из полученных результатов.

1. Одним из самых ярких экспериментальных наблюдений на RHIC является обнаруженное в центральных столкновениях ионов золота ($\text{Au}+\text{Au}$) подавление выхода адронов с большими поперечными импульсами по сравнению с нуклон-нуклонными взаимодействиями. Этот эффект, получивший название «гашение» струй (jet quenching), связывается с энергетическими потерями партонов в кварк-глюонной плазме, образованной в столкновении.

Струя - направленный поток адронов с большими поперечными импульсами - образуется в результате жёсткого взаимодействия партонов, входящих в состав сталкивающихся ядер. После рассеяния партоны обесцвечиваются в адроны. В случае, если партон проходит на своём пути ядерное вещество, то он, подобно заряженной частице в среде, теряет часть своей энергии.

Если взаимодействие партонов, приводящее к образованию струй, произошло на периферии объёма кварк-глюонной плазмы, то струя, проходящая в ядерной среде большее расстояние, должна подавляться.

Форма ядерной материи, возникающая в центральных столкновениях ионов золота ($\text{Au}+\text{Au}$) на коллайдере RHIC, оказалась почти совершенной

кварк-глюонной жидкостью, вместо того, чтобы вести себя как газ свободных кварков и глюонов.

2. Распределения образованных в столкновении адронов по азимутальному углу являются очень важной характеристикой, поскольку они отражают коллективные свойства среды, формируемой в соударении. Дело в том, что анизотропия в азимутальном распределении создается за счёт анизотропии градиентов давления в поперечной плоскости в первые моменты после столкновения. В самом деле, если бы столкновение ядер сводилось к независимым столкновениям нуклонов, то не существовало бы и причин для появления такой анизотропии. Наличие анизотропии в азимутальном распределении позволяет сделать аргументированное предположение, что на RHIC формируется партонная материя в состоянии деконфайнмента, схожая по своим свойствам с идеальной (с исключительно малой вязкостью) жидкостью. Такая сильно-взаимодействующая партонная жидкость, получила название “sQGP” (strongly interacting quark-gluon plasma).

3. Материя, образованная на RHIC, характеризуется очень большими плотностями энергии, большим сечением взаимодействия, сильным коллективным движением, что подразумевает раннюю термализацию. Это состояние не описывается в рамках теории обычных цвето-нейтральных адронов, поскольку не существует самосогласованной теории материи, составленной из обычных адронов при измеренных плотностях.

Состояние кварк-глюонной плазмы, по-видимому, на RHIC не достигнуто, и надежды возлагаются на эксперимент ALICE, запуск которого запланирован к середине 2008 г.

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) - один из четырёх крупных экспериментов, которые будут проводиться на строящемся коллайдере LHC (Large Hadron Collider – большой адронный коллайдер) в ЦЕРН [28].

Особенности эксперимента ALICE.

Одной из важных задач установки ALICE [29 - 31] является регистрация частиц при взаимодействии тяжёлых ионов свинца, но предусмотрена и возможность регистрации частиц при столкновениях протонов.

Столкновение тяжёлых ионов на LHC будет производиться при энергии, превосходящей энергию коллайдера RHIC почти на два порядка, что даёт ряд преимуществ по сравнению с предыдущими экспериментами [32]:

- большие плотность энергии и температура образующейся ядерной среды;
- большее время жизни системы в фазе КГП;
- как следствие первых двух пунктов, большой, по сравнению с другими экспериментами, вклад эффектов, связанных с КГП, на фоне эффектов взаимодействия адронов в конечном состоянии;
- выход адронов с поперечными импульсами вплоть до $p_T \sim 100$ ГэВ/с;
- обильный выход частиц, содержащих с, b кварки, возможность исследования плавления $Y(1S)$ состояния.

Экспериментальная программа ALICE весьма многообразна и включает в себя исследование [33]:

- глобальных характеристик столкновений, таких как множественность, поперечная энергия в центральной области быстрот;
- выхода странных частиц;
- образования струй;
- азимутальной анизотропии;
- образования (подавления) выхода кваркониев;
- рождения прямых фотонов и дилептонов;
- физики ультрапериферических столкновений.

Очевидно, особые усилия будут направлены на детальное изучение тех ярких эффектов, которые были обнаружены на SPS и RHIC.

Экспериментальные результаты, которые будут получены на LHC, без сомнения, позволят узнать больше о свойствах кварк-глюонной плазмы, и, подобно данным RHIC, поставят новые задачи перед научным сообществом.

Эксперимент ALICE, на самом деле, - это совокупность большого количества детекторов различного предназначения и различных возможностей. Как любой коллайдерный эксперимент, ALICE - это установка баррельного типа, размещённая внутри магнита-соленоида 14 м длиной и 14 м в диаметре с максимальной напряженностью магнитного поля 0,5 Тесла. Внутри магнита расположены детекторы [34 - 46], в частности, для восстановления траекторий и идентификации частиц в центральной области ALICE:

- Inner Tracking System (ITS - внутренняя трековая система) [34, 47 - 50],
- Time-Projection Chamber (TPC) - время - проекционная камера [35, 51 - 55],
- Transition Radiation Detector (TRD) - детектор переходного излучения [37, 56, 57],
- детектор TOF, основанный на методике идентификации частиц по времени пролета "Time-Of-Flight" [36, 58 - 61],
- High Momentum Particle Identification system (HMPID) - детектор кольца черенковского излучения [38, 62 - 66],
- Photon Spectrometer (PHOS) - электромагнитный калориметр [39, 67- 70].

Для идентификации заряженных частиц в области псевдобыстрот ($-3,4 < \eta < 5,1$) и выработки триггерного сигнала для других детекторов эксперимент ALICE будет содержать большое количество следующих детекторов, расположенных в области больших скоростей: детектор множественности - FMD [40], триггерный сцинтилляционный детектор V0 [40, 71] и стартовый триггерный детектор T0 [72 - 74]. Для более узкой области псевдобыстрот ($2,3 < \eta < 3,5$) будет использоваться: детектор множественности фотонов - PMD [44, 45] для измерения множественности фотонов и для регистрации нуклонов в ионных столкновениях - ZDC (Zero Degree Calorimeter) [41, 75 - 79] - калориметр, расположенный в области нулевого угла от оси пучка.

Среди большой совокупности детекторов ALICE особую роль играет стартовый триггерный детектор T0. Этот детектор, несмотря на свои скромные по масштабам ALICE размеры, играет чрезвычайно важную роль.

1. T0 является стартовым детектором, формирующим точную временную отметку (сигнал «T0») для времяпролётного детектора (TOF), осуществляющего идентификацию частиц по методу времени пролёта частиц (time-of-flight) от вершины события до TOF. Положение сигнала «T0» на временной оси не должно меняться в зависимости от положения точки столкновения вдоль оси установки ALICE в диапазоне ± 15 см.

2. Детектор T0 формирует триггерный сигнал запуска установки ALICE на нулевом уровне, а также пре-триггерный сигнал для детектора переходного излучения в случае, если положение точки столкновения (вершины события) лежит в заданных пределах. T0 одновременно дискриминирует фоновые события, возникающие при взаимодействии ускоренных ионов с остаточным газом внутри вакуумной трубы ускорителя вне области столкновения ионов.

3. T0 измеряет множественность события в ион - ионных столкновениях и вырабатывает один из трёх возможных триггерных сигналов, соответствующих центральному, полуцентральному и периферическому столкновениям.

Настоящая работа посвящена разработке и созданию электронной системы для сбора временной и амплитудной информации стартового триггерного детектора T0, включая разработку, изготовление модулей быстрой front-end электроники, методику настройки и калибровки модулей, их интеграцию в единую систему, а также разработку и реализацию методики настройки всей системы как единого целого в условиях отсутствия реальных частиц с помощью системы лазерной калибровки.

Актуальность работы. Запуск ускорителя LHC планируется к середине 2008 года и в настоящее время в ЦЕРН полным ходом идёт строительство установки ALICE. На данной установке будут проводиться фундаментальные исследования по поиску и изучению новой формы ядерной материи - кварк-глюонной плазмы, которая, в соответствии с современными теоретическими представлениями, должна образовываться при столкновении встречных пучков тяжёлых ионов сверхвысоких энергий. Детектор T0 имеет важное значение для работы всей установки ALICE. Являясь триггерным детектором, именно T0 запускает всю систему регистрации и последующего анализа любого события.

Основной целью работы является разработка и создание многоканальной системы сбора временной и амплитудной информации для стартового триггерного детектора T0 на основе магнитостойких фотоумножителей, разработка методики её настройки, калибровки и введение в эксплуатацию.

Работа детектора T0 будет протекать в необычайно жёстких условиях, поскольку эксперимент ALICE предполагает исследования не только ион - ионных, но также и протон - протонных столкновений. Количество регистрируемых детектором частиц в одном акте столкновений варьируется от одной релятивистской частицы на один черенковский счётчик в протон - протонных столкновениях и до сотни частиц для центральных Pb-Pb столкновений. Так как в периферических ион - ионных столкновениях число

вторичных регистрируемых частиц также мало и сравнимо с числом частиц в протон - протонных столкновениях, был подобран такой режим работы фотоумножителей черенковских счётчиков, который обеспечивает высокое временное разрешение детектора во всем диапазоне загрузок счётчиков.

Столкновение пучков протонов в ускорителе LHC будет происходить с периодом 25 наносекунд, поэтому система сбора первичной информации с фотоумножителей должна осуществлять обработку данных с частотой 40 МГц. Построить такую систему сбора данных из стандартных блоков электроники оказалось невозможным. Трудность задачи состоит в том, что следует обеспечить временное разрешение системы (включая вклад электроники) на уровне не более 50 пс в широком (1:100) динамическом диапазоне амплитуд сигналов, снимаемых с детектора. Дополнительная сложность в том, что мёртвое время любого электронного узла не должно превышать 25 нс.

Поэтому создание и внедрение в эксперимент ALICE совершенно новых уникальных электронных блоков, таких, как модуля логического отбора сигналов OR, управляемых линий задержек DCDL-4, усреднителя временных интервалов «Mean Timer», являлось одной из основных задач данной работы. Главной же задачей была разработка оптимальной схемы для съёма и передачи временной и амплитудной информации в условиях жёстких ограничений, накладываемых экспериментом ALICE.

Научная новизна диссертационной работы.

Научная новизна диссертационной работы определена, с одной стороны, новыми физическими задачами и требованиями современных экспериментов, с другой стороны новыми техническими возможностями, в частности, разработанными в ЦЕРН новыми многоканальными ВЦП в микросхемном исполнении. Предложенная многоканальная система для сбора временной и амплитудной информации стартового триггерного детектора на основе черенковских счётчиков (состоящих из кварцевых радиаторов и магнитостойких фотоумножителей с сетчатыми динодами) является новой и оригинальной.

Впервые разработана и реализована пикосекундная система сбора и обработки временной и амплитудной информации, имеющая разрешающее время (сигма) лучше 50 пс, мёртвое время – менее 25 нс, широкий динамический диапазон амплитуд (1:200) и позволяющая осуществлять запись информации в едином временном формате. Впервые предложен и реализован метод измерения амплитуды путём преобразования амплитуды во временной интервал с помощью двух дискриминаторов – с постоянным порогом и со следящим порогом, позволяющий осуществить преобразование амплитуды во временной интервал на фронте входного сигнала, то есть за время не более двух наносекунд. Впервые предложен и аппаратно реализован метод формирования временной отметки по первому из пришедших на вход устройства отбора 12 входных сигналов от фотоумножителей, позволяющий отобрать первый из пришедших сигналов с точностью 25 пикосекунд.

Проведено моделирование методом Монте-Карло, которое показывает при данных энергиях пучка и принятой геометрии расположения черенковских

счётчиков возможность применения метода усреднения временных интервалов, что позволяет получить точность временной отметки события около 20 пс (уменьшить разброс на порядок) - это подтверждено экспериментально. Впервые в коллайдерном эксперименте будет применён метод усреднения временных интервалов, реализованный в модуле «Mean Timer».

Уникальная система сбора и обработки временной и амплитудной информации потребовала разработки оригинальных методов её настройки и калибровки, которые были реализованы в эксперименте в ЦЕРН летом 2007 года, что позволило подготовить систему к интеграции непосредственно в установку ALICE.

Практическая значимость работы. Разработана и реализована методика построения системы сбора временной и амплитудной информации стартового триггерного детектора T0, который является важной составной частью установки ALICE. Именно он вырабатывает сигнал триггера нулевого уровня, запускающий всю установку. Он определяет с высокой точностью момент столкновения частиц, задавая тем самым стартовый сигнал для одной из систем идентификации вторичных частиц – времяпролётной системы. Кроме того, он вырабатывает пре-триггерный сигнал, подготавливающий к работе детектор переходного излучения. В пределах своего аксептанса он определяет уровень множественности вторичных частиц. Наконец, он вырабатывает основные триггерные сигналы запуска установки в целом, являясь в этом смысле ключевым элементом всего эксперимента ALICE.

Апробация работы. Результаты, полученные в диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на собраниях коллаборации ALICE в ЦЕРН в 2005, 2006 гг, публиковались в препринтах ALICE Internal Note, докладывались на научных сессиях МИФИ в 2004 - 2007 гг, публиковались в трудах научной сессии МИФИ, на международной конференции IEEE в Риме в 2004 г.

Объём и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объём диссертации содержит 115 страниц, включая 68 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 118 наименований.

Во введении кратко рассматриваются цели и задачи эксперимента ALICE, указана актуальность темы диссертации, её цель, научная и практическая значимость работы и описана последовательность изложения материала.

В первой главе рассмотрена общая схема эксперимента ALICE. Несколько более подробно описывается времяпролётный (TOF) детектор, с которым непосредственно связан стартовый триггерный детектор T0. Описана структура детектора T0.

Приведена и обоснована структура общей функциональной схемы быстрой front-end электроники, представлен вариант её реализации с использованием современных модулей. Приводится описание остальных электронных систем детектора T0: системы выработки триггера, системы сбора информации и системы контроля детектора.

Во второй главе приводится методика и результаты расчёта методом Монте-Карло вероятности выработки триггерных сигналов детектором T0 при регистрации частиц, рождённых в протон - протонных столкновениях, вероятности регистрации частиц детектором при различных вариантах отказа отдельных элементов (черенковских счётчиков). Результатами расчёта подтверждена применимость метода усреднения временных интервалов, позволяющего получить временную отметку, не зависящую от положения точки столкновения протонов (ионов).

В третьей главе приводятся разработанные автором схемотехнические решения субнаносекундных электронных модулей, обоснование выбора этих решений и конкретная реализация. Разработанные на основе схемотехнических решений электронные модули в сочетании с промышленными изделиями образуют непрерывную цепь, позволяющую доставить амплитудную и временную информацию до системы сбора и обработки этой информации без заметного ухудшения временного разрешения. В главе подробно изложен и обоснован быстрый и оригинальный метод преобразования амплитуды во временной интервал (метод CFD-LED).

В четвёртой главе описывается методика настройки собранного в единое целое детектора T0 с помощью импульсного лазера, приводятся результаты испытаний собранной системы. Изложены on-line и off-line методы применения амплитудно-временной коррекции.

В заключении кратко сформулированы основные выводы диссертации, приведены принятые в диссертации обозначения и сокращения.

Личный вклад автора. Результаты диссертации связаны с планами работ по госбюджетным тематикам МИНОБРАЗОВАНИЯ, с планами работ по гранту CRDF MO-01, с планами работ МИФИ по проекту ALICE и с планами работ по гранту МНТЦ №2880 и с планами работ, определенными соглашением Россия – ЦЕРН. Все приведенные результаты получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии. На всех этапах работ, описанных в диссертации, ей формулировались направления исследований и разработок, проводились сами исследования и разработки. обработка и анализ полученных результатов с учётом новейших достижений в области проводимых исследований.

Основные положения, выносимые автором на защиту:

1. Принципы построения многоканальной системы сбора временной и амплитудной информации с черенковских счётчиков детектора T0 эксперимента ALICE, отличающейся малым мёртвым временем (менее 25 нс), пикосекундным временным разрешением (сигма лучше 50 пс) в широком динамическом диапазоне амплитуд (1:200) и позволяющая осуществлять запись информации в едином временном формате.
2. Результаты моделирования методом Монте-Карло временных характеристик детектора, обосновавших применимость метода усреднения временных интервалов.
3. Методика расчёта вероятности выработки триггерных сигналов при выходе из строя отдельных счётчиков детектора как в штатной, так и во внештатных ситуациях.
4. Методы разработки, настройки и результаты экспериментальных испытаний оригинальных субнаносекундных модулей электроники: модуля логического отбора OR, управляемых линий задержек DCDL-4, усреднителя временных интервалов «Mean Timer» с собственным временным разрешением не хуже 20 пс и их внедрение в эксперимент ALICE в составе детектора T0.
5. Метод измерения малых амплитуд (30 - 150 мВ) с помощью преобразования во временной интервал с использованием дискриминаторов двух разных типов: со следящим и с постоянным порогом. Результаты испытаний предложенного метода при калибровке от сверхкороткой (длительностью 40 пс) вспышки лазера.
6. Метод настройки и калибровки детектора T0 и его электронных систем с помощью импульсного лазера. Методику on-line и off-line амплитудно-временной коррекции данных детектора.

ГЛАВА 1

Стартовый триггерный детектор T0.

1.1. Общая схема эксперимента ALICE.

Тяжелоионный эксперимент ALICE (A Large Ion Collider Experiment) [29 - 31] на строящемся коллайдере LHC (ЦЕРН, Женева) является крупнейшим в мире в области релятивистской физики. Уникальность проекта в том, что детекторы будут регистрировать и идентифицировать частицы от низких $p_T \sim 100$ МэВ/с до значений $p_T \sim 100$ ГэВ/с, идентифицировать короткоживущие частицы, типа D и B мезонов в условиях высокой множественности вторичных заряженных частиц до 80 000 в ион - ионных (Pb-Pb) столкновениях.

Детекторы, сконструированные для регистрации вторичных частиц в эксперименте ALICE, имеют некоторые технические и геометрические ограничения. С помощью мюонного плеча, включающего большой дипольный магнит и мюонную станцию, будет осуществляться обнаружение и идентификация мюонов в области больших псевдобыстрот ($-4,0 < \eta < -2,4$). Адроны, электроны и фотоны будут регистрироваться в центральной области псевдобыстрот ($-0,9 < \eta < 0,9$) сложной системой детекторов [34 - 46], находящихся в магнитном поле до 0,5 Тесла.

Целый ряд детекторов: ITS – внутренняя трековая система [34, 47, 48, 49], состоящая из шести слоёв кремниевых детекторов, TPC – время - проекционная камера [35, 51-55] – будут осуществлять восстановление траекторий вторичных частиц. В центральной области ALICE идентификация частиц, будет осуществляться детектором переходного излучения TRD [37, 56, 57], времяпролётным детектором TOF с высокой разрешающей способностью [36], предназначенным для регистрации треков заряженных частиц, а также детектором кольца черенковского излучения (HMPID) [38] и для регистрации фотонов будет использоваться электромагнитный калориметр (PHOS) [39, 67, 68, 69, 70]. Для идентификации заряженных частиц в области псевдобыстрот ($-3,4 < \eta < 5,1$) и выработки триггерных сигналов для других детекторов установка ALICE будет содержать большое количество дополнительных детекторов, расположенных в центральной части эксперимента. Для этого будут использоваться следующие детекторы: детектор множественности – FMD [40], детекторы V0 [40] и T0 [72 - 74]. Для более узкой области псевдобыстрот ($2,3 < \eta < 3,5$) для измерения множественности фотонов будет использоваться: детектор множественности фотонов – PMD [44, 45] и для регистрации нуклонов в ион - ионных столкновениях – калориметр ZDC [41].

Установка ALICE, схема которой показана на рис. 1.11, состоит из детекторов центральной части, которые перекрывают псевдобыстры ($|\eta| < 0,9$), и передних детекторов. Каркасом экспериментальной установки является гигантский соленоидальный магнит от эксперимента L3, который способен отклонять заряженные частицы в магнитном поле величиной 0,5 Тесла.

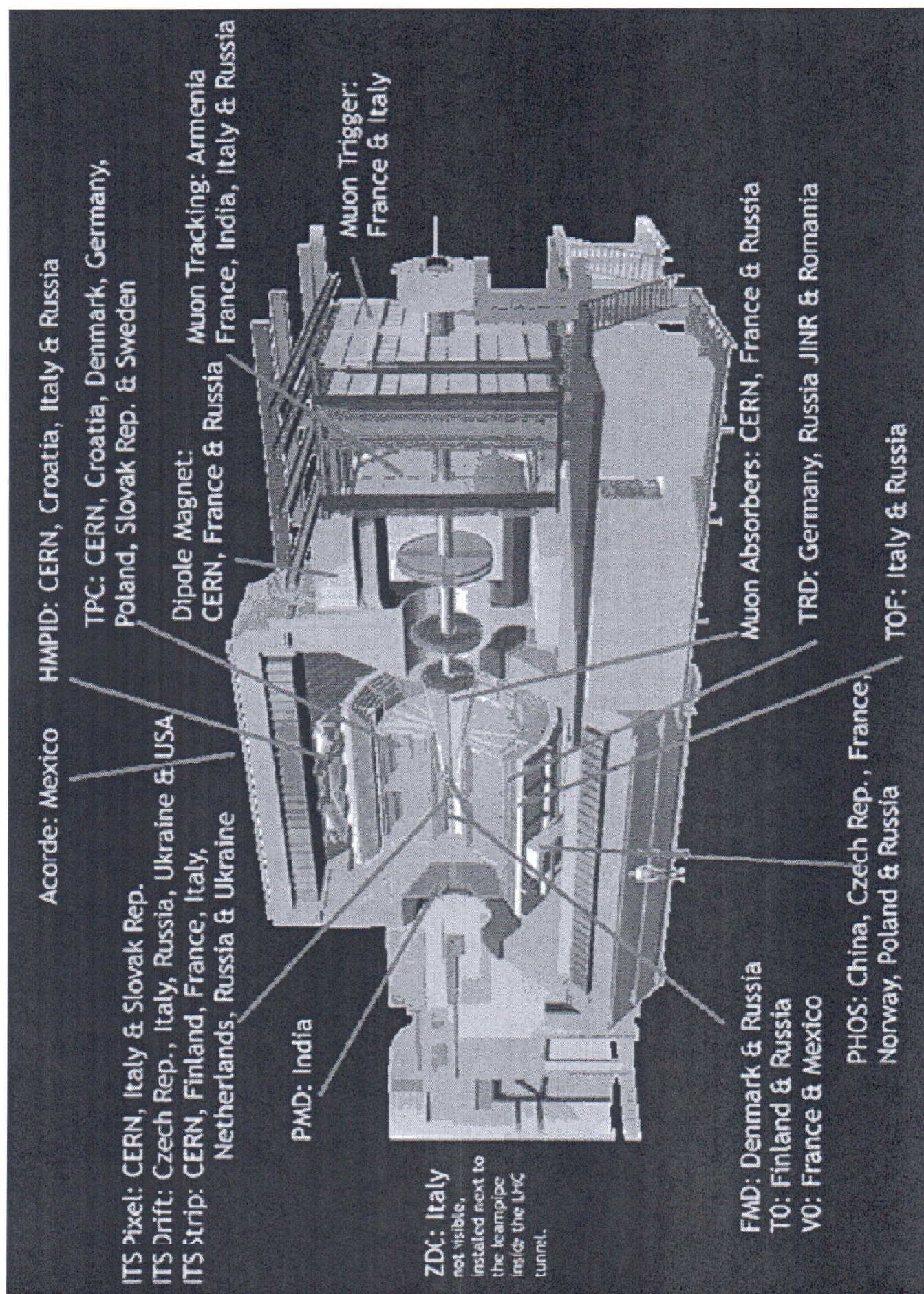


Рис. 1.11. Расположение детекторов в установке ALICE.

Установка включает в себя область от вершины взаимодействия до внешней стороны магнита. В нее входят шесть слоёв кремниевых датчиков (ITS) с высоким разрешением по координатам. Основная координатная система эксперимента – цилиндрическая время - проекционная камера TPC, детектор переходного излучения для идентификации электронов (TRD), времяпролётная система регистрации частиц (TOF), два детектора небольшой площади: черенковский детектор (HMPID) для идентификации частиц с большими импульсами, и электромагнитный спектрометр (PHOS) для регистрации гамма - квантов высоких энергий. Внутри магнита L3 располагаются также детектор множественности (FMD) для измерения распределения частиц по множественности в радиальном и азимутальном направлениях. Черенковские (T0) и сцинтилляционные (V0) детекторы предназначены для выработки целого ряда триггерных сигналов. Для двух мод (адронной и нейтронной) используют ZDC - калориметр, расположенный в 0^0 и на расстоянии 115 м от вершины взаимодействия вне соленоидального магнита. В противоположной части также вне центрального магнита располагается мюонные абсорберы, система, регистрирующая треки мюонов, устройство выработки мюонного триггера.

Массив сцинтилляторов (ACORDE - ALICE Cosmic Ray Detector), расположенный поверх магнита L3, будет использоваться как триггер космических лучей.

Времяпролётный детектор TOF.

Детектор T0 должен выдавать стартовый сигнал для времяпролётного детектора TOF, поэтому несколько более подробно остановимся на описании времяпролётного детектора.

Времяпролётный детектор TOF эксперимента ALICE [36] является детектором большой площади ($\sim 150 \text{ м}^2$), который покрывает центральную область псевдобыстрот ($|\eta| < 0,9$) для идентификации частиц в промежуточном диапазоне импульсов (от 0,5 до 4 ГэВ/с при временном разрешении детектора в 80 пс). Так как большинство вторичных заряженных частиц испускается в этом диапазоне, работа такого детектора имеет принципиально важное значение для эксперимента [29].

Детектор TOF, используя трек и реконструкцию положения вершины события, обеспечит пособытийную идентификацию большинства пионов, каонов и протонов. Корреляция между массой и треком частицы определяется соотношением $M = \frac{p}{\beta\gamma} = p \sqrt{\frac{c^2 t_{\text{TOF}}^2}{l^2} - 1}$, где t_{TOF} - время пролёта частицы, получаемое с TOF детектора, p - импульс частицы, l - длина восстановленного трека, получаемая с помощью детекторов ITS и TPC. Требования к временному разрешению детектора TOF определяются возможностью e/π , π/K и K/p разделения. Очевидно, что чем меньше временное разрешение, тем лучше происходит разделение частиц. Полное временное разрешение TOF системы включает в себя различные погрешности: $\sigma_{\text{TOF}}^2 = \sigma_{\text{MRPC}}^2 + 2\sigma_{\text{TDC}}^2 + \sigma_{\text{Calib}}^2 + \sigma_{\text{Clock}}^2 + 2\sigma_{\text{CITRM}}^2 + \sigma_{\text{T0}}^2$. σ_{MRPC} - погрешность MRPC камер, σ_{TDC} и σ_{CITRM} - погрешности время - цифровых преобразователей, σ_{Calib} - погрешность калибровки, σ_{Clock} - погрешность прихода синхросигнала, σ_{T0} - погрешность, вносимая детектором T0 во временное

разрешение TOF. При ожидаемых значениях $\sigma_{\text{MRPC}}=40$ пс, $\sigma_{\text{TDC}}=20$ пс, $\sigma_{\text{Calib}}=30$ пс, $\sigma_{\text{Clock}}=15$ пс, $\sigma_{\text{CITRM}}=10$ пс, $\sigma_{\text{To}}=50$ пс К/р – разделения составит значение лучше 3σ при импульсе каонов 2,5 ГэВ/с. Из этих оценок вытекает требование к временному разрешению детектора T0 – оно должно быть не хуже 50 пс.

Времяпролётный детектор TOF, который должен работать эффективно при больших значениях множественности, должен иметь загрузку (occupancy), не превышающую уровень 10 - 15 % при самой высокой ожидаемой плотности вторичных заряженных частиц. Это приводит к конструкции детектора с большим количеством независимых каналов (больше, чем 10^5). Требование перекрытия большой площади приводит к тому, что газонаполненный детектор оказывается оптимальным вариантом. Благодаря достигнутому в ЦЕРН временному разрешению в 40 пс за основу TOF детектора были взяты резистивные многоэлектродные плоскопараллельные пропорциональные камеры (MRPC - Multigap Resistive Plate Chamber) [36].

Ключевая особенность этих камер состоит в том, что электрическое поле может быть очень высоким и однородным по всему чувствительному объёму детектора. Это приводит к тому, что ионизация, произведенная проходящей заряженной частицей, немедленно даст лавину, которая приведет к появлению выходного сигнала. Отсутствие времени дрейфа, связанного с движением электронов к области высокого электрического поля приводит к уменьшению джиттера. Разброс времени в этом детекторе вызван разбросом времени развития лавины.

Главные преимущества технологии MRPC относительно других проектов детекторов с параллельными пластинами (Пестовские детекторы, PPC) состоят в следующем:

- детектор работает при атмосферном давлении;
- пластины имеют высокое сопротивление, которое приводит к подавлению искр, что позволяет работать с высоким усилением;
- камеры имеют довольно простую конструкцию, что позволяет использовать коммерчески доступные материалы.

Последние тесты нескольких многоэлектродных MRPC, имеющие структуру двойного стека (рис. 1.12) показывают, что эти устройства могут давать временное разрешение около 40 пс при эффективности регистрации, близкой к 100 %.

Детектор TOF будет окружать центральную область взаимодействия эксперимента ALICE и покрывать цилиндрическую поверхность полярного аксептанса $|\theta-90^\circ| < 45^\circ$. Детектор имеет модульную структуру, состоит из 18 секторов по ϕ (азимутальному углу) и пяти частей по координате Z (продольная координата по оси пучка), и занимает область с внутренним радиусом 3,7 м и внешним - 3,99 м. Полная толщина устройства соответствует 0,2 радиационной длины.

Основная единица TOF детектора - полоса MRPC 1220 мм длиной и 130 мм шириной, с активной областью 1200×74 мм², которая разделена на области размером 35×25 мм². Полосы размещены в газонепроницаемых модулях и расположены поперек направления пучка. Чтобы перекрыть полный

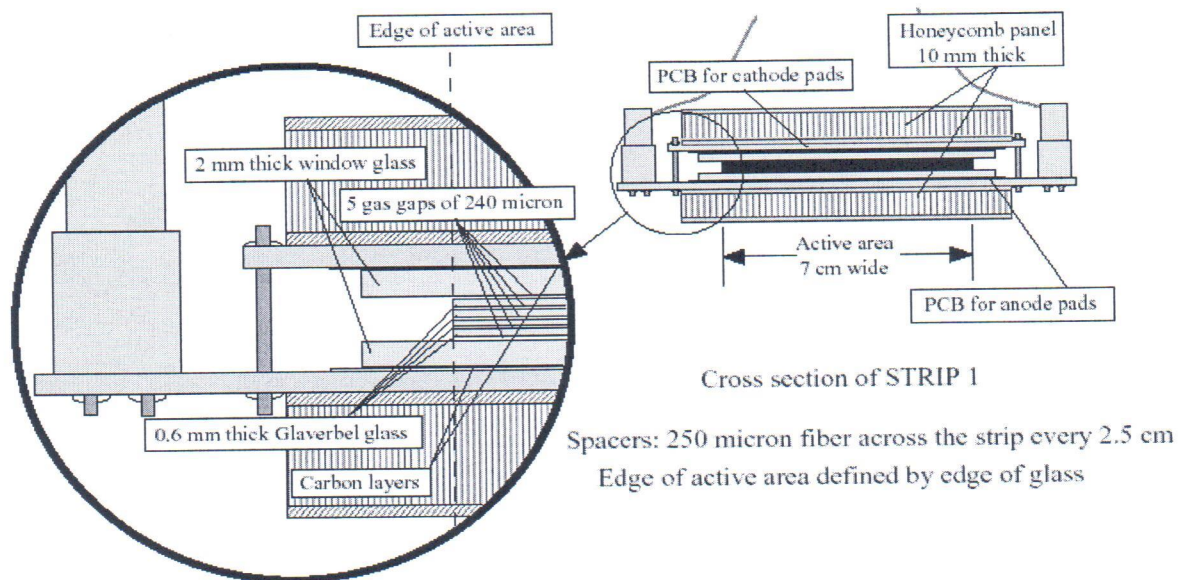


Рис. 1.12. Схема многоэлектродной MRPC камеры.

цилиндр по координате Z , необходимо иметь пять модулей трёх различных размеров. Они все имеют ту же самую структуру и ширину ($\sim 1,28$ м), но отличаются по длине. Фактические размеры определены таким способом, что присоединяющиеся области модулей перекрывают мёртвые области других детекторов. Центральный модуль имеет длину 1,17 м, промежуточные – 1,57 м и внешние – 1,77 м длиной. Полная длина барреля TOF – 7,45 м. Все это позволит иметь минимальные мёртвые зоны в детекторе. Степень детализации детектора TOF продиктована требованием идентификации частиц.

Каждый модуль детектора TOF состоит из группы полос MRPC (15 - в центральном, 19 - в промежуточном звене и 19 - во внешних модулях) закрытых в алюминиевом боксе, который создает газовый объём (при давлении до 3 мбар) и поддерживает внешнюю электронику. Полная система TOF состоит из 90 модулей. Пять блоков в ряд расположены в супермодуле.

Электроника для TOF должна обеспечить сохранение параметров детектора MRPC, то есть работать с дифференциальным сигналом и иметь временное разрешение около 40 пс.

1.2. Структура стартового триггерного детектора T0.

Стартовый триггерный детектор T0 [72] предназначен для выработки триггерного сигнала, означающего, что столкновение двух ионов (протонов) произошло в ожидаемом месте, в ожидаемое время и с ожидаемым энерговыделением, и, таким образом, данное событие подлежит регистрации. Сигнал временной отметки, снимаемый с детектора T0 с погрешностью $\sigma \approx 50$ пс служит также для идентификации продуктов распада методом времени пролёта. Исходя из функций детектора T0, требования к его основным физическим характеристикам следующие: позиционное разрешение (по Z – координате) $\pm 1,5$ см, мёртвое время – не более 25 нс, скорость счёта - 10^6 1/с. Следует также помнить, что детектор должен работать в магнитном поле до 0,5 Тесла.

В результате довольно длительных дискуссий коллаборация ALICE приняла предложение МИФИ построить триггер на основе черенковских счётчиков, сочтя его для конкретных условий (в том числе ограниченность пространства для его размещения) оптимальным.

Детектор T0 состоит из двух сборок черенковских счётчиков, по 12 счётчиков в каждой сборке (в виде одного концентрического кольца), расположенных по обе стороны от номинальной точки столкновения частиц. Черенковские счётчики основаны на кварцевых радиаторах (диаметром 20 мм и длиной 20 мм) и российских магнитостойких фотоумножителях ФЭУ-187 (диаметр 30 мм, длина 45 мм) с сетчатыми динодами [81]. Подробные характеристики ФЭУ в магнитном поле и в отсутствие поля подробно исследованы и представлены в диссертации А. Каракаша [80]. Коэффициент усиления ФЭУ-187 составляет порядка 10^6 , время нарастания сигнала составляет 1,5 - 2,0 нс, 3) время спада – 3 - 4,0 нс.

В первоначальном варианте [72, 82] предполагалось сделать детектор T0 в виде двух сборок из черенковских детекторов, расположенных симметрично по обе стороны от номинальной точки столкновения на расстоянии около 70 см. Каждая сборка должна была содержать 24 черенковских детектора, собранных в виде двух концентрических окружностей вокруг ионопровода ускорителя. Однако, из-за ограничений на габариты размеры детектора, пришлось ограничить одним кольцом и, как показали последующие расчёты, достаточно иметь по 12 черенковских счётчиков с каждой стороны без существенного уменьшения вероятности регистрации событий. Одну из сборок по конструктивным соображениям пришлось отодвинуть на 3,5 м от точки столкновения частиц.

Почему были выбраны именно Черенковские детекторы? Хорошо известно, что сцинтилляционные детекторы с быстрыми пластмассовыми сцинтилляторами способны обеспечить высокое временное разрешение. Черенковский радиатор даёт света почти на два порядка меньше, чем сцинтиллятор и в этом отношении ему значительно уступает. Однако это излучение хорошо сфокусировано, что, в принципе, позволяет использовать весь излучаемый свет. Кроме того, черенковское излучение существенно более быстрое, чем сцинтилляционное. Лучшие сцинтилляторы не позволяют получить время высвечивания менее одной наносекунды, в то время как черенковское излучение практически мгновенно (время длительности вспышки менее 100 пс с учётом геометрии и прохождения света сквозь радиатор). Наконец, радиационная стойкость быстрых сцинтилляторов невелика, что имело принципиальное значение в нашем случае, т.к. детектор должен был выдерживать большие радиационные нагрузки - более 500 кРад. Кварцевый черенковский радиатор выдерживает такие нагрузки.

Заметим, что требование к временному разрешению детектора T0 – не хуже 50 пикосекунд – это верхний предел для допустимого временного разрешения стартового детектора. Проект ALICE предполагал с самого начала, что временное разрешение детектора TOF будет не хуже этого значения.

Оставался, однако, открытым вопрос, возможно ли обеспечить требуемое временное разрешение как самих черенковских детекторов, так и при применении уже имеющихся стандартных блоков и новых разработок модулей электроники? Возможно ли обеспечить работу электроники детектора на частоте до 40 МГц, т.е. мёртвое время каждого модуля не должно составлять более 25 нс. Все эти вопросы предстояло выяснить в процессе разработки и тестировании узлов электроники (дальнейших экспериментов).

На протяжении 1998 - 2004 гг группой сотрудников МИФИ, Института Ядерных Исследований РАН и Университета г. Юваскила (Финляндия) была проведена большая работа по исследованию свойств (коэффициента усиления, временного разрешения) фотоумножителей ФЭУ-187, являвшихся в то время новой экспериментальной разработкой, а также черенковских счётчиков на их основе [80, 81].

В результате экспериментов на пучке импульсного лазера, на ускорителях заряженных частиц ИТЭФ и ЦЕРН, в отсутствие магнитного поля и в полях до 0,5 Тесла при различных напряжениях питания фотоумножителей было надёжно установлено, что при световом потоке, соответствующем вылёту около 200 фотоэлектронов с фотокатода ФЭУ (это, в свою очередь, эквивалентно потоку от черенковской вспышки в кварцевом радиаторе длиной 2 см при регистрации релятивистской однозарядной частицы):

- временное разрешение фотоумножителя в отсутствие магнитного поля и при номинальном (максимально допустимом) напряжении питания составляет не более 35 пс;

- временное разрешение сохраняет своё значение около 35 пс при изменении напряжения питания ФЭУ в широких пределах 700 - 1400 В;

- магнитное поле напряженностью 0,5 Тесла уменьшает амплитуду выходного сигнала ФЭУ на 30 - 50%, но это уменьшение может быть скомпенсировано увеличением напряжения питания;

- временное разрешение 30 - 35 пс сохраняется в полях до 0,5 Тесла в широком диапазоне напряжений питания 700 - 1300 В.

Все эти данные были получены с помощью импульсного лазера с длительностью вспышки 40 пс.

На ускорителях заряженных частиц временное разрешение черенковского детектора с кварцевым радиатором длиной 2 см и диаметром 2 см при регистрации релятивистских пионов было получено равным 35 пс.

Таким образом, было показано, что черенковские детекторы с кварцевыми радиаторами и фотоумножителями ФЭУ-187 полностью удовлетворяют требованиям эксперимента ALICE [84, 85].

На рис. 1.21 представлена схема расположения детектора T0 (дальняя сборка T0-A и ближняя – T0-C относительно точки взаимодействия IP), причём расстояние от вершины события до сборки T0-C составляет 0,7 метра, а до сборки T0-A – 3,5 метра [83].

Положение сборки T0-C ограничено положением мюонного абсорбера. На стороне, противоположной мюонному абсорберу, расположена сборка T0-A.

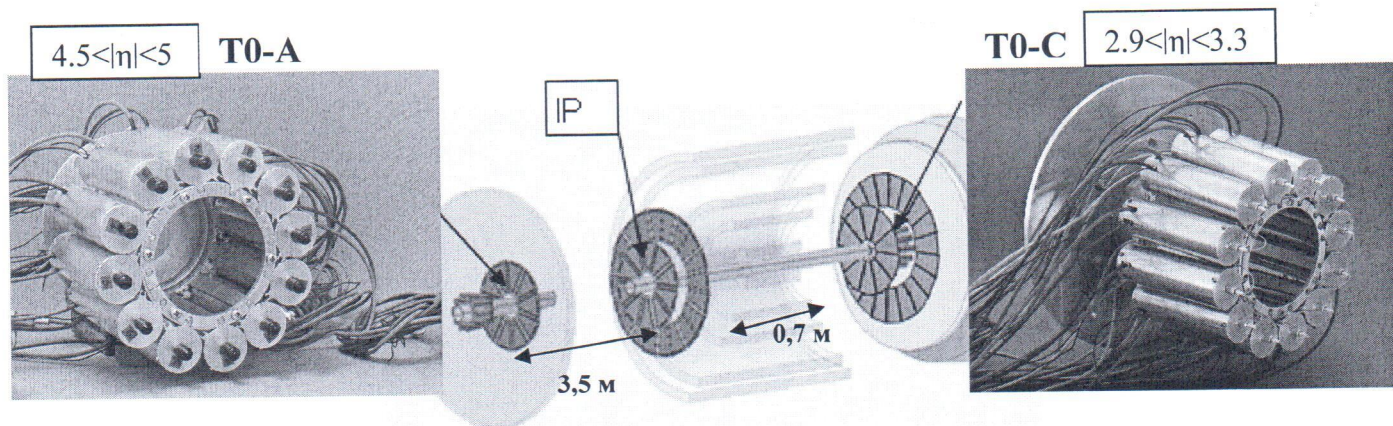


Рис. 1.21. Расположение детектора T0:
(T0-A – дальняя сборка, T0-C – ближняя сборка).

Механическая система детектора T0-C состоит из 12 цилиндрических корпусов расположенных вокруг оси пучка на поддерживающей механической структуре, которая закрепляется на передней поверхности поглотителя мюонного спектрометра. Центральные оси корпусов детекторов расположены на поверхности конуса с вершиной в точке взаимодействия (IP). Угол между этой осью и осью пучка составляет 5,3 градуса.

Сборка T0-A из 12 детекторов должна быть установлена на цилиндрической поддерживающей структуре, которая, в свою очередь, будет закрепляться на панели, являющейся частью подставки вакуумного насоса. Оси черенковских детекторов из T0-A параллельны оси пучка частиц.

Вся электроника детектора T0, за исключением усилителей-разветвителей, подающих сигнал (пре-триггер) на детектор переходного излучения, расположена вне магнита L3 и радиационной зоны.

Детектор T0 выполняет четыре основных функции:

1. T0 является стартовым детектором, формирующим точную временную отметку (основной физический сигнал «T0» с точностью временной привязки не более 50 пс с учётом вклада всей последующей электроники) для времяпролётного детектора, осуществляющего идентификацию частиц по методу времени пролёта частиц от вершины события до TOF.
2. T0 является триггерным детектором нулевого уровня, формирующим сигнал запуска установки ALICE, а также пре-триггерный сигнал для детектора переходного излучения TRD.
3. T0 дискриминирует фоновые события, возникающие при взаимодействии ускоренных ионов с остаточным газом внутри вакуумной трубы ускорителя.
4. Детектор T0 вырабатывает основные триггерные сигналы на одном из трёх уровней: периферические столкновения (малая множественность) – сигнал $T0_{Mb}$ (Minimum bias), полуцентральные столкновения (средняя множественность) – $T0_{semicentral}$, центральные столкновения (большая множественность) – $T0_{central}$. Сигналы $T0_{Mb}$, $T0_{semicentral}$, $T0_{central}$ уровня множественности события, снимаются с T0-A и T0-C сборок детектора независимо и одновременно.

Детектор T0 вырабатывает управляющие сигналы для L0 триггера, это $T0_A$, $T0_C$, $T0_V$. Краткая характеристика этих сигналов:

$T0_V$ - сигнал, определяющий положение вершины события с погрешностью

$\pm 1,5$ см. Допустимые границы положения вершины события должны задаваться программно в рамках управления всем экспериментом ALICE.

$T0_A$ - сигнал, аналогичный $T0_V$, но снимаемый только с детекторов сборки $T0-A$; $T0_C$ - сигнал, аналогичный $T0_V$, снимаемый с $T0-C$ сборки.

Особо надо отметить, что все выше перечисленные сигналы с детектора $T0$ должны выдаваться в реальном времени (в режиме on-line). Физический сигнал « $T0$ » вырабатывается в том случае, когда одновременно возникают сигналы в двух сборках $T0-A$ и $T0-C$.

В процессе калибровки прототипов в соответствии с техническим заданием на проект разрабатывались и тестировались отдельные, наиболее ответственные узлы электроники детектора, относящиеся прежде всего к системам выработки триггерных сигналов « $T0$ », $T0_A$, $T0_C$, $T0_V$.

Весь комплекс управления детектором включает в себя: 1) многоканальную систему сбора временной и амплитудной информации с целью получения основного стартового сигнала « $T0$ » для времяпролётной системы идентификации частиц, 2) электронику формирования триггерных сигналов $T0_A$, $T0_C$, $T0_V$, 3) электронику оцифровки и сбора данных, интегрированную в общую систему ALICE, 4) электронику контроля параметров детекторов.

1.3. Функциональная схема электроники стартового детектора.

Для обслуживания детектора требуется сложная многоканальная система сбора информации. Исходя из требований, предъявляемых к детектору $T0$, в течение длительного времени совместно с другими коллегами разрабатывалась, корректировалась и оптимизировалась структура системы съёма временной и амплитудной информации с 24 черенковских счётчиков детектора. Построение функциональной схемы системы сбора временной и амплитудной информации основывалось на следующих принципах:

1. Система должна обеспечивать конечное временное разрешение по всей цепочке модулей не хуже 25 - 35 пс с тем, чтобы конечное временное разрешение детектора не превышало 50 пс, иметь мёртвое время не более 25 нс.

2. Система должна обеспечивать регистрацию событий при каждом акте протон - протонных столкновений, так как это принципиально важно для вероятности выработки триггерных сигналов.

3. Система должна обеспечивать возможность on-line и off-line коррекции временных параметров детектора $T0$.

4. Система должна обеспечивать возможность выравнивания задержек сигналов в отдельных каналах с точностью ± 10 пс.

5. Система должна обеспечивать независимое получение временной и амплитудной информации с помощью различных методов с целью повышения надёжности и достоверности получения результатов.

В результате рассмотрения различных вариантов построения системы сбора информации был выбран окончательный вариант. Для понимания места и роли, разработанных и испытанных модулей на рис. 1.31 приводится упрощённая функциональная схема электроники стартового детектора T0, не включающая в себя некоторые дополнительные элементы, служащие для согласования узлов, не имеющие самостоятельного назначения. Функциональная схема включает в себя как узлы электроники, относящиеся к формированию сигнала «T0» и триггерных сигналов, так и узлы электроники, относящиеся к системе сбора данных и системе контроля всей установки ALICE. Система сбора данных и система контроля показаны на рисунке довольно схематично (в левом нижнем углу рисунка TRM - TDC Readout Module - промежуточный блок считывания и переноса информации с быстрой front-end электроники (содержащий время - цифровые преобразователи) [86], DRM - Data Readout Module - модуль считывания и накопления данных) [87, 88]. При приёме информации с детектора T0 будут использоваться сложные модули TRM и DRM, разработанные группой итальянских инженеров, эти блоки аналогичны тем, что применяются для считывания информации с времяпролётного детектора. Предполагается, что эти узлы будут включены по схеме, общей для всех детекторов ALICE [88].

Настоящая работа посвящается разработке и созданию многоканальной системы съёма временной и амплитудной информации с детектора T0, изготовлению и настройке быстрой front-end электроники для этой системы, а также разработке методики настройки и калибровки системы сбора информации.

Быстрая front - end электроника.

Сигналы с каждого из 24 ФЭУ-187 поступают на предусилители, так называемые Shoe-box, расположенные в 6 метрах от сборок детектора. Главная роль компактного предусилителя Shoe-box, разработанного коллегами из университета г. Юваскила, разветвить сигнал с фотоэлектронного умножителя и усилить для передачи на расстояние 50 метров по специальному высокочастотному кабелю. Один сигнал с предусилителя Shoe-box после разветвления служит для запуска детектора переходного излучения TRD, второй - поступает на аналоговый разветвитель FANOUT.

Для создания многоканальной системы съёма временной и амплитудной информации стартового детектора T0 эксперимента ALICE, требуется большое число блоков электроники, они были изготовлены в различных лабораториях МИФИ, Институт Ядерных Исследований РАН, г. Троицк, Курчатовский институт: одна часть модулей сделана с использованием единого управляющего интерфейса по магистрали VME (с использованием контроллера крейта VME – USB типа V1718 [89]), другая часть блоков, не требующая индивидуального периодического управления, изготовлена в стандарте NIM.

Вся основная быстродействующая электроника будет располагаться в специальном помещении, вне зоны пучка и к модулям предъявляются менее жёсткие требования по радиационной стойкости, чем к предусилителю Shoe-box.

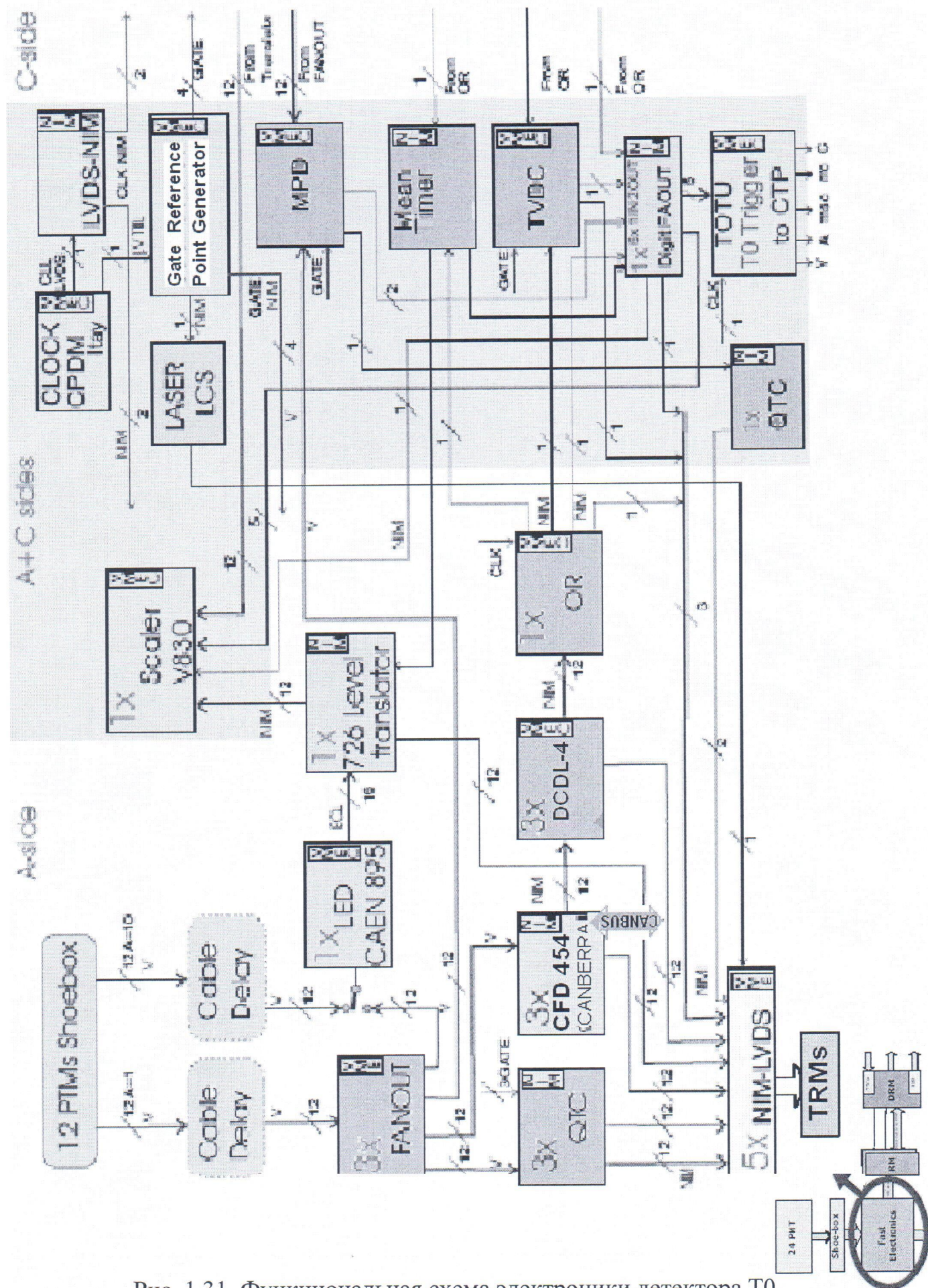


Рис. 1.31. Функциональная схема электроники детектора T0.

С предусилителя Shoe-box второй сигнал по кабельной линии задержки (Cable Delay), длиной 50 метров, поступает на аналоговый разветвитель FANOUT. На FANOUT поступают двенадцать сигналов с T0-A сборки и столько же с T0-C. Разработанный в Курчатовском институте блок FANOUT содержит четыре независимых разветвителя 1 на 4, т.е. для приёма сигналов с T0-A и T0-C сборок детектора T0 изготовлено 6 модулей FANOUT.

С разветвителя FANOUT один аналоговый сигнал поступает на формирователь временной отметки со следящим порогом (ФСП) - CFD 454 (Constant Fraction Discriminator) фирмы CANBERRA [90], работающий на необходимой частоте 40 МГц. Из расчёта: один формирователь на один черенковский счётчик - потребовалось 6 четырёхканальных модулей CFD 454.

Второй аналоговый сигнал с разветвителя FANOUT поступает на формирователь временной отметки с постоянным порогом – ФПП. В данной схеме ФПП будет реализован на готовых блоках, разработанных фирмой C.A.E.N., в VME стандарте: дискриминатор LED [91] (Leading Edge Discriminator) V895 и преобразователь (726 Level Translator) сигналов уровней ECL в сигналы стандарта NIM для считывания в систему сбора данных.

Введение в схему прибора одновременно двух формирователей временной отметки является оригинальным решением, позволяющим задублировать измерение сразу двух основных параметров – измерение временной отметки и измерение амплитуды сигнала.

Третий аналоговый сигнал с разветвителя FANOUT поступает на дискриминатор множественности - модуль MPD (Multiplicity Discriminator), разработанный в Курчатовском институте. В MPD происходит аналоговое сложение сигналов со всех фотоумножителей, этот сигнал суммирования оцифровывается и хранится в системе сбора данных ALICE. Дискриминатор множественности выдаёт один из трёх ($T0_{Mb}$, $T0_{semicentral}$, $T0_{central}$) логических сигналов в соответствии с предустановленными уровнями ожидаемой множественности частиц.

С разветвителя FANOUT четвёртый аналоговый сигнал поступает на QTC (Charge to Time Converter – преобразователь заряд-время), а затем два сигнала, один из которых «СТАРТ», а второй - «СТОП», пройдя через преобразователи уровней NIM-LVDS (разработанные в лабораториях института ИЯИ), поступают в промежуточные блоки считывания и переноса TRMs и в систему накопления и сохранения информации.

Вся эта цепочка аппаратуры будет подробно описана в главе 3.

Как уже отмечалось, TOF имеет гигантское количество (до 10^5) каналов регистрации, для чего в ЦЕРН были разработаны специальные чипы: многоканальные время - цифровые преобразователи. В самом детекторе TOF для амплитудно-временной off-line коррекции используется преобразователи амплитуда-время. Поскольку итальянская научная группа любезно предоставила в наше распоряжение достаточное число временных каналов, нами было принято решение: пойти по тому же пути – использовать для амплитудной коррекции преобразование амплитуда-время. Сочетание сигналов

ФПП - ФСП даёт хорошие результаты, как будет показано в главе 3, именно в области малых амплитуд, где и потребуется коррекция показаний CFD 454.

ФСП формирует стандартный логический сигнал точной временной отметки, который далее поступает на входы управляемой линии задержки, разработанной при непосредственном участии автора, - это четырёхканальный модуль DCDL-4 (Digital Control Delay Line [92]) для точного выравнивания и подстройки временных задержек всех 24 сигналов, поступающих с формирователей. Для подстройки, а также периодической корректировки временных задержек сигналов в процессе эксплуатации, потребовалось 6 четырёхканальных модулей DCDL-4.

С трёх блоков DCDL-4 (T0-A сборки детектора) 12 сигналов должны поступать на схему отбора «ИЛИ», посредством которой необходимо определять первый сигнал, пришедший с формирователей временной отметки. Выделить первый из пришедших сигналов необходимо для получения точной временной отметки, т.к. в протон - протонных столкновениях срабатывает 1, 2 или 3 фотоумножителя, при этом регистрируемые частицы разбросаны во времени и важно определить первую. В ион - ионной моде всегда есть частицы, летящие после столкновения со скоростью света, и надо ориентироваться на них, поэтому важно выделить первый сигнал с формирователей. Для этой главной цели был разработан автором модуль логического отбора OR_A. Второй функциональной задачей, выполняемой этим модулем, является уменьшение фоновой загрузки (Background) детекторов от частиц, не связанных по времени и месту с ожидаемыми. Для этого в разрабатываемый модуль необходимо было ввести отбор событий по времени поступления и регистрировать только те, которые близки к ожидаемому моменту столкновения частиц в центре установки, определяемому сигналами с ускорителя. Более подробно функциональная схема и описание модуля OR и других блоков быстрой электроники будет приведено в главе 3. Для приёма и отбора сигналов с ближней T0-C сборки детектора необходим второй модуль OR_C. Таким образом, на выходе моделей OR_A и OR_C формируются сигналы T0_A и T0_C – сигналы срабатывания хотя бы одного (первого из нескольких) черенковских счётчиков T0-A и T0-C сборок соответственно.

Физический сигнал «T0» формируется в усреднителе временных интервалов «Mean Timer» [93] - устройстве, работающем по следующему принципу. Триггерный сигнал «T0» вырабатывается в том случае, когда одновременно возникают сигналы в двух сборках T0-A и T0-C. На два входа усреднителя поступают сигналы T0_A и T0_C. На выходе усреднителя формируется сигнал «T0», положение которого на временной оси определяется следующей формулой (принимая за начало отсчёта истинное время события): $\langle T0 \rangle = (T0_A + T0_C)/2 + T_3$, где T_3 – фиксированная величина задержки (около 15 нс), определяемая схемным решением усреднителя временных интервалов.

Полная, что мы регистрируем самые первые быстрые релятивистские частицы, образованные в столкновениях тяжёлых ионов с энергиями в системе центра масс 5,5 ТэВ/нуклон, имеющие скорость приблизительно равную скорости света ($\beta \sim 1$, т.е. $V = c$), то величину $(T0_A + T0_C)/2$ – действительно

можно считать не зависящей от положения вершины события при фиксированном расстоянии между ближней и дальней сборками и, таким образом, сигнал «T0» (с задержкой T_3 , которая легко измеряется в результате настройки и калибровки модуля) определяет истинное время физического события.

Модуль «Mean Timer» предназначен для улучшения временного разрешения детектора T0, а именно для компенсации временного разброса в срабатывании детекторов, связанного с координатой взаимодействия первичных частиц. Временной выходной сигнал с «Mean Timer» является стартовым для времяпролётной системы ALICE.

Помимо модуля «Mean Timer» сигналы $T0_A$ и $T0_C$ непосредственно поступают в сложную систему T0 Trigger Unit (TOTU – логический модуль формирования триггерных сигналов для центрального триггерного процессора), в промежуточный модуль TRM (TDC Readout Module на время – цифровой преобразователь) и на TVDC (T0 Vertex Digital Converter), в котором измеряется (и оцифровывается) разность времени прихода сигналов $T0_A$ и $T0_C$. Очевидно, что разность $T0_A - T0_C$ пропорциональна положению вершины события, и выходной сигнал разности сигналов $T0_A - T0_C$ однозначно определяет это положение.

Сигналы $T0_A$ и $T0_C$ с выхода модулей OR_A и OR_C также поступают в основной узел выработки триггерного сигнала – модуль TVDC [94] (T0 Vertex Digital Converter), генерирующий выходной триггерный сигнал лишь в том случае, когда точка столкновения лежит в заданном диапазоне (5,6 см) координат по оси Z, т.е. вдоль оси трубы ионопровода. С выхода модуля TVDC выдаётся сигнал $T0_V$, который проходит в систему T0 Trigger Unit.

Требования, предъявляемые к узлам быстрой front-end электроники, состоят в том, чтобы их вклад в общее разрешение детектора был не больше, чем собственное разрешение черенковских счётчиков. Фактически каждый узел (CFD, DCDL-4, OR, «Mean Timer») должен иметь собственный джиттер на уровне 10 - 15 пс.

Сложная система T0 Trigger Unit (рис. 1.31) отбирает только разрешенные коды, пропуская триггерный сигнал $T0_V$, один из трёх сигналов ($T0_{Mb}$, $T0_{semicentral}$ или $T0_{central}$) с дискриминатора множественности MPD, которые поступают в центральный триггерный процессор (CTP – Central Trigger Processor) наряду с сигналами $T0_A$ и $T0_C$.

Функциональная схема системы считывания информации.

Для осуществления off-line коррекции детектору TOF требуется информация от детектора T0 для стабильности и точности определения точки взаимодействия встречных ионов (протонов). В виду того, что разработчики времяпролётного детектора будут применять в своей системе считывания информации многоканальные время - цифровые преобразователи (ВЦП) и не использовать аналого-цифровые преобразователи (АЦП), как в других детекторах установки ALICE (например, в ITS), нами было принято решение, что система считывания информации детектора T0 будет схожа с системой

ТОФ. Группой итальянских разработчиков для считывания информации с детектора Т0 было предоставлено большое число временных каналов, что позволило не вводить АПЦ и избежать дополнительных сложностей. Особенность системы считывания детектора Т0 в том, что происходит преобразование амплитуды во временной интервал, который впоследствии оцифровывается. Функциональная схема считывания информации детектора Т0 представлена на рис. 1.32. Эта диаграмма была разработана триггерной группой детектора Т0 [95].

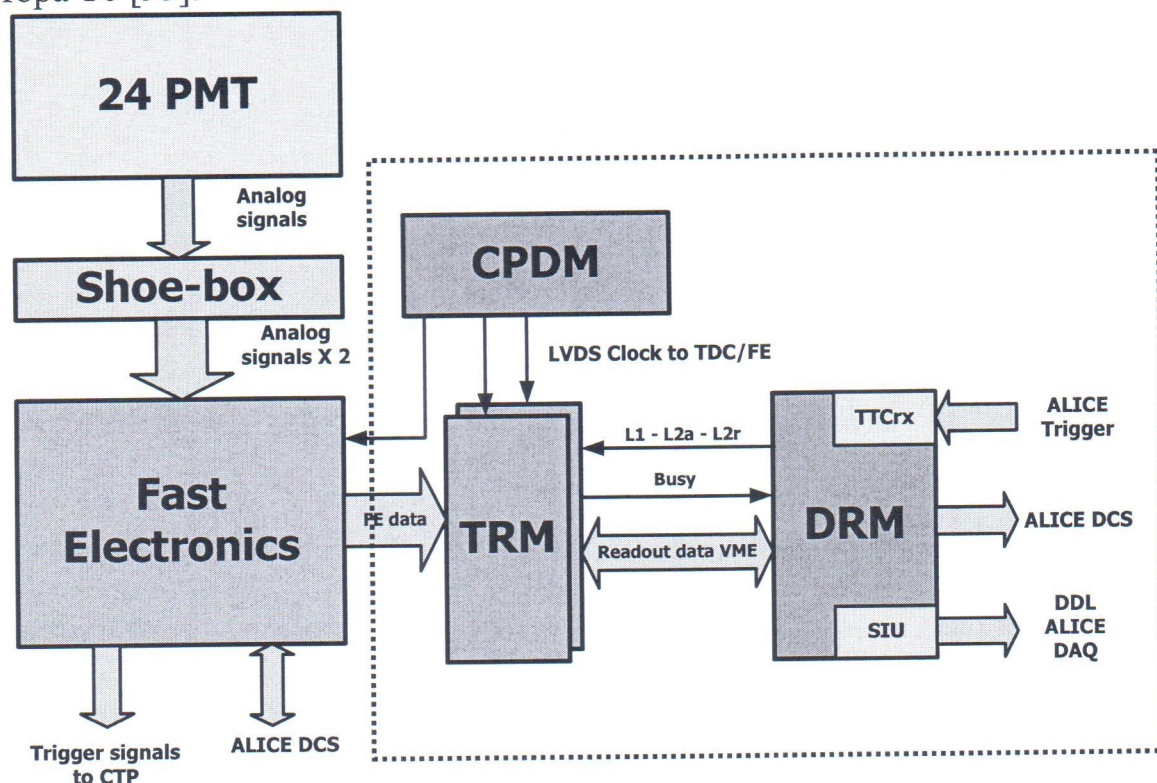


Рис. 1.32. Функциональная схема для считывания данных детектора Т0 обведена пунктиром.

Электроника, как уже было сказано выше, включает в себя модули: аналоговый разветвитель FANOUT, дискриминаторы временной отметки со следящим порогом CFD 454 и с постоянным порогом LED V895 (Т0-А и Т0-С сборки), модули DCDL-4, модули OR, модуль «Mean Timer», триггерный блок TVDC, TRM (TDC Readout Module - считывающие модули), преобразователи заряд-время QTC, распределительный модуль CPDRM (Clock Pulse Distribution Readout Module) и модуль считывания данных DRM (Data Readout Module). Модули быстрой электроники будут размещены в двух крейтах стандарта VME отдельно от блоков считывания и переноса информации.

Двадцать четыре выходных сигнала формирователей с постоянным порогом (LED V895+726 Level Translator) передаются через преобразователи NIM - LVDS в модули TRM (рис. 1.33). Аналоговые амплитудные выходные сигналы с разветвителя FANOUT преобразуются в интервал времени с помощью преобразователя заряд-время QTC, а затем передаются в модули TRM. Сигналы с блоков DCDL-4 также поступают на TRM, расположенные в

VME крейте вне магнита. Для временных и амплитудных измерений каждого сигнала каждого фотоумножителя решено применить решение, аналогичное принятому для времяпролётного детектора TOF и использовать те же ВЦП (время - цифровые преобразователи) высокого разрешения. Каждый модуль TRM основан на чипах ВЦП высокого разрешения (HPTDC - High Performance TDC – Time to Digital Converter) [96].

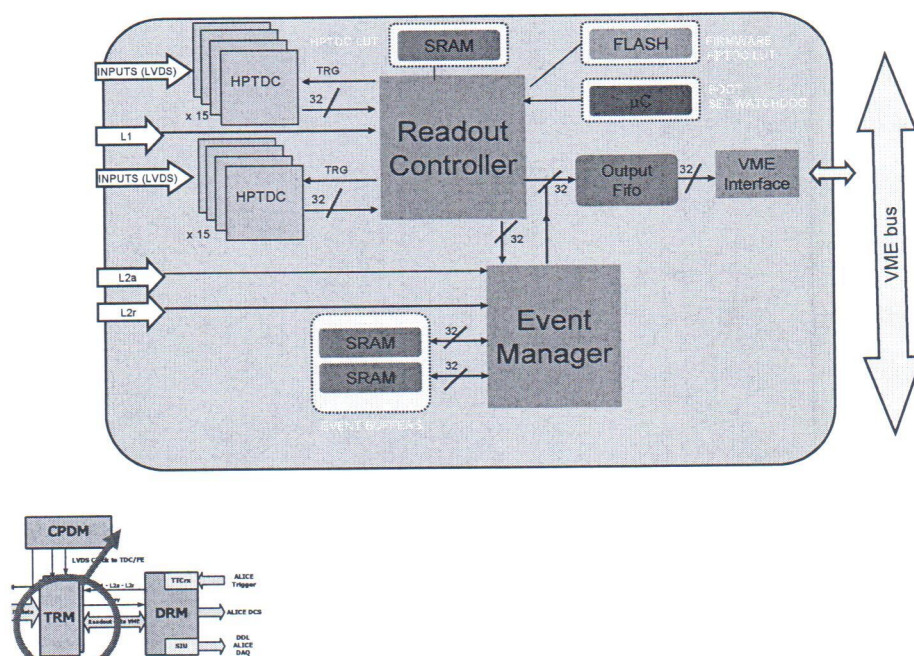


Рис. 1.33. Функциональная схема модуля TRM (TDC Readout Module).

Функциональная схема модуля TRM, разработанная группой итальянских ученых, приведенная на рис. 1.33. Она основана на многоканальном чипе HPTDC, который осуществляет кодирование временных интервалов на внутренней рабочей частоте 80 МГц. ВЦП будет работать в режиме высокого разрешения 24 пс. Считывание данных HPTDC осуществляется модулем Readout Controller. После прихода триггерного сигнала L1, Readout Controller обращается к HPTDC и осуществляет перенос данных о событии в Event Manager и буфер памяти SRAM (Static Random Access Memory), из блока Event Manager данные пересылаются в цифровой сигнальный процессор (DSP – Digital Signal Processor). Триггер L2 инициирует передачу данных по шине VME и очищает буфер данных. Инициализация, установка и контроль различных установок в HPTDC, упаковка данных осуществляется цифровым сигнальным процессором DSP. Функциональная схема блока HPTDC [96] представлена на рис. 1.34. HPTDC осуществляет частичную упаковку данных и может работать как 32 канальное устройство, но в нашем случае будет работать как 8-канальное (число каналов зависит от того, какое разрешение необходимо получить на выходе), тактовая частота оцифровки 40 МГц задается внешними устройствами. Размер входного буфера 4 x 256, размер считывающего буфера 256.

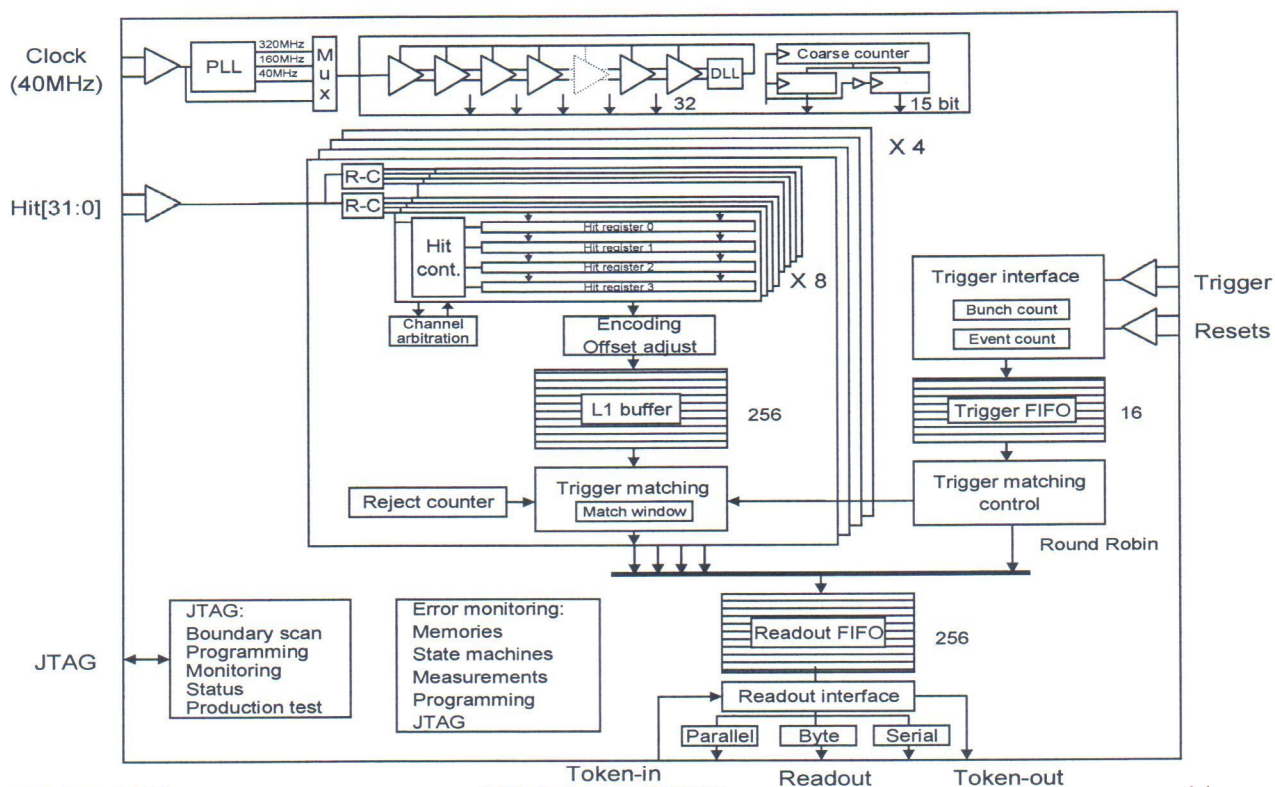
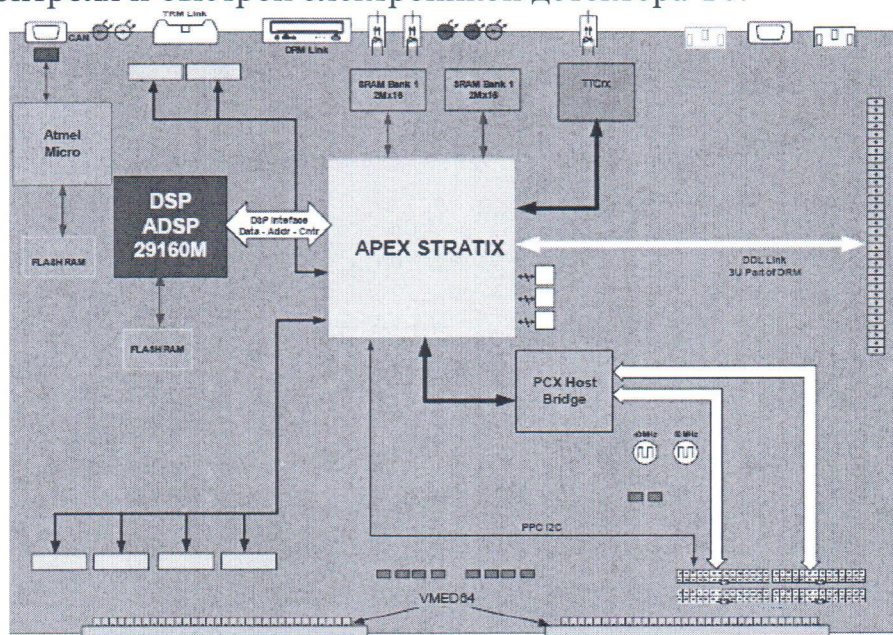


Рис. 1.34. Архитектура НРТДС.

Цифровые коды с модулей TRM поступают в блок считывания данных DRM, расположенном в том же крейте VME, что и TRM. Затем все данные собираются в модуле DRM как под-событие и пересылаются в центральную систему сбора данных (DAQ – Data Acquisition system) всего эксперимента ALICE с помощью системы Detector Data Link (DDL). Функциональная схема модуля DRM приведена на рис. 1.35. Модуль DRM служит основным интерфейсом между системой сбора данных всего эксперимента ALICE, системой контроля и быстрой электроникой детектора T0.



Загрузка программ и общий контроль TRM осуществляется через VME интерфейс модулем DRM. Все общие триггерные сигналы ALICE изначально проходят через DRM (внутренний блок TTCxx). Модуль TRM будет использоваться не только для временного анализа, но также и для принятия амплитудной информации со всех черенковских счётчиков детектора T0. Модули считывания и переноса информации TRM и DRM разработаны группой итальянских инженеров из г. Болоньи.

Система автоматизации управления и контроля детектором.

Система автоматизации управления и контроля стартовым детектором T0 (рис. 1.36.) очень сложна и разработана коллаборацией, отвечающей за создание всего детектора. Главной задачей системы является обеспечение правильности работы всех составляющих частей эксперимента. Сам детектор находится в шахте ускорителя и во время работы LHC не представляется возможным проверять оборудование локально. Поэтому система контроля должна работать удаленно, фиксируя данные о состоянии экспериментального оборудования и проверяя их на наличие отклонений от заданных параметров. При выявлении несоответствий в работе, оператору будет выдано сообщение о месте возникновения неисправности. В случае если аварию не удастся устранить в соответствии с инструкцией, оператор вызовет эксперта.

Система управления и контроля детектором T0 (DCS - Detector Control System) состоит из четырёх уровней. На приведенном рисунке показаны зоны, где находится детектирующая система, линии передачи сигналов, устройства связи с объектом, считывающая электроника, линии связи и компьютерное оборудование с программным обеспечением. В системе управления детектором на главный компьютер должна поступать информация от всех подсистем и на информационной панели будет отображаться их состояние.

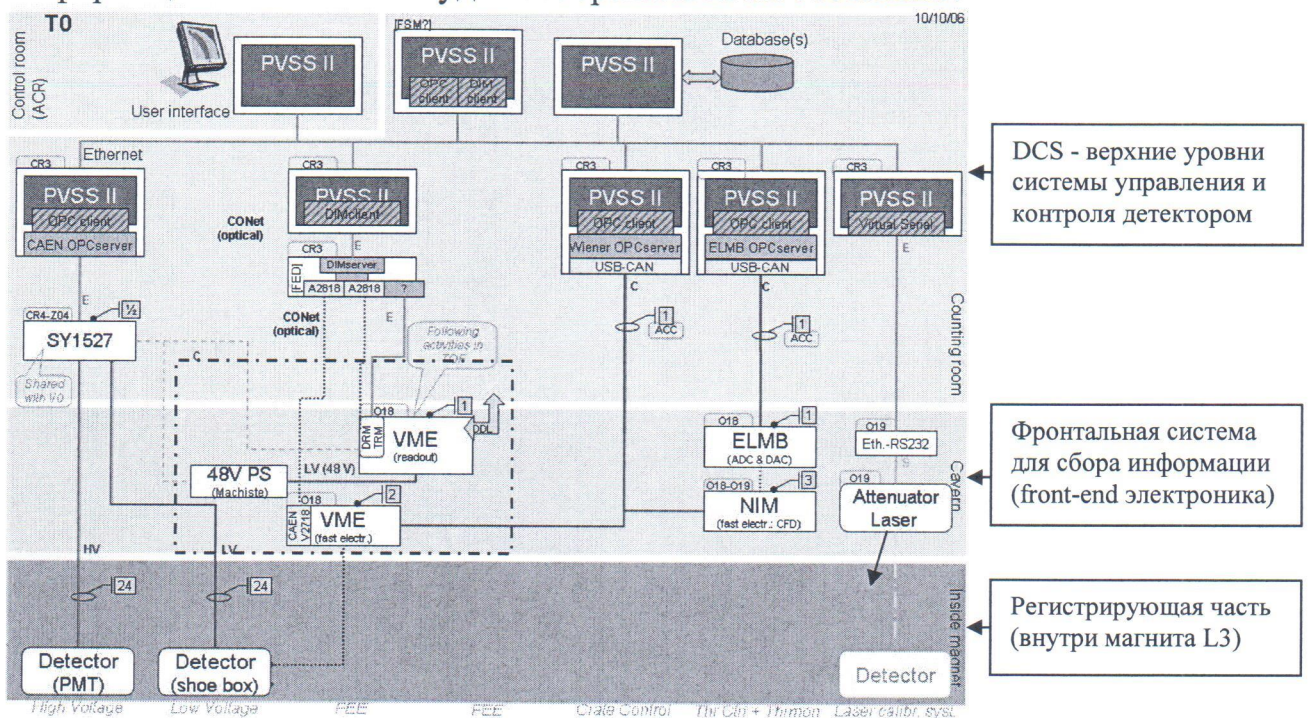


Рис. 1.36. Система автоматизации управления и контроля детектором T0.

Для управления оборудованием стартового детектора была разработана древовидная структура, где объекты управления, объединённые общим назначением, выделены в отдельные группы.

Структура системы контроля за ходом эксперимента слоёная, т.е. высокий уровень является узлом для низших, и может не только собирать данные с них, но и управлять ими. Такие же структуры часто встречаются в промышленном производстве, поэтому схема для управления процессами отработана. Для использования в ЦЕРН была рекомендована система PVSSII (от немецкого Prozeß Visualisierungs und Steuerungs System – программный продукт, направленный на автоматизацию процесса) австрийской фирмы ETM. PVSSII уже довольно давно используется в Европейском центре ядерных исследований. Для неё разработаны различные дополнения, включающие в себя наиболее используемые функции, что сильно облегчает задачу построения системы управления и контроля нового эксперимента.

В систему управления входят: задачи управления блоками высоковольтной (HV – High Voltage) и низковольтной (LV – Low Voltage) электроники, крейтами (Create Control) и быстрой электроникой переднего края (так называемой, front-end (FE) электроникой), системой лазерной калибровки (Laser Calibration) (рис. 1.37), а также задача слаженного взаимодействия всех элементов и адекватная реакция автоматики на сбои, происходящие во время эксперимента.

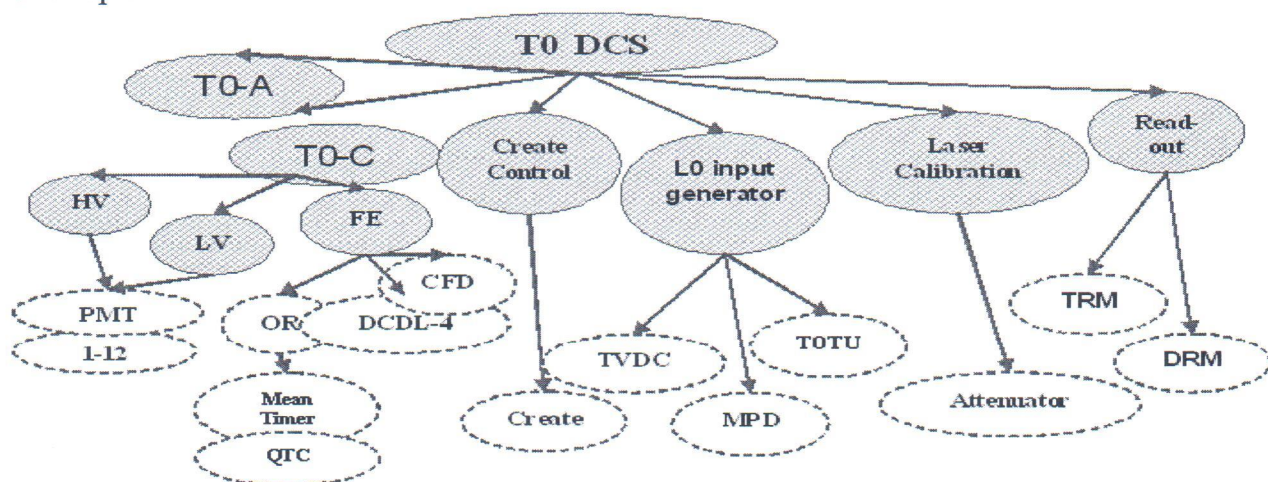


Рис. 1.37. Структура связи оборудования и системы управления.

Быстрой front-end электронике требуется задавать корректирующие параметры, в случае отклонения значений от первоначально заданных, а также следить за работой самих электронных блоков.

В задачу управления блоками высоковольтной электроники входят установка и поддержание определённых значений напряжения и тока, незамедлительная реакция на отклонения от заданных параметров и выработка сигналов тревоги и предупреждения оператору.

Система лазерной калибровки необходима для проверки работы фотоумножителей и калибровки подсистем детектора с помощью импульсного лазера в случае изменения параметров ФЭУ в результате старения, воздействия сильных магнитных полей и радиоактивности.

Выводы к главе 1.

1) В первой главе представлена структура детектора T0, состоящая из двух сборок черенковских счётчиков по 12 счётчиков в каждой. Из-за ограничений, связанных с самой конструкцией установки ALICE, они расположены несимметрично относительно номинальной точки столкновения ионов – T0-C на расстоянии 70 см, T0-A на расстоянии около 3,5 м.

2) Разработаны принципы построения и представлена функциональная схема многоканальной системы сбора информации электроники детектора, разработанная автором совместно с другими коллегами.

3) Кратко представлено назначение и описание модулей быстрой front-end электроники, в том числе разработанной лично автором.

ГЛАВА 2.

Моделирование и анализ основных физических параметров детектора.

Следует иметь в виду, что хотя основной целью проекта ALICE является поиск кварк-глюонной плазмы в ион - ионных столкновениях, детектор будет также исследовать процессы, возникающие при протон - протонных столкновениях и сопровождающиеся рождением вторичных частиц. Именно множественность рождения вторичных частиц является решающим параметром при определении вероятности выработки триггерных сигналов (вероятность срабатывания одновременно двух сборок T0-A и T0-C в совпадении). Для детектора T0 важным является влияние этих процессов на временное разрешение и вероятность регистрации частиц. Если в ион - ионных столкновениях множественность вторичных частиц столь велика, что обеспечивает практически 100% вероятность выработки триггерных сигналов, в протон - протонных столкновениях множественность вторичных частиц существенно меньше. Это приводит к тому, что вероятность регистрации частиц детектором T0 в протон - протонных столкновениях заметно меньше 100%.

2.1. Программные средства моделирования физических процессов.

Моделирование физических процессов столкновения частиц и результатов этого столкновения, а также вероятности их регистрации ввиду случайного характера процессов можно проводить только методом Монте-Карло. Реализация данного метода проводилась при помощи специального программного пакета GEANT [97, 98], в нём заложен набор алгоритмов, разработанных для численного моделирования физических процессов при столкновении частиц высоких энергий.

Для осуществления Монте-Карло моделирования происходящих процессов в эксперименте ALICE разработчиками ЦЕРН создан специальный программный пакет AliRoot [99]. AliRoot использует систему Root [100] как фундамент, на котором построены процессы моделирования происхождения событий, восстановления треков частиц и анализа полученных данных. AliRoot структура включает в себя программные средства, позволяющих обрабатывать данные. Фундаментальные взаимодействия элементарных частиц высоких энергий имитируются генератором событий Pythia [101], и результирующее кинематическое древо затем используется в пакете передачи данных (The *transport package*).

Генератор событий Pythia.

В «реальной жизни» на ускорителе осуществляется взаимодействие частиц. Полученные в результате взаимодействия частицы регистрируются детекторами, и, после первичного отбора записываются в систему сбора

данных. Затем проводится реконструкция событий, т.е. сигнал с электроники детекторов (с TOF, ITS, калориметров и других) переводится в информацию о процессе, которую уже можно использовать в программах обработки данных. Генератор событий производит «комплект частиц» с их соответствующими импульсами. Набор частиц, которые содержат историю развития процессов рождения (в форме отношения: первичная частица $\rightarrow$ рожденные вторичные и вершина образования), и формирует кинематическое дерево. Таким образом, имеем набор треков для заряженных частиц, выделение энергии для нейтральных, или, в идеальном случае, полную информацию об импульсах и типах частиц. Поведение частиц, полученных с помощью генератора событий, в детекторах, т.е. пересечение объема детектора, закручивание треков в магнитном поле, развитие ливней в калориметрах или попадание частиц в щели и т.п. моделируется программным пакетом GEANT. Различные версии GEANT были разработаны в лаборатории ЦЕРН для создания физических моделей процессов в детекторах. В основе пакета был заложен язык объектно-ориентированного программирования C++. В качестве инструментального средства в пакет GEANT входят классы и функции, позволяющие описать геометрию и конструкционные материалы детектора и смоделировать процессы взаимодействия различных частиц.

Транспортный пакет имитирует прохождение сгенерированных частиц через установленные детекторы и включает в себя все возможные события - «Hits» - «хиты», которые в терминологии детектора ALICE означают энергетические потери частицы в данной точке. В «хитах» содержится информация, так называемые «трековые метки», о частицах, которые возникли в результате взаимодействия.

Следующий шаг – это отклик детектора, принимаемый во внимание, и «хиты» - события, преобразуемые в цифры. Если сказать больше, события непосредственно связаны/соотнесены с треками частиц. На рис. 2.11 представлена структура обработки данных (сопоставление Монте-Карло моделирования с реально получаемыми частицами), и переход от событий к цифрам отмечен на рисунке, как переход от «Hits» к «Dis-integrated response» (отклик распада).

Существует два типа цифр: суммируемые цифры (Summable Digits), где используются низкие пороги - результат аддитивная величина и цифры (Digits), в которых используются реальные пороги и результат схож с тем, что должны получить от реальных детекторов. Имеются различия между «цифрами» и сырым (raw) – форматом данных, созданным детектором: в-первых, информация о Монте-

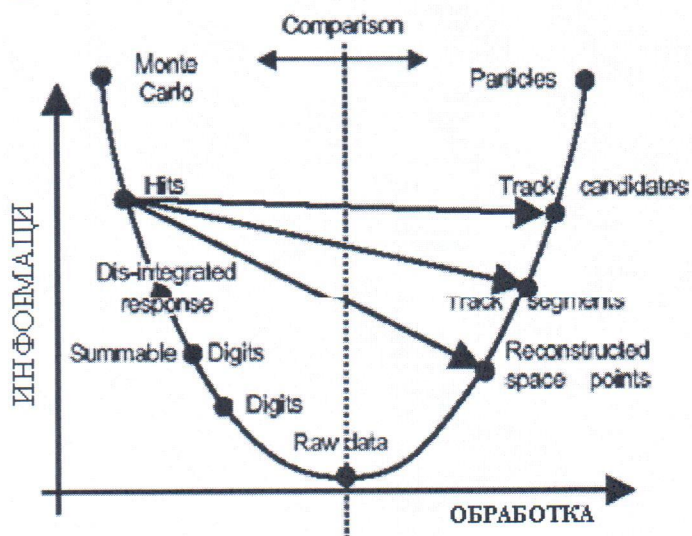


Рис. 2.11. Структура обработки данных.

Карло сгенерированной частице сохраняется в цифровом формате и, во-вторых, raw данные в двоичном коде в Root структуре.

В эксперименте ALICE все off-line программы обработки основаны на Root. Структура Root предлагает большое число важных элементов, которые используются в AliRoot:

- полный анализ данных, включая все PAW (Physics Analysis Workstation) особенности [102];
- удобный графический интерфейс пользователя;
- большой запас полезных функций, включая в большинстве случаев используемые математические функции, генератор случайных чисел, многопараметрическую аппроксимацию (сплайн);
- описание программ на языке C++ [103].

2.2. Моделирование функции отклика детектора с учётом реальной геометрии.

Программный пакет AliRoot, как уже упоминалось ранее, был создан для осуществления Монте-Карло моделирования работы эксперимента ALICE. AliRoot осуществляет моделирование взаимодействия как ионов, так и протонов с последующим прохождением образовавшихся после взаимодействия частиц через детекторы экспериментальной установки ALICE. Для проведения Монте-Карло моделирования была создана та часть программного пакета AliRoot, которая соответствовала детектору T0 [104]. Программный пакет состоит из четырёх основных программ, созданных разработчиками ЦЕРН:

- 1) AliT0v2.cxx, AliT0v2.h;
- 2) AliT0Digitizer.cxx AliT0Digitizer.h;
- 3) AliT0Reconstruction.cxx AliT0Reconstruction.h;
- 4) AliT0RawData.cxx AliT0RawData.h;

Задачей первой программы является моделирование физических параметров детектора T0, и запись информации о «хитах». Вторая программа осуществляет оцифровку полученной информации. По результатам оцифровки в третьей программе происходит реконструкция вершины взаимодействия. В четвёртой программе осуществляется запись полученной информации в формате, соответствующем эксперименту ALICE.

Задачу по моделированию функции отклика детектора с учётом реальной геометрии черенковского счётчика, а так же моделирования функции отклика детектора при работе LHC в режимах протон - протонного и ион - ионного взаимодействия, в основном осуществляется в первой программе. Данная программа состоит из четырёх основных модулей:

1. void AliT0v2::CreateGeometry();
2. void AliT0v2::DrawModule();
3. void AliT0v2::Init();
4. void AliT0v2::StepManager ()

Первый модуль предназначен для определения геометрических параметров детектора T0, создания материалов, из которых выполняются отдельные элементы счётчиков, размещения полученных элементов в объёме экспериментальной установки ALICE. Второй модуль используется для графического отображения, создаваемой компьютерной модели детектора T0. В третьем модуле происходит инициализация детектора T0 - задаётся чувствительный объём (объём, в котором происходит регистрация черенковских фотонов). В четвёртом модуле осуществляется непосредственное прохождение образовавшихся частиц через детектор T0.

Моделирование функции отклика черенковского счётчика носит нетривиальный характер [105]. Поскольку программа расчёта AliRoot и входящий в неё базовый программный пакет GEANT учитывают взаимодействие гамма-излучения с веществом радиатора (конверсию в электрон-позитронные пары), в качестве радиатора был выбран кварц, как материал, обеспечивающий необходимую радиационную стойкость детектора. Кроме того, учитывалось вторичное излучение при взаимодействии образовавшихся частиц с вакуумной трубой ускорителя. Разработанный в ЦЕРН программный пакет моделирует статистический процесс излучения Черенкова при прохождении релятивистской заряженной частицы через радиатор, ионизационные потери, многократное рассеяние и т.п., а также распространение, отражение и преломление испущенных фотонов. Для получения конкретных результатов программа дополнена модулями, описывающими потоки регистрируемых частиц, геометрию детектора, а также модулями, обеспечивающими получение на выходе конкретных необходимых характеристик и зависимостей. Для получения достоверных данных необходимо сравнение результатов моделирования с экспериментальными результатами, которые были получены в результате калибровки счётчика на пучке ускорителя заряженных частиц.

На начальном этапе моделирования определяется, что заряженная частица попала в данный объём детектора T0. В процессе моделирования генерируется вторичная частица, это может быть черенковский фотон, Δ -электрон или ядро отдачи. Далее отслеживается в нашем случае только судьба черенковского фотона и если, образование такового наблюдалось, то принимается решение продолжить обработку данной частицы, если нет, то осуществляется переход к анализу следующей. Если в качестве вторичной частицы выступает черенковский фотон (энергия фотона 250 – 500 нм.), проследивая его траекторию вплоть до попадания фотона на фотокатод ФЭУ или в «слепую» зону фотоумножителя, а также время попадания фотона в детектор T0. На следующем этапе полученная информация о попавших на фотокатод ФЭУ фотонах и их энергия записывается в файл данных.

После набора статистики происходит обработка полученных данных с помощью специальной программы. На первом этапе выполнения программы загружаются необходимые библиотеки, осуществляется проверка правильности подключения файла содержащего результаты Монте-Карло моделирования. Процесс обработки результатов состоит из трёх вложенных циклов:

- первый цикл осуществляется по всему количеству актов взаимодействий протонов (или тяжёлых ионов);
- второй цикл осуществляется по всему количеству вторичных частиц, образовавшихся в одном событии;
- третий цикл осуществляется по всему количеству «хитов», оставленных частицей в детекторе T0.

Детектор T0 состоит из двух сборок черенковских счётчиков (по 12 в каждой). Каждый счётчик, в свою очередь, состоит из черенковского радиатора, прикрепленного к ФЭУ. Основной размер радиатора, рассматривавшийся в первоначальном варианте проекта детектора - диаметр 30 мм при длине также 30 мм. Этот размер соответствует габаритному размеру фотоумножителя, но существенно больше диаметра фотокатода (20 мм). Большой размер радиатора обеспечивает большую вероятность попадания заряженной частицы в радиатор. Однако, при таком соотношении диаметра радиатора и диаметра фотокатода существенно искажается амплитудный спектр при прохождении через радиатор релятивистских частиц, т.к. условия светосбора на краях радиатора заметно хуже, чем в его центральной части. Из-за этого в радиаторе, в зависимости от траектории частицы возникают «слепые» зоны, свет от которых не попадает на фотокатод. Это приводит к некоторому ухудшению временного разрешения детектора и к существенному увеличению динамического диапазона амплитуд выходных сигналов. Диапазон амплитуд простирается от 80 мВ до примерно 400 мВ, т.е. динамический диапазон равен 1 : 5, что приводит к существенному увеличению всего динамического диапазона при регистрации событий как малой, так и большой множественности.

Коллегами, участвующими в разработке детектора T0 проводилось исследование трёх возможных диаметров радиатора 30 мм, 26 мм и 20 мм. В частности А. Богдановым, для проверки правильности работы программного пакета моделирующего работу детектора T0 проводилось сравнение экспериментальных данных с результатами расчётов. Экспериментальные данные представляют собой амплитудное распределение сигналов с ФЭУ для трёх диаметров черенковского радиатора. На рис. 2.21 приведены амплитудные спектры при облучении черенковских счётчиков в широком равномерном пучке релятивистских частиц. Из распределения видно, что существует качественное различие между радиатором диаметром 20 мм и остальными двумя. Это различие обусловлено краевыми эффектами, возникающими в случае, когда диаметр радиатора превышает диаметр фотокатода ФЭУ и чем больше это несоответствие, тем ярче отличие между распределениями.

При диаметре радиатора равном диаметру фотокатода, амплитудный спектр существенно видоизменяется: его максимум сдвигается в сторону больших амплитуд ~ 400 мВ, а форма становится примерно Гауссовой. Динамический диапазон амплитуд снижается до значения 1 : 2 (250 - 500 мВ).

Появляется широкий пьедестал, отделяющий пик амплитудного распределения от шумов ФЭУ.

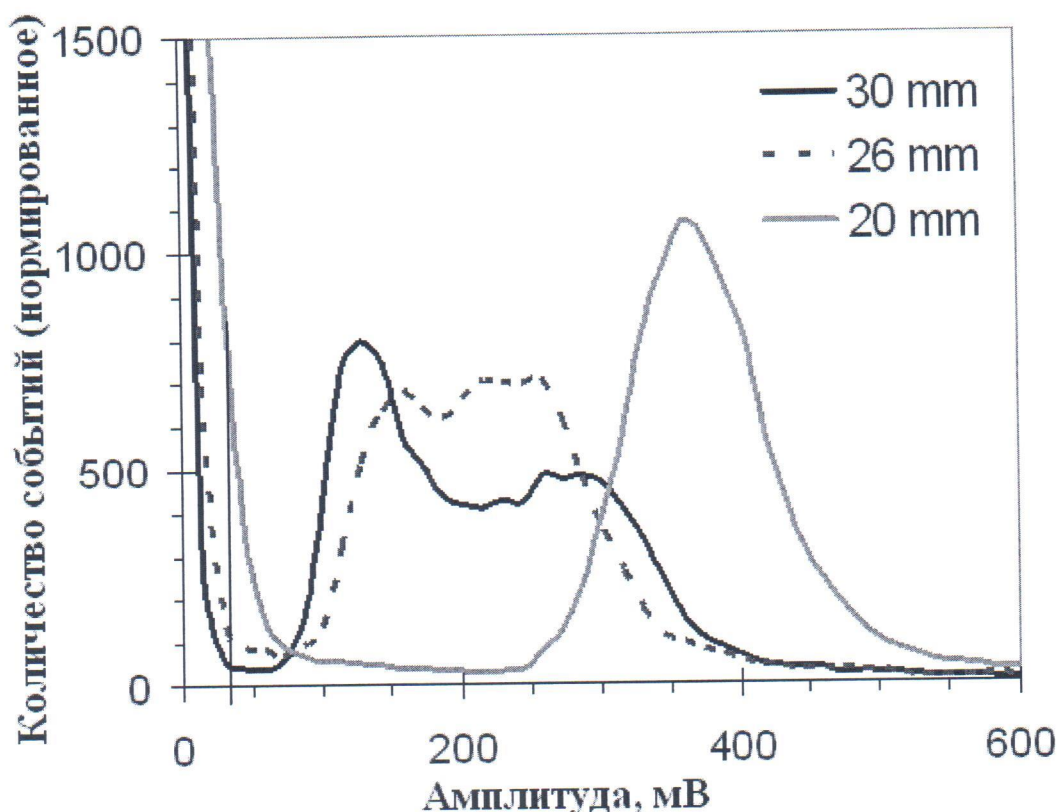


Рис. 2.21. Амплитудные спектры, полученные при облучении детектора равномерным пучком частиц для радиаторов трёх различных диаметров.

На рис. 2.22 представлены результаты расчётов методом Монте-Карло для диаметра радиатора в 30 мм. Значительное уменьшение количества фотоэлектронов (амплитуд) в этом случае было вызвано тем, что значительная часть частиц, проходящих вдали от оси радиатора, создает световую вспышку существенно меньшую, чем частица, пролетающая вблизи оси. Из-за этого в амплитудном спектре (рис. 2.22) возникает характерная двугорбость, которая исчезает в случае, когда диаметр фотокатода равен диаметру радиатора. Кроме того, в радиаторе с Ø30 см для частиц, проходящих вблизи оси, возникает «слепая» зона, составляющая около 1/3 длины радиатора, свет из которой не попадает на фотокатод даже для частиц, проходящих вдоль центральной оси радиатора, и максимальное число фотоэлектронов составляет всего 240 штук.

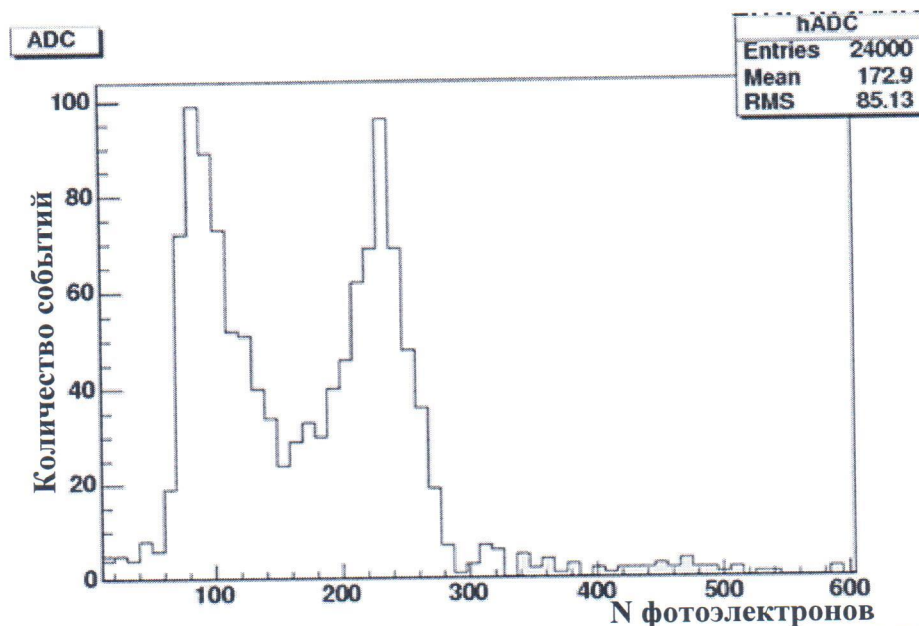


Рис. 2.22. Распределение количества фотоэлектронов в ФЭУ с радиатором диаметром 30 мм.

На рис. 2.23 представлено распределение количества фотоэлектронов для диаметра радиатора 20 мм, т.е. когда диаметр фотокатода равен диаметру радиатора. «Слепой» зоны в этом случае нет, поэтому светосбор больше на $1/3$, чем при $\varnothing 30$ см и число конверсионных фотоэлектронов составляет около 350 штук.

Всё это тщательно проверялось на ранних стадиях моделирования и опубликовано в соответствующих работах и статьях.

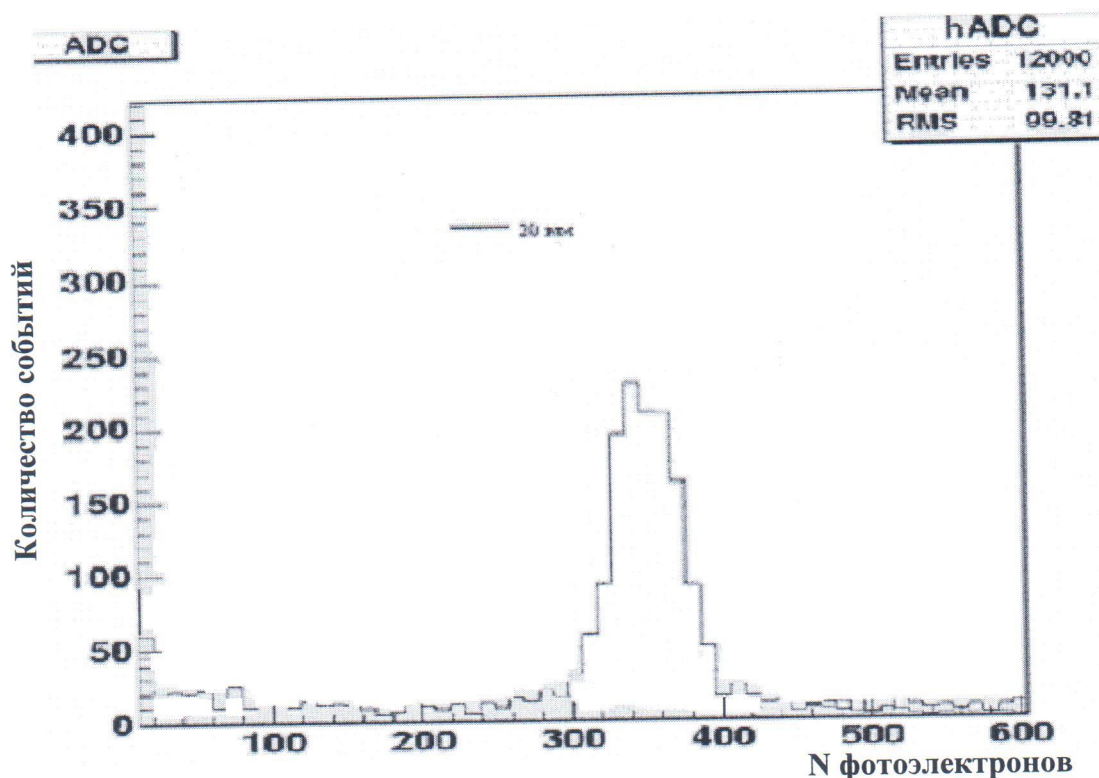


Рис. 2.23. Распределение количества фотоэлектронов в одном ФЭУ для диаметра радиатора 20 мм.

В нашем случае используется ФЭУ с кварцевым окном, имеющим спектральную чувствительность от 200 до 550 нм. Среднее число фотонов, излучаемых на 1 см пути заряженной частицы определяется выражением:

$$N_{\phi} = 2\pi\alpha(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)\sin^2\theta \quad (1)$$

где α - постоянная тонкой структуры;

λ_1, λ_2 - границы спектрального диапазона в длинах волн (нм);

θ - угол черенковского излучения,

Для плавленого кварца коэффициент преломления $n = 1,458$, $\cos \theta = 1/n = 0,686$; а $\sin^2\theta = 0,53$.

Проведя аналитические вычисления по формуле (1) в данном диапазоне (от 200 до 550 нм), расчёт дал 770 фотонов на 1 см длины. 3 сантиметра кварцевого радиатора дадут $770 \cdot 3 = 2310$ фотонов. Для черенковского фотона, попавшего на фотокатод, квантовая эффективность конверсии в фотоэлектрон составляет $\eta \sim 15\%$. Среднее число конверсионных фотоэлектронов определяется по формуле:

$$N_{\phi.э.} = \eta N_{\phi}, \quad (2)$$

и составляет 345 штук.

Расчёты, проведённые методом Монте-Карло для диаметра радиатора в 20 мм (рис. 2.23), дают 350 фотоэлектронов. Таким образом, аналитически полученный результат согласуется с тем, что получено при моделировании – следовательно, результатам, даваемых Pythia, можно доверять.

Моделирование хорошо воспроизводит все основные черты экспериментальных распределений, однако существует небольшое различие,

которое с одной стороны объясняется тем, что реальный пучок имеет некоторую, к сожалению, не известную нам, расходимость (т.е. траектории частиц не всегда параллельны центральной оси счётчика). С другой стороны, экспериментальные распределения гораздо более сглажены, т.к. в моделировании не учитывалось собственное амплитудное разрешение ФЭУ, обусловленное неравномерностью чувствительности фотокатода.

Со всех практических точек зрения радиатор диаметром 20 мм оказался наиболее оптимальным. Однако уменьшение диаметра радиатора приводит к уменьшению вероятности регистрации событий с малой множественностью.

2.3. Расчёт временных характеристик и вероятности выработки триггерных сигналов детектором T0.

При проведении расчётов вероятности выработки триггерных сигналов, т.е. вероятности срабатывания одновременно двух сборок (T0-A и T0-C) детектора в совпадении, перед автором стояло несколько задач:

1. Прodelать расчёты с учётом фонового излучения, возникающего от взаимодействия вторичных частиц с вакуумной трубой ускорителя и влияния сильного магнитного поля. Проведённые методом Монте-Карло расчёты, в виду важности их значения, неоднократно повторялись независимо А. Маевской, А. Рахмановым и А. Богдановым [106]. Результаты независимых расчётов хорошо согласуются между собой.

2. Исследовать возможность улучшения временного разрешения для основного сигнала «T0» при применении метода усреднения временных интервалов сигналов.

3. Рассчитать и проанализировать, как изменится вероятность выработки триггерных сигналов детектором, если хотя бы один из черенковских счётчиков в сборках T0-C или T0-A выйдет из строя (если выйдут из строя до 25 % счётчиков).

Для определения вероятности выработки триггерных сигналов детектором необходимо было промоделировать функцию отклика черенковского детектора (амплитудное распределение сигналов на выходе черенковских счётчиков). Под вероятностью выработки триггерных сигналов детектором понимается вероятность того, что частица не только попадет в детектор, но и создаст в нём сигнал, превышающий некоторый порог. При расчётах вероятности значение порога бралось из результатов калибровки и составляло 50 фотоэлектронов.

Автором проводилось моделирование функции отклика детектора T0 при работе на протонах. В расчётах, проделанных автором, было учтено фоновое излучение, возникающее при взаимодействии вторичных частиц с вакуумной трубой ускорителя, а также при моделировании учитывалось влияние магнитного поля. Результаты моделирования приведены ниже.

Моделирование проводилось при таких установках генератора:

```
[aliroot] AliSimulation sim
[aliroot] sim.SetWriteRawData("ALL")
[aliroot] sim.Run (10 000)
```

т.е. со статистикой в 10 000 событий и был установлен порог регистрации детектором событий, равный 50 фотоэлектронам.

На рис. 2.31 представлено полученное автором распределение событий по множественности, для всех даваемых Pythia событий (светлое) и зарегистрированные в двух сборках детектора T0 (тёмное). Эти расчёты очень важны с точки зрения определения множественности события, т. к. показания других детекторов (в частности детектора множественности FMD) должны быть поправлены на вероятность выработки основного триггерного сигнала при данной множественности. Насколько Pythia даёт правильное распределение по множественности? — остаётся под вопросом. Реально, распределение по множественности можно получить с помощью детектора FMD, а на настоящий момент в руках пока только модели.

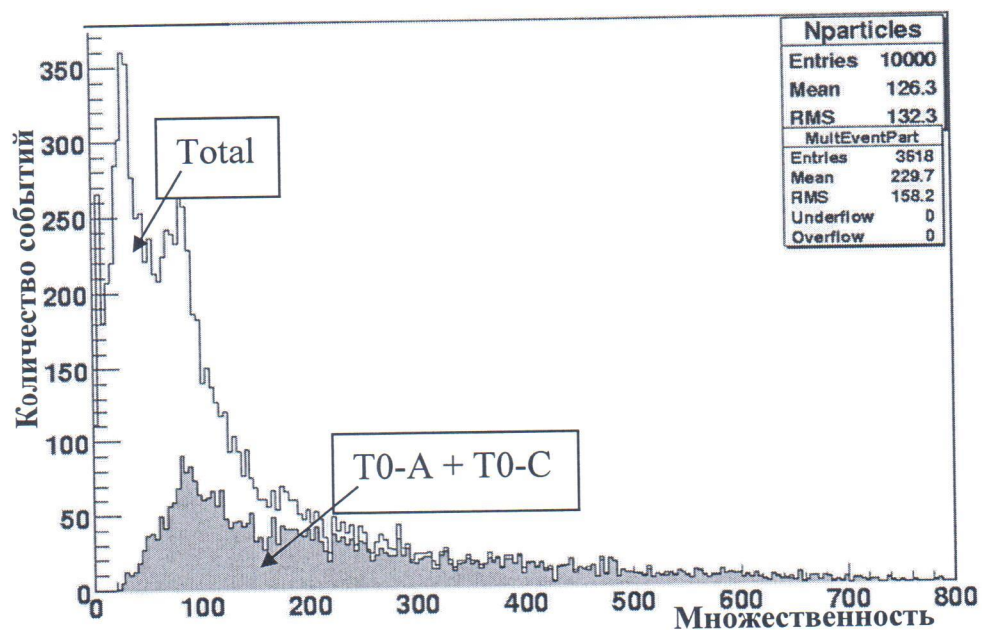


Рис. 2.31. Распределение событий по множественности, даваемые Pythia и зарегистрированные одновременно в двух сборках (при совпадении сигналов) детектора. Светлое распределение - все события, тёмное - зарегистрированное детектором T0 с учётом установленного порога в 50 фотоэлектронов.

Расчёт вероятности регистрации частиц детектором T0.

В процессе моделирования проводился расчёт вероятности регистрации вторичных частиц детектором T0, возникающих в результате протон - протонных столкновений: только дальней сборкой T0-A, только ближней сборкой T0-C, ближней и дальней сборками одновременно (совпадение). Целью

данных исследований являлось определить вероятность выработки триггерных сигналов детектором T0 в протон - протонных взаимодействиях. В таблице 2.31 представлена средняя вероятность выработки триггерных сигналов, т.е. вероятность, усреднённая по всем значениям возможной множественности вторичных частиц (независимо от множественности в конкретном событии).

Таблица 2.31.

	Ближняя к точке столкновения сборка T0-C	Дальняя от точки столкновения сборка T0-A	Совпадение в двух сборках
Вероятность с учётом фона	59 %	48 %	36 %

Из результатов расчёта следует, что вероятность регистрации частиц дальней сборки меньше, чем ближней.

В данных таблицы 2.31 представлена средняя вероятность регистрации частиц детектором T0, но представляет также большой интерес вероятность регистрации частиц при конкретной множественности (дифференциальная) при регистрации события двумя сборками детектора (при совпадении сигналов). На рис. 2.32 представлена зависимость вероятности регистрации частиц детектором T0 от множественности.

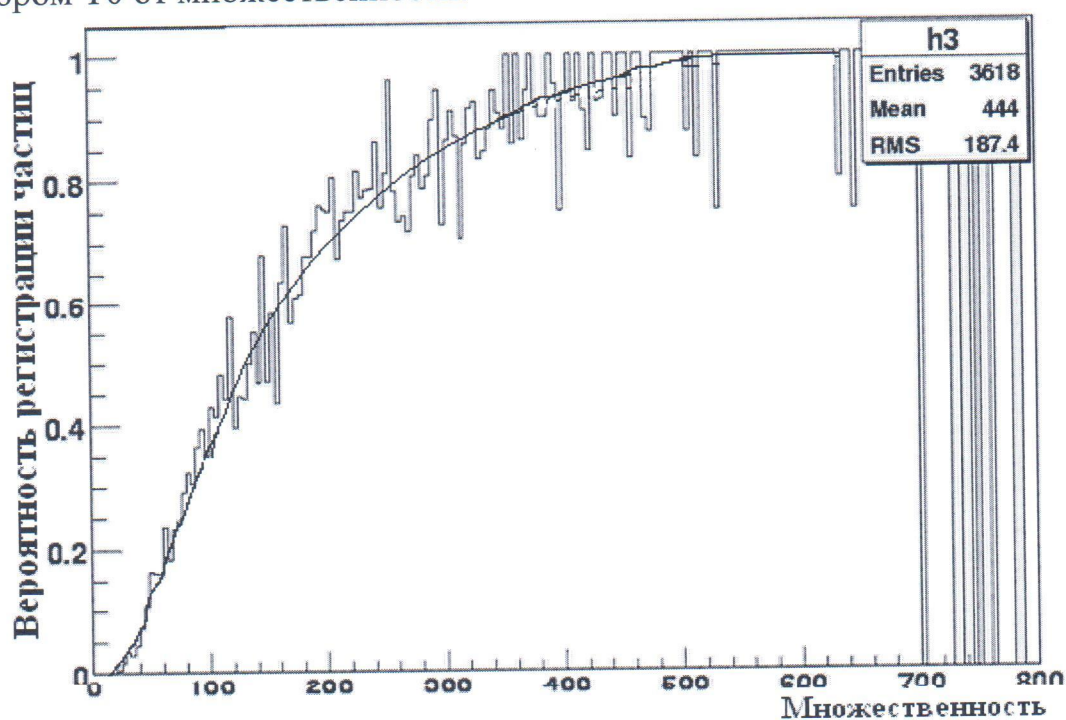


Рис. 2.32. Зависимость вероятности регистрации частиц детектором T0 от множественности.

Для решения задачи по расчёту вероятности регистрации частиц детектором T0, если хотя бы один счётчик выйдет из строя (или в различных комбинациях, например: 2 детектора из T0-A и 4 - из T0-C, 3 - из T0-A и 3 - из

T0-C, 4 - из T0-A и 2 - из T0-C и т.д.), были проделаны многочисленные вычисления, которые более подробно представлены ниже.

В таблице 2.32 представлены вероятности для различных комбинаций неработающих черенковских счётчиков.

Таблица 2.32.

Исключенные детекторы	Вероятность при совпадении, [%]	Только T0-A, [%]	Только T0-C, [%]
1 T0-A+5 T0-C	29,4	46,5	47,2
2 T0-A+4 T0-C	29,4	44,1	49,9
3 T0-A+3 T0-C	29,3	41,9	52,7
4 T0-A+2 T0-C	28,8	39,2	55,0
5 T0-A+1 T0-C	27,4	36,2	56,9

Рассматривалась ситуация, если выйдут из строя по той или иной причине до шести счётчиков в T0-A сборке, притом, что в сборке T0-C останутся действующими все двенадцать черенковских детекторов (см. рис. 2.33(а)). На рис. 2.33 (б) представлено падение вероятности регистрации частиц ближней сборкой для случая, если будут выходить из строя только счётчики из T0-C сборки).

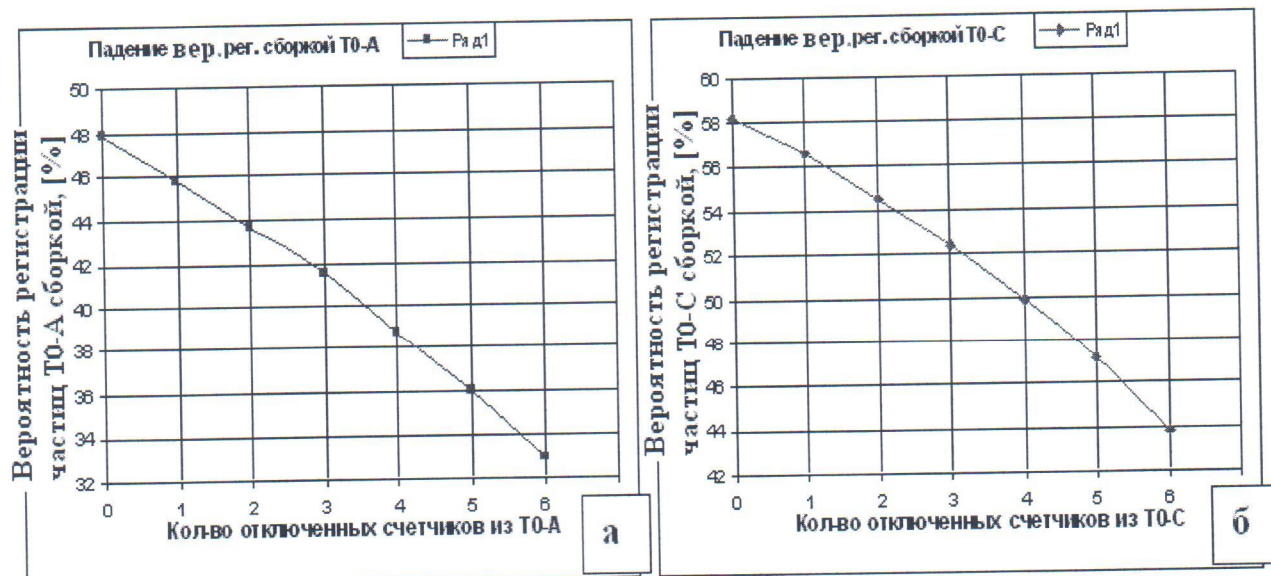


Рис. 2.33 (а,б). Зависимость вероятности регистрации частиц от количества отключённых черенковских счётчиков: (а)-падение вероятности регистрации частиц дальней сборкой для случая, когда будут выходить из строя только счётчики из T0-A, (б) - падение вероятности регистрации частиц ближней сборкой для случая, когда будут выходить из строя только счётчики из T0-C.

На рис. 2.34 представлены зависимости вероятности регистрации вторичных частиц детектором T0 от количества отключённых черенковских счётчиков: ромбиками показано падение вероятности для случая, когда будут выходить из строя только счётчики из ближней T0-C сборки, треугольниками

показано падение вероятности для случая, когда будут выходить из строя только счётчики из дальней Т0-А сборки.



Рис. 2.34. Зависимость вероятности регистрации вторичных частиц детектором Т0 от количества отключённых черенковских счётчиков.

Из полученных результатов расчёта следует, что общая вероятность регистрации частиц детектором падает быстрее, если из строя выходят счётчики дальней сборки при всех действующих счётчиках в сборке Т0-С. Реально предсказать, какой черенковский счётчик из какой сборки выйдет из строя, невозможно. В ходе моделирования была отработана методика и программа расчётов, которая позволяет оперативно вычислить вероятность при отказах фотоумножителей, что важно в условиях отсутствия доступа в зону пучка.

Расчёт временных характеристик детектора с применением метода усреднения временных интервалов сигналов.

Исходя из требований, предъявляемых к стартовому детектору, описанных в главе 1, основной физический сигнал «Т0» должен выдаваться с точностью временной привязки не хуже 50 пс с учётом вклада всей последующей электроники. Если рассматривать в качестве основного физического сигнала «Т0» сигнал с одной из сборок Т0-А или Т0-С, то из-за разброса положения точки столкновения частиц ($\sigma = 5,6$ см) возникает неопределённость момента срабатывания детекторов в любой из двух сборок, составляющая около 200 пс (на рис. 2.35 и 2.36 для сборок Т0-С и Т0-А представлены распределения моментов регистрации частиц, пришедших первыми по времени), и необходимое временное разрешение не будет получено.

Поэтому исследовалась возможность улучшения временного разрешения для основного сигнала «Т0» при применении метода усреднения временных интервалов сигналов (время - координатной компенсации - ВКК). Этот метод

применим только в случае релятивистских частиц (т.е. когда скорость частиц $V=c$ - скорости света).

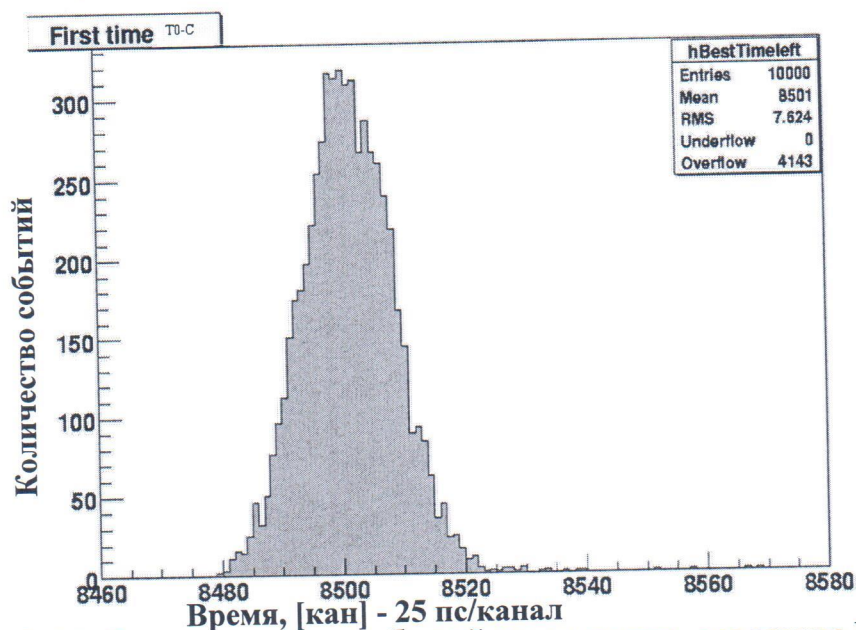


Рис. 2.35. Распределение событий по времени, даваемые Pythia зарегистрированные ближней сборкой детектора с учётом разброса вершины столкновения (5,6 см).

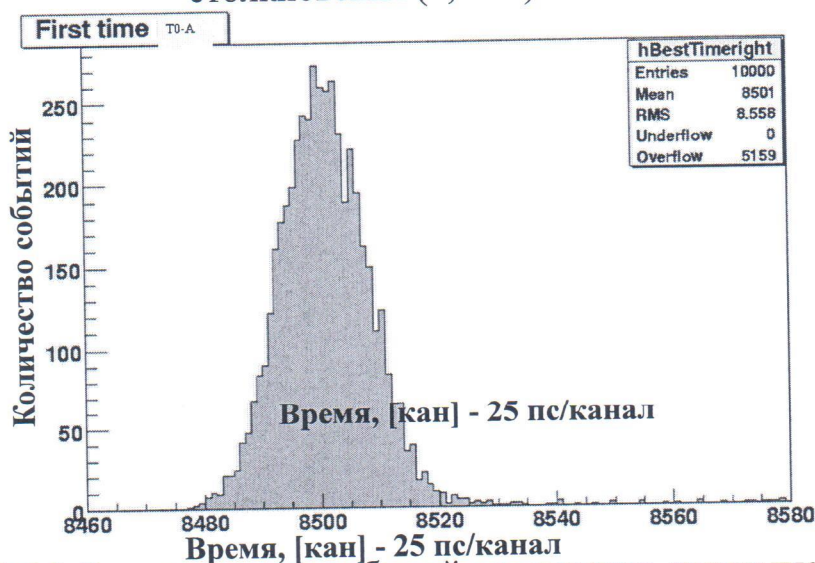


Рис. 2.36. Распределение событий по времени, даваемые Pythia зарегистрированные дальней сборкой с учётом разброса вершины столкновения (5,6 см).

При моделировании применялся метод усреднения временных интервалов первых пришедших сигналов с T0-A и T0-C сборок. Код времени прихода сигнала с T0-A и код времени прихода сигнала с T0-C складываются, и величина $(T0_A + T0_C)/2$ в случае, когда скорости частиц равны скорости света, не зависит от положения вершины события при фиксированном расстоянии между дальней и ближней сборками.

На гистограмме рис. 2.37 построен спектр распределения во времени сигнала «T0», получаемый методом усреднения временных интервалов

сигналов. При моделировании учитывалось наилучшее полученное разрешение фотоумножителя (около 25 пс).

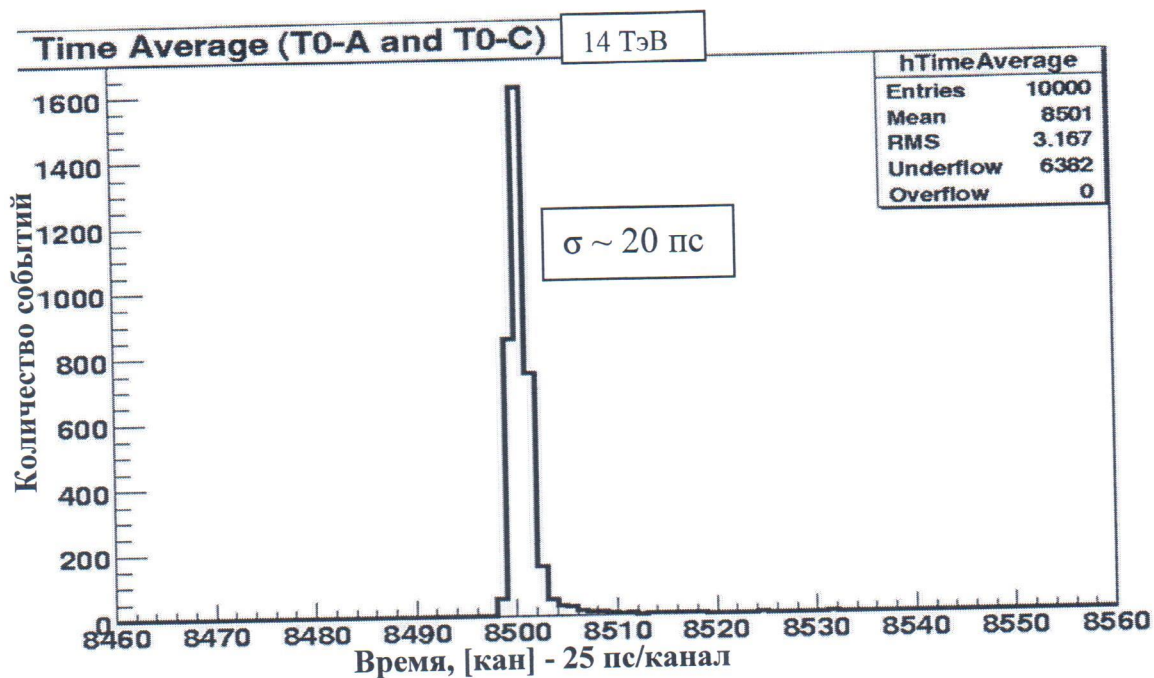


Рис. 2.37. Разброс сигнала «T0» по времени, получаемый методом усреднения временных интервалов.

Проводилось моделирование с учётом экспериментально полученного не очень хорошего временного разрешения детектора (40 пс) с применением метода усреднения временных интервалов. На рис. 2.38 представлено распределение во времени сигнала «T0», получаемое при применении метода (без учёта вклада электроники). С применением метода усреднения временных интервалов было рассчитано предполагаемое разрешение детектора в 32 пс.

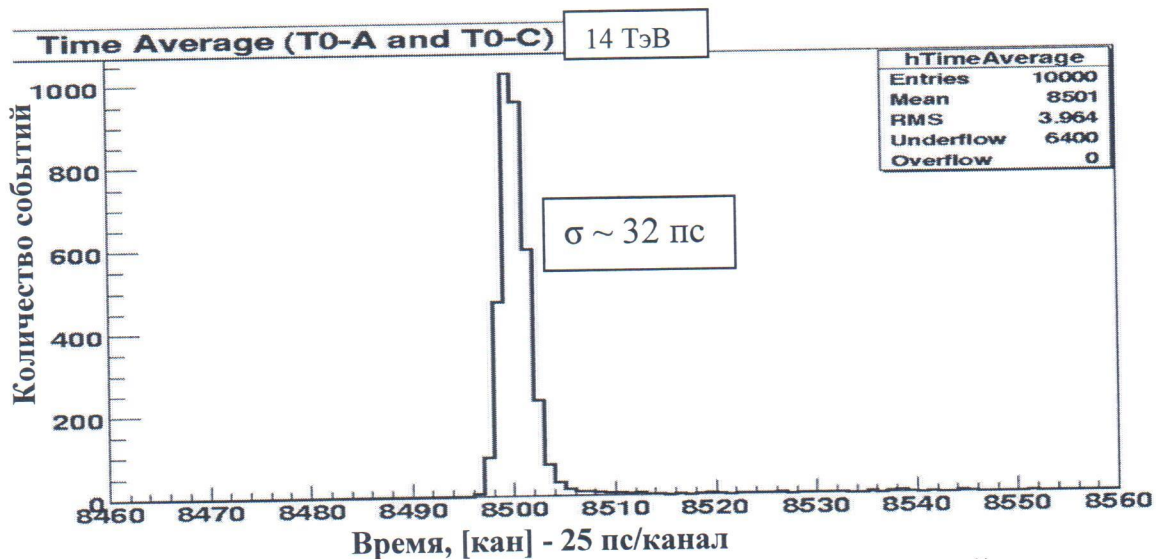


Рис. 2.38 Разброс сигнала «T0» по времени, получаемый методом усреднения временных интервалов.

Результаты моделирования показали, что в протон - протонной моде в 95% случаев первые зарегистрированные частицы практически имеют скорость

света, поэтому метод усреднения временных интервалов хорошо работает. (Метод усреднения временных интервалов был реализован в модуле «Mean Timer» (см. гл. 3)).

При большой множественности (в ион - ионных столкновениях) всегда найдутся первые релятивистские частицы. На основе выше изложенного можно сделать вывод, что необходимо отобрать первые зарегистрированные события, т. е. работать по первому из сработавших фотоумножителей. Этот метод был реализован в модуле OR (см. гл. 3).

На полную мощность, когда планируется столкновение релятивистских протонов в системе центра масс с энергией 14 ТэВ, ускоритель LHC будет выходить постепенно. Предполагается, что сначала какое-то время LHC будет работать в режимах, когда энергия протонов в с.ц.м. будет составлять 900 ГэВ и 2200 ГэВ. В ходе работы было проделано моделирование происходящих процессов для этих значений энергий. Процесс моделирования занял значительно меньше компьютерного времени, чем при 14 ТэВ. На рис. 2.39 представлены спектры распределения во времени сигнала «T0», получаемые методом усреднения временных интервалов. При моделировании в одном случае учитывалось наилучшее (около 25 пс) полученное разрешение ФЭУ рис. 2.39 (а), и с не очень хорошим разрешением (40 пс) (рис. 2.39 б). В целом при моделировании столкновения протонов с энергией 2200 ГэВ (рис. 2.39) и 900 ГэВ в с.ц.м. получены распределения во времени сигнала T0 аналогичные тем, что и при 14 ТэВ (рис. 2.37, 2.38). Гистограммы, построенные для меньших значений энергии, практически не отличаются от приведенных на рис. 2.37, 2.38 — это говорит о том, что скорость самых быстрых первых зарегистрированных детектором частиц при энергии 2200 ГэВ и при 14 ТэВ равна скорости света.

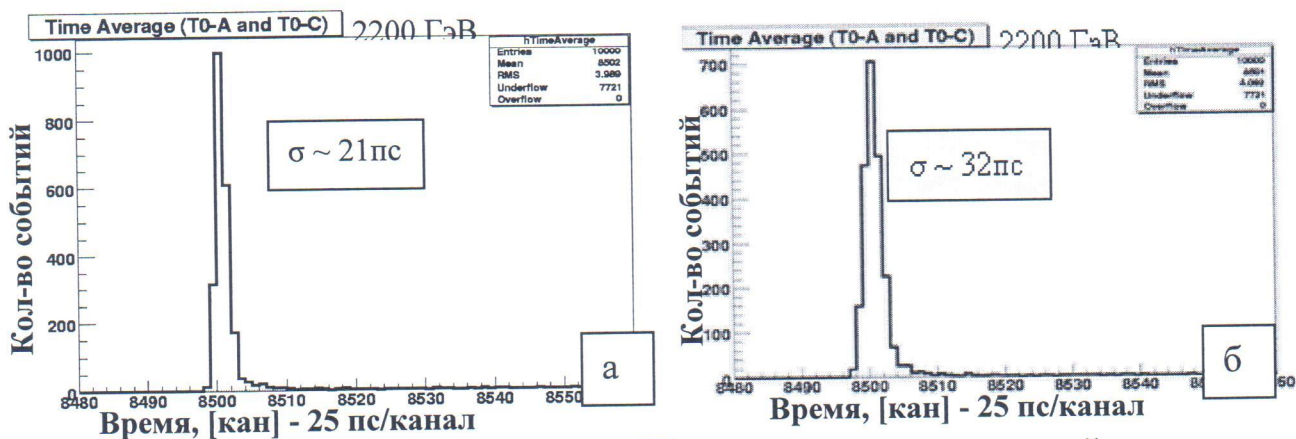


Рис. 2.39. Разброс сигнала «T0» по времени, получаемый методом усреднения временных интервалов.

Выводы к главе 2.

Из полученных результатов следуют три основных вывода:

1) Действительно, скорости частиц, пришедших на детекторы первыми, практически равны скорости света.

2) Усреднение временных интервалов практически полностью устраняет зависимость момента появления сигнала «T0» от координаты точки столкновения. «Хвост» распределения, создаваемый более медленными частицами, пренебрежимо мал (менее 1%).

3) Для обеспечения регистрации только первых пришедших частиц необходимо сконструировать электронный модуль, имеющий 12 входов (по числу фотоумножителей в каждой сборке) и срабатывающий от переднего фронта первого из пришедших на его входы сигналов.

ГЛАВА 3.

Методика разработки, создание и результаты испытаний электроники сбора временной и амплитудной информации детектора T0.

Геометрия и условия работы детектора T0 в коллайдерном эксперименте ALICE таковы, что первоначальная настройка и калибровка может быть проведена только с помощью импульсного лазера с малой длительностью оптического сигнала (< 100 пикосекунд). Кроме того, в процессе эксплуатации установки в течение 10 лет неизбежно возникнет необходимость подстройки детектора T0, прежде всего выравнивания задержек отдельных временных каналов, которое можно выполнить, используя только лазерную систему калибровки, структура которой будет изложена в главе 4.

Обеспечению надёжной работы детектора T0 в режиме без возможности оперативного обслуживания (из-за отсутствия доступа в зону размещения установки ALICE и front-end электроники) уделялось особое внимание.

Электронные модули аналогового преобразования дублировались, т.к. их нестабильность сильно может повлиять на результат измерения. Дублирование измерений времени и амплитуды проводилось двумя различными методиками:

- во временном канале одновременным применением CFD и LED;
- в амплитудном канале одновременным измерением амплитуды сигналов двумя методами CFD-LED и QTC.

Тем самым одновременно повышалась достоверность получаемых результатов.

Дублирование логического модуля отбора OR [107] невозможно, но предусмотрено отключение каналов, вышедших из строя по той или иной причине по магистрали VME. Однако следует отметить, что при высокой

множественности события отключение 1 - 2 каналов не существенно влияет на вероятность выработки основных триггерных сигналов детектором T0.

Возможна замена любого из блоков, находящихся вне магнита, кроме предусилителей Shoe-box. Но из-за ограниченного доступа в зону (надо останавливать эксперимент) - это крайняя мера.

Модуль «Mean Timer» - двоянный (два усреднителя временных интервалов в одном модуле), но тоже необходим доступ в зону. Однако операцию $(T0_A + T0_C)/2$ - можно осуществлять и в off-line режиме, так что и здесь имеется дублирование. Таким образом, задублирована почти вся цепь аналоговой front-end электроники.

Напомним (глава 1) согласно функциональной схеме электроники детектора T0 (рис. 1.31) от 24 ФЭУ-187 через предусилители Shoe-box идут 24 основных сигнала ФЭУ, несущих как временную, так и амплитудную информацию, разбитую на T0-A и T0-C части по 12 сигналов в каждой. Соответственно имеется два идентичных амплитудно-временных канала, принимающих по 12 сигналов ФЭУ. На рис. 3.10 приводится функциональная схема одного временного и одного амплитудного канала. Рассмотрим одну из ветвей: 12 сигналов поступают на 3 четырёхходовых разветвителя FANOUT, на каждом из выходов которого на один входной сигнал выдаётся четыре выходных сигнала. Один сигнал поступает на CFD 454 [90], второй - на формирователь с постоянным порогом (ФПП) LED (Leading Edge Discriminator) V895 [91], третий - на модуль MPD [108], четвёртый - на преобразователь заряд-время QTC. Далее каждый сигнал с CFD поступает на один из входов четырёхходовой линии задержки с цифровым управлением - модуль DCDL-4 [92]. Он служит для того, чтобы обеспечивать приход 12 сигналов с T0-A (или T0-C) сборки фотоумножителей строго одновременно с точностью 10 пс (шаг линии задержки), так как такая точность с помощью высокочастотных кабелей не может быть обеспечена.

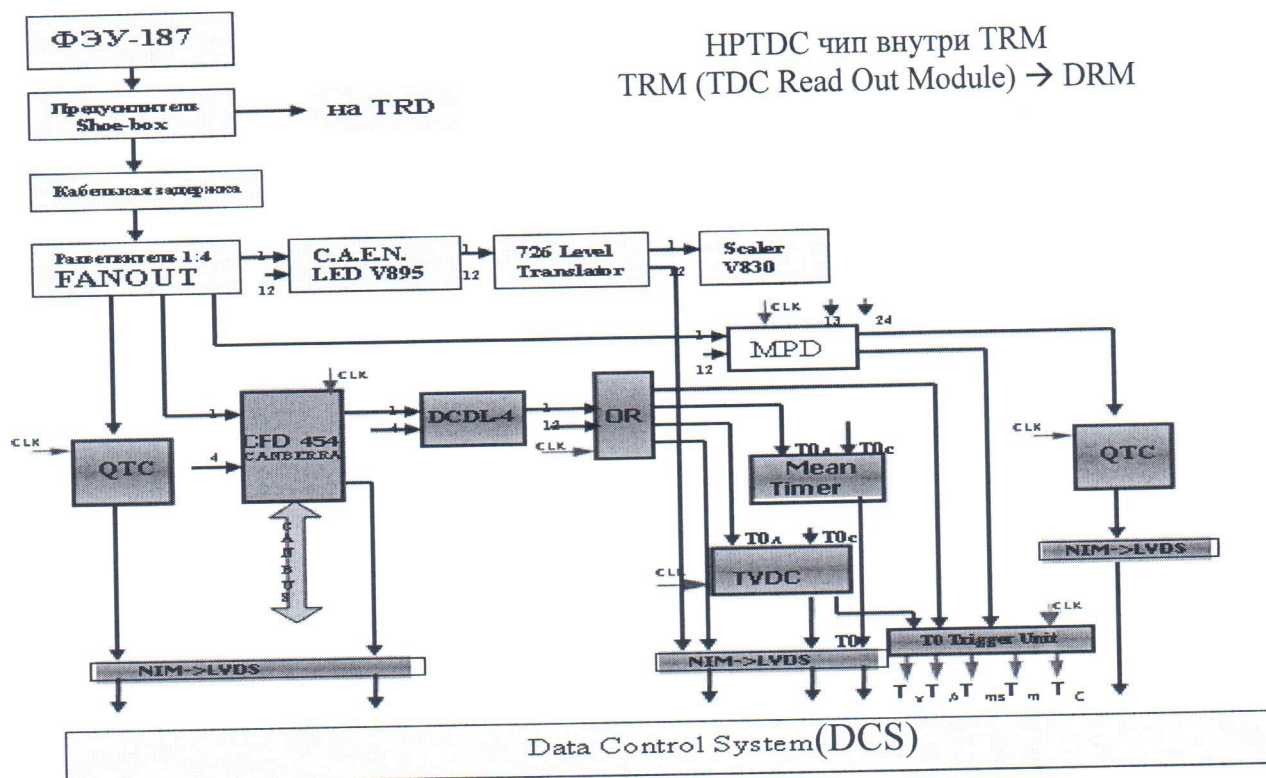
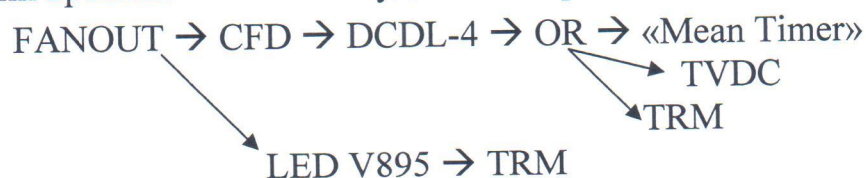


Рис. 3.10. Функциональная схема временного и амплитудного каналов.

В задачу данной работы входило следующее: разработка схемотехнических решений, изготовление, настройка и тестирование отдельных субнаносекундных электронных модулей и методика настройки основной цепи временных и амплитудных измерений.



Отметим, что для надёжности получения информации и последующей возможности обработки сигналов off-line все 24 сигнала с CFD через преобразователи NIM-LVDS подаются на TRM (TDC Read Out Module) [86, 87]. Также прямо на модуль считывания информации - TRM подаются сигналы с выходов формирователей с постоянным порогом - модули C.A.E.N. LED V895 с преобразователем 726 Level Translator. Это позволяет кодировать амплитуду сигналов методом преобразования во временной интервал, что также входит в задачу настоящей диссертации. Для контроля аппаратуры применяется промышленный модуль - 32 канальный Scaler V830 фирмы C.A.E.N. [91].

Особо отметим ключевую роль модуля логического отбора сигналов OR. Его функция – выдать выходной сигнал соответствующий первому из 12 сигналов, пришедших на его входы. Это обеспечивает работу усреднителя временных интервалов - модуля «Mean Timer», выдающего сигнал временной отметки «T0», не зависящий от геометрии (вдоль оси ионопровода ускорителя) положения точки столкновения. Сигнал «T0» проходит на преобразователь уровней NIM-LVDS, выход которого подключён к модулю TRM.

Для реализации функциональной схемы (рис. 1.31) лишь некоторые модули удалось найти в номенклатуре готовых изделий, удовлетворяющие требованиям эксперимента - это блоки: формирователь со следящим порогом CFD 454 и формирователь с постоянным порогом LED V895.

Блоки MPD (Multiplicity Discriminator), TVDC (T0 Vertex Digital Converter), относящиеся к выработке триггерных сигналов, разработаны в Курчатовском институте. Модуль TVDC, реализующий функции нахождения координаты точки взаимодействия ионов (протонов) и выработки триггерного сигнала $T0_v$, если точка столкновения находится в заданной области, представляет собой субнаносекундный временной преобразователь с цифровым дискриминатором на выходе. Ниже будут детально описаны модули, связанные между собой по схеме рис. 3.10, обеспечивающие получение временной и амплитудной информации до записи в TVDC, т.е. та цепочка, которая была разработана непосредственно автором данной работы.

Предусилитель Shoe-box [108], разработанный коллегами из университета г. Юваскила, нужен, главным образом, для TRD детектора. Основной сигнал с фотоумножителя без усиления поступает на аналоговый разветвитель FANOUT.

Разработчиками модуля FANOUT из Курчатовского института была решена основная проблема – обеспечение большого (от 2 - 3 мВ до 4,5 В) динамического диапазона амплитуд.

Проведенный анализ параметров формирователей временной отметки CFD и ФПП (LED) будет представлен и обоснован в разделах 3.2 и 3.3.

3.1. Установка для настройки и тестирования электронных узлов детектора T0.

Зависимость задержки выходного сигнала от амплитуды входного сигнала и собственное временное разрешение являются основными характеристиками формирователей временной отметки. Предварительные исследования характеристик формирователей, в частности, сравнение характеристик, полученных при настройке в лаборатории и при работе на ускорителе, показали, что настройка формирователей от генератора и даже от импульсов с ФЭУ (при изменении амплитуды с помощью аттенюатора) не позволяет полностью смоделировать условия реального эксперимента, т. к. при изменении светового потока, падающего на фотоумножитель, слегка меняется форма выходного сигнала ФЭУ, к чему формирователи чрезвычайно чувствительны.

Для исследования временных характеристик формирователей в условиях, максимально приближенных к реальному эксперименту, сотрудниками нашей лаборатории была создана уникальная установка, с помощью которой можно измерять как амплитудные, так и временные параметры исследуемых электронных узлов. Блок-схема установки представлена на рис. 3.11.

Для понимания процесса калибровки и настройки формирователей ниже приведено краткое описание установки. В качестве источника света использовался полупроводниковый лазер с длительностью импульса 70 пс (на длине волны 670 нм), что близко к длительности черенковской вспышки. Полупроводниковый лазер, применяемый в установке МИФИ, имеет следующие основные характеристики:

Длина волны излучения	0,67 мкм.
Спектральная ширина линии не более	10 нм.
Диаметр выходного пучка не более	5 мм.
Минимальная расходимость пучка не более	30 угл. мин.
Линейный размер тела свечения не более	50 мкм.
Длительность импульса	70 пс.
Частота повторения	0 – 100 кГц
Энергия в импульсе	10 пДж

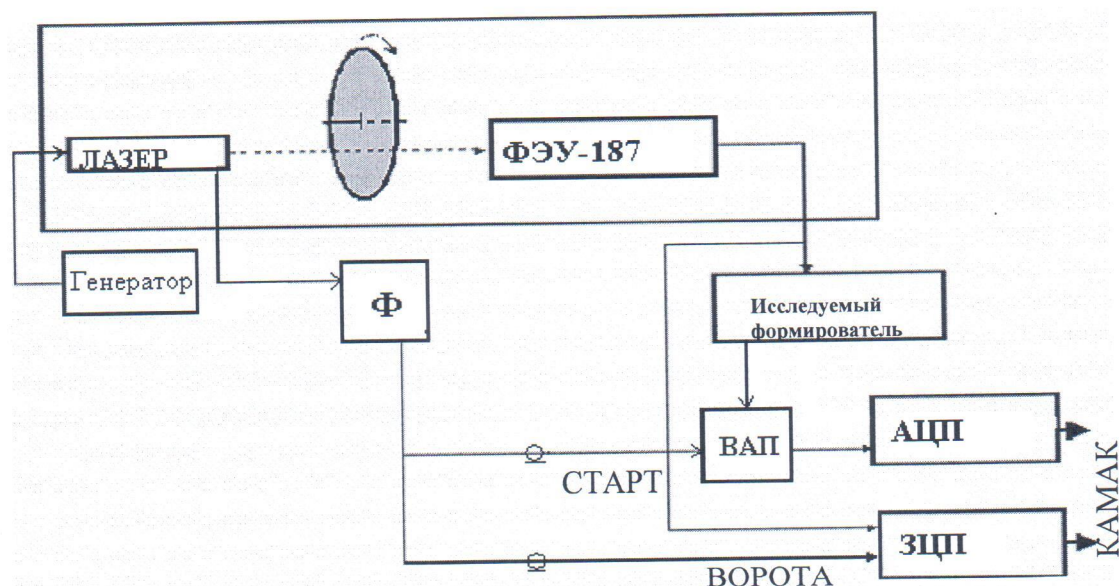


Рис. 3.11. Функциональная схема установки с импульсным лазером для калибровки фотоумножителей и испытаний электроники.

Для изменения амплитуды световых импульсов применялся нейтральный фильтр в виде вращающегося диска с переменной оптической плотностью (при вращении диска на 360° плотность изменялась в диапазоне 1:1000), соответственно изменялась и амплитуда на выходе фотоумножителя, анодные импульсы с которого подавались на вход исследуемого формирователя. В состав установки входили также необходимые электронные узлы для временного и амплитудного анализа со считыванием информации в компьютер с помощью системы КАМАК.

При вращении диска интенсивность засветки фотокатода менялась, при этом изменялась амплитуда сигнала с фотоумножителя, в то время как момент засветки фотокатода и появление импульса на выходе ФЭУ оставалось

постоянным. В установке использовался тот же тип фотоумножителя, что и в эксперименте, т.е. ФЭУ-187.

Для задания стартовой отметки использовался синхроимпульс с электронного блока лазера, который с высокой временной точностью соответствовал моменту возникновения светового импульса. С помощью этого импульса формировался сигнал «СТАРТ», поступающий на соответствующий вход время - амплитудного преобразователя (ВАП), а также формировался импульс, задающий длительность сигнала «ВОРГ» на зарядо - цифровой преобразователь (ЗЦП). В качестве ВАП использовался модуль CANBERRA 2145. Временные соотношения между сигналами устанавливались с помощью кабельных линий задержки.

Амплитуда с выхода ВАП кодировалась с помощью амплитудно-цифрового преобразователя (АЦП) - модуль Polon 712 в стандарте КАМАК. Для изменения шкалы измерения, применялся усилитель ORTEC 580, с помощью которого можно было растянуть шкалу ВАП-АЦП до пяти пикосекунд на канал.

Амплитуда ФЭУ измерялась с помощью ЗЦП (зарядо - цифровой преобразователь) LeCroy 2249A с ценой канала 0,25 пКл. Коды с АЦП и ЗЦП считывались в персональный компьютер через систему КАМАК.

С помощью описанной установки были получены двумерные спектры: по оси Y откладывалась задержка формирователя (код с ВАП + АЦП), а по оси X - амплитуда входного сигнала (код ЗЦП). Отклонение значений по оси Y от наиболее вероятного является основной характеристикой ФСП – «гулянием» задержки формирователя от амплитуды входного импульса. Разброс значений «гуляния» при данной амплитуде определяет временное разрешение системы ФЭУ совместно с формирователем. Оперативное получение данных характеристик позволило быстро тестировать и настраивать исследуемые формирователи.

В состав установки входили генератор импульсов и скомпенсированный аттенюатор, с помощью которых можно тестировать схемы традиционным способом: от импульсов с генератора, изменяя его амплитуду с помощью аттенюатора, и измеряя временные спектры в каждой точке. Применяемый аттенюатор не искажал форму импульса при его ослаблении и не изменял его задержку.

3.2. Анализ параметров формирователей временной отметки и выбор оптимальной схемы формирования.

При облучении черенковского детектора частицами высоких энергии было получено предельное разрешение 28 пикосекунд, что значительно превосходит технические требования к времяпролётной системе ALICE. Из расчётов следует, что ухудшение разрешения, связанное с каждым модулем во временном канале, должно быть около 10 - 15 пс.

К временным формирователям предъявляются следующие требования:

- динамический диапазон амплитуд сигналов должен составлять 1:200;
- «гуляние» временной отметки при этом должно быть порядка ± 30 пс;

- порог регистрации от 5 мВ.

Для выбора схемотехнического решения формирователя нами были протестированы различные формирователи со следящим порогом (ФСП). Принцип работы ФСП основан на постоянстве формы импульсов с ФЭУ, что на самом деле не обеспечивается, т.е. форма импульсов ФЭУ-187 в требуемом динамическом диапазоне амплитуд, как было выяснено позднее, не сохраняется. Лучшие параметры показал формирователь со следящим порогом CFD4000, разработанный в GSI, на его основе был создан блок в стандарте КАМАК 4-CFD, содержащий 4 формирователя, которые были доработаны исходя из требований эксперимента.

Динамический диапазон 0,1 В - 3 В, в котором «гуляние» временной отметки составило не более ± 25 пс, полученный при исследованиях в лаборатории от генератора импульсов, в реальном эксперименте на ускорителе составил всего 70 мВ - 1,5 В. Таким образом, динамический диапазон данного ФСП не обеспечивает выполнение требований, предъявляемых к детектору Т0.

Для обеспечения необходимого динамического диапазона формирователя 1:1000 В.А. Григорьевым была предложена идея применения сдвоенного формирователя временной отметки, функциональная схема которого приведена на рис. 3.21. Идея состоит в том, что для расширения динамического диапазона используются два идентичных формирователя с пороговым значением

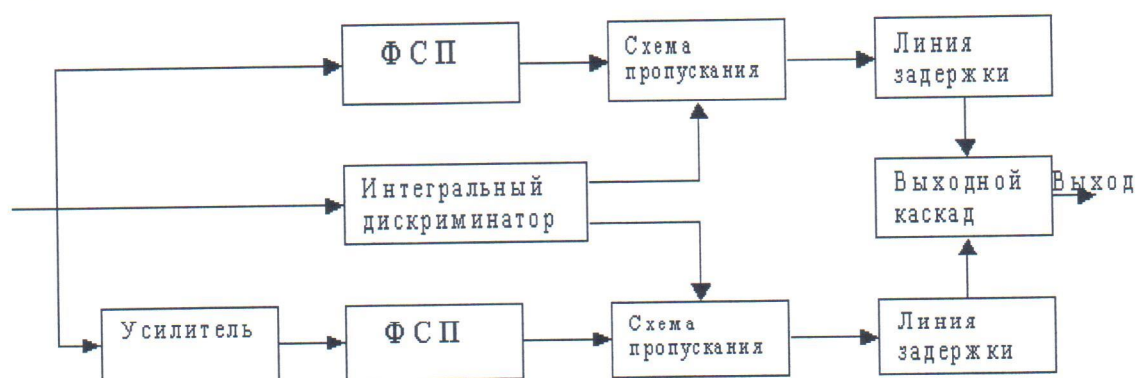


Рис. 3.21. Функциональная схема сдвоенного формирователя временной отметки.

чувствительности около 100 мВ и динамическим диапазоном 1:50 (т.е. до 5 В), работающие поочередно. На входе одного из них ставится быстрый усилитель с коэффициентом усиления 20 - 30. При малых значениях амплитуд входных сигналов (от 5 мВ) сигнал на выход через управляемые ворота поступает от того формирователя, на входе которого стоит усилитель. При амплитуде входного сигнала, превышающей 100 мВ, срабатывает управляющий дискриминатор, переключая выход на второй канал (без усилителя). Таким образом, достигается динамический диапазон 1:1000.

По этой схеме были изготовлены и настроены два экземпляра сдвоенных формирователей – один в ИЯИ с использованием оригинальных схем ФСП В. Марина, другой в университете г. Юваскила (Финляндия) с использованием

ФСП, изготовленных по традиционной схеме. Результаты испытаний в лаборатории МИФИ обоих образцов приводятся ниже.

Формирователь со следящим порогом (университет Юваскила).

Формирователь, разработанный В.Г. Ляпиным, успешно применяется во временных исследованиях с микроканальными пластинами для регистрации тяжёлых ионов. Основным отличием является схема формирования биполярного импульса, позволяющая точнее согласовать во времени основной канал регистрации и вспомогательный, задающий порог срабатывания. На рис. 3.22 представлена зависимость задержки выходного сигнала формирователя от амплитуды входного сигнала (двумерное распределение время – амплитуда). Формирователь показал хорошие параметры при регистрации больших амплитуд, но в области малых амплитуд «гуляние» увеличивается и суммарно составляет около 100 пс в динамическом диапазоне 20 мВ – 5 В. Наблюдается временной скачок, обусловленный несогласованием задержек двух внутренних формирователей. Формирователь оказался непригоден к использованию в установке ALICE.

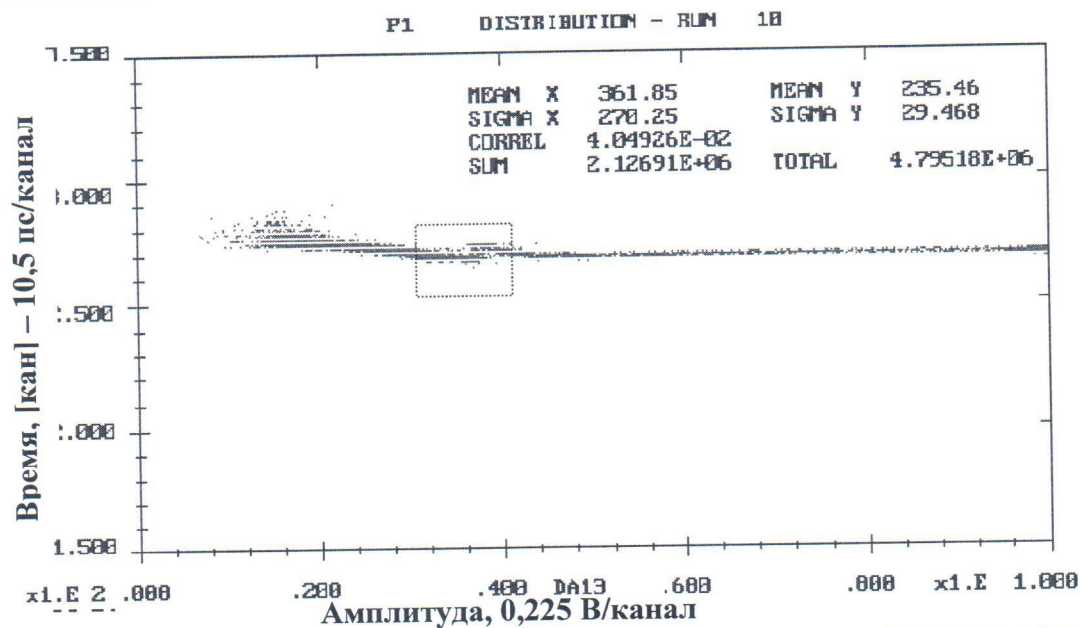


Рис. 3.22. Двумерное распределение амплитуда - время, измеренное после настройки на установке.

Формирователь со следящим порогом ИЯИ.

Формирователь, разработанный в ИЯИ, создан по оригинальной схеме, разработанной В. Мариным специально для детектора T0. Конструктивно этот формирователь более сложный, имеет большие размеры и большое энергопотребление, однако позволяет осуществлять измерения в более широком диапазоне (начиная с 5 мВ), т.е. имеет динамический диапазон амплитуд 1:1000.

На рис. 3.23 и рис. 3.24 представлены двумерные спектры время - амплитуда при регистрации импульсов с ФЭУ (использовалась система ослабления светового импульса с помощью описанного выше устройства) для

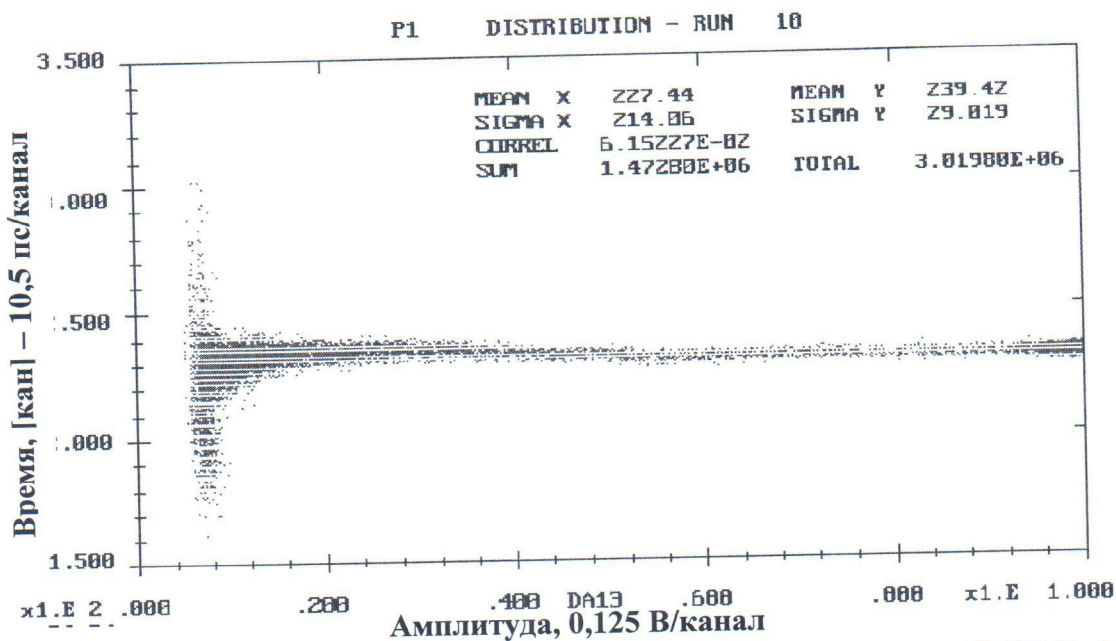


Рис. 3.23. Двумерное распределение амплитуда – время ФСП В. Марина, измеренное с помощью установки в диапазоне 3 мВ - 3 В.

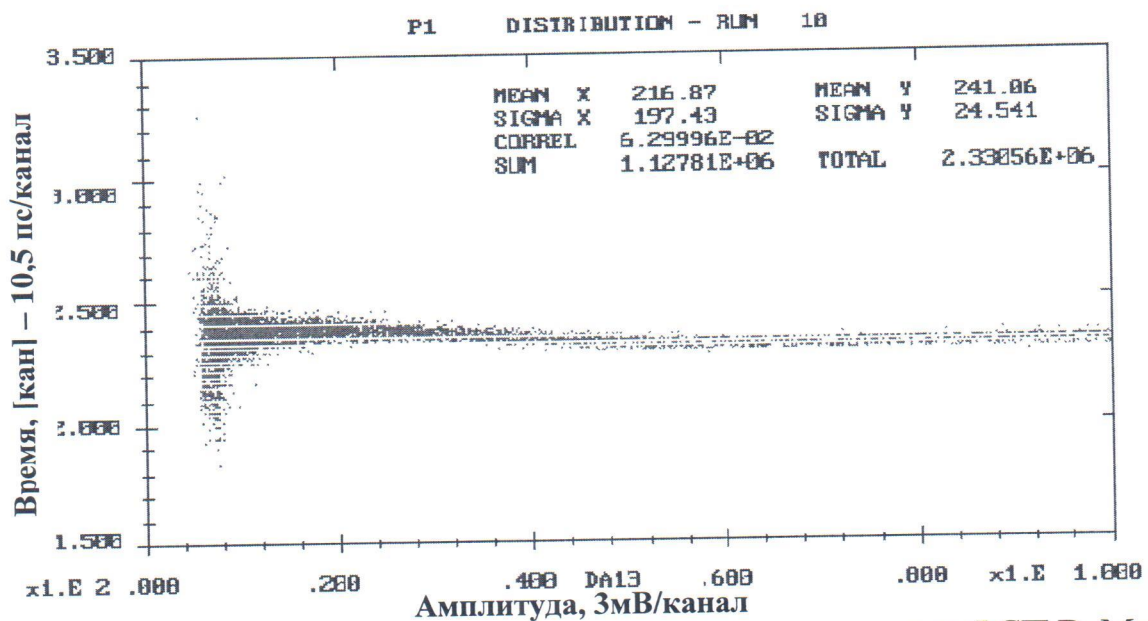


Рис. 3.24. Двумерное распределение амплитуда – время ФСП В. Марина, измеренное с помощью установки в диапазоне 3 мВ - 75 мВ.

двух диапазонов амплитуд: соответственно, 3 мВ - 3 В и 3 мВ - 75 мВ. При амплитудах входного импульса близких к порогу срабатывания наблюдается неопределённость момента срабатывания, объясняемая, по-видимому, отсутствием в схеме формирователя дополнительного канала отбора событий по амплитуде. «Гуляние» временной отметки при малых амплитудах также существенно выше необходимых ± 30 пс (рис. 3.24).

Проведенные разработки формирователей показали, что создание ФСП с требуемыми параметрами требует существенных усилий и, по видимому, займёт достаточно много времени, так как цикл изготовления каждого нового образца занимает до полугода. Другим требованием к измерению амплитуд с ФЭУ является быстродействие измерительного устройства: измерение должно

осуществляться за интервал между столкновениями пучков частиц, т.е. примерно за 25 нс в протонном режиме и 125 нс – в ионном.

В связи с выше изложенным были тщательно изучены коммерческие CFD, предлагаемые фирмами C.A.E.N., Philips Scientific, CANBERRA и LeCroy. Среди всех предлагаемых формирователей наиболее близким к нашим требованиям оказался CFD фирмы CANBERRA Model 454 Quad Constant Fraction Discriminator, функциональная схема которого представлена на рис. 3.25 со следующими характеристиками:

- динамический диапазон амплитуд 1:500;
- порог регистрации от 20 мВ (или от 5 мВ – регулируемый);
- разрешение по парным сигналам – 5 нс.

«Гуляние» временной отметки – типично не более ± 30 пс для диапазона входных амплитуд 1:100.

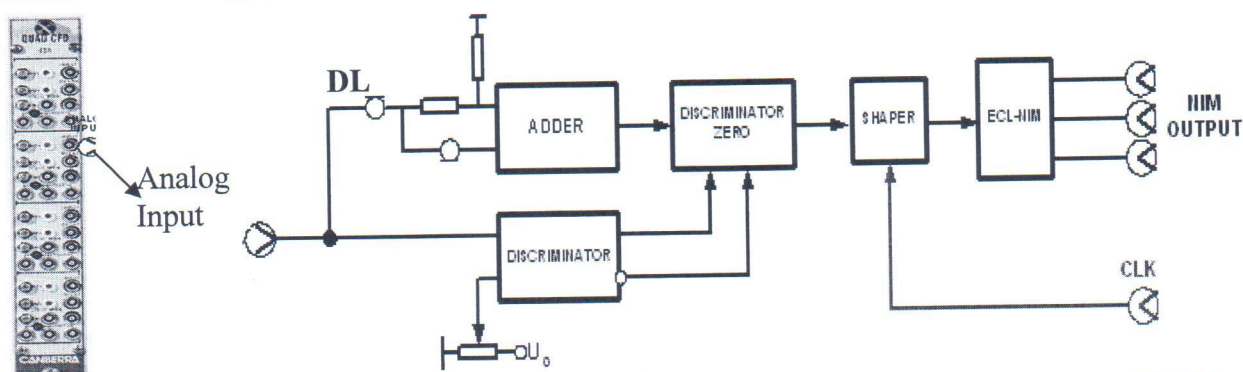


Рис. 3.25. Функциональная схема формирователя со следящим порогом CFD 454, фирмы CANBERRA.

При настройке CFD 454 под конкретный входной сигнал используется внутренняя задержка формирователя (DL), вводимая в виде кабеля. Проводились исследования характеристик формирователя для (DL) задержки в 41 см кабеля (2,05 нс) и 22 см кабеля (1,1 нс), т.е. для сигналов с ФЭУ с передним фронтом в примерно 1 нс и 2 нс. Наиболее оптимальной выбрана задержка DL в 2 нс.

На рис. 3.26 приведены характеристики CFD 454 фирмы CANBERRA (задержка срабатывания формирователя от входной амплитуды), измеренные с помощью той же установки (рис. 3.11), что и предыдущие формирователи.

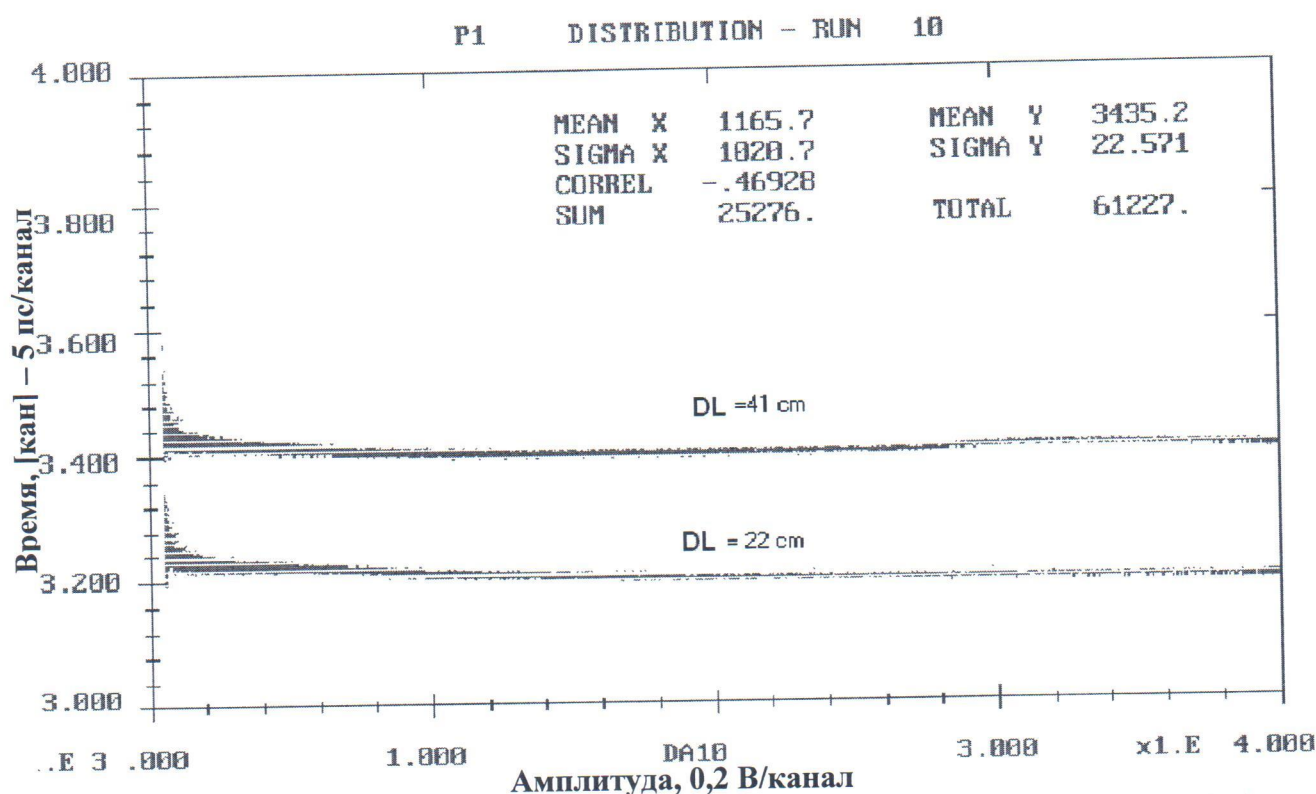


Рис. 3.26. «Гуляние» временной отметки CFD 454 в диапазоне 20 мВ - 4 В (для задержек DL в 41 см и 22 см).

В начале шкалы, при амплитудах сигналов менее 200 мВ шкала амплитуд настолько сжата, что по этому рисунку определить величину «гуляния» в этом диапазоне практически невозможно. Поэтому на рис. 3.27 приведена аналогичная характеристика в логарифмической шкале амплитуд, измеренная по несколько иной методике.

В данном случае с помощью приобретенного позднее лазерного аттенюатора интенсивность световой вспышки изменялась скачкообразно. При этом минимальная амплитуда вспышки устанавливалась равной той вспышке, которая ожидалась от черенковского счётчика при регистрации одной однозарядной релятивистской частицы (MIP – Minimum Ionizing Particle – минимально ионизирующей частицы). Амплитуда сигнала подбиралась равной 20 мВ с помощью изменения (в допустимых пределах) напряжения на фотоумножителе. Результаты представлены на рис. 3.27. Из рис. 3.27 (б) следует, что временное разрешение несколько ухудшается вблизи порога 20 мВ, и практически равно аппаратному при 10 MIP.

Следует иметь в виду, что порог регистрации сигналов, поступающих с ФЭУ, будет установлен на уровне 30 – 40 мВ. Из рис. 3.27 видно, что «гуляние» временной отметки в диапазоне 20 мВ – 3 В не превышает ± 30 пс, что, в общем, является удовлетворительным результатом для определения положения вершины события. Для времяпролетных измерений предусматривается амплитудно-временная off-line коррекция.

Для дистанционного управления порогом и контроля «гуляния» формирователя CFD 454 по согласованию с коллаборационной группой

детектора Т0 была несколько изменена его внутренняя схема. Доработка модуля проводилась в Варшавском институте. Контроль и управление порогом будет осуществляться через CANBUS и ELMB [108, 109] системой контроля, отвечающей за все установки быстрой электроники детектора.

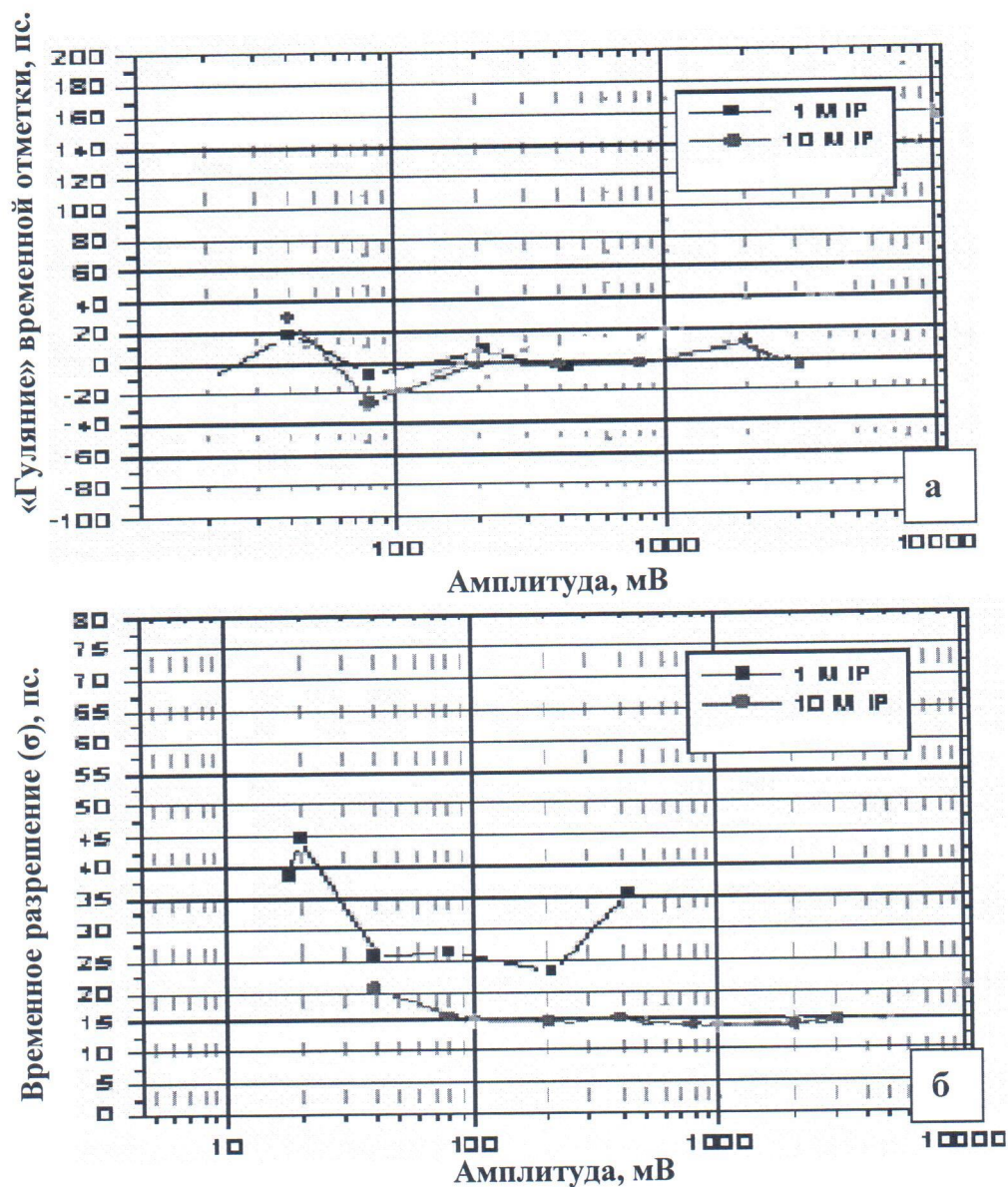


Рис. 3.27. «Гуляние» временной отметки CFD 454 (а) и временное разрешение, полученное при вспышке, эквивалентной 1 и 10 MIP (б).

Таким образом, нами был окончательно выбран CFD 454 CANBERRA, дающий удовлетворительные результаты в диапазоне 1:100 (30 мВ – 3 В). Кроме того, временные измерения одновременно дублируются быстрым дискриминатором с постоянным порогом LED V895 фирмы С.А.Е.Н. с минимально детектируемым сигналом в 5 мВ.

3.3. Разработка методики и реализация схемы измерения амплитуд сигналов методом амплитудно-временного преобразования.

Квазилогарифмический преобразователь заряд-время QTC [110], разработанный В. Мариным, позволяет измерять заряд импульсов от фотоумножителя в диапазоне амплитуд от 30 мВ до 5 В за время до 160 нс. В блоке NIM единичной ширины размещаются четыре преобразователя.

Структурная схема логарифмического преобразователя приведена на рис. 3.31. Сигнал строб подается на преобразователь уровня «nim-pecl», и далее на каскад «master strobe». С выхода этого каскада парафазный управляющий сигнал подается на аналоговый ключ. Входной аналоговый сигнал подается на логарифмический усилитель и далее поступает на каскад «current amplifier».

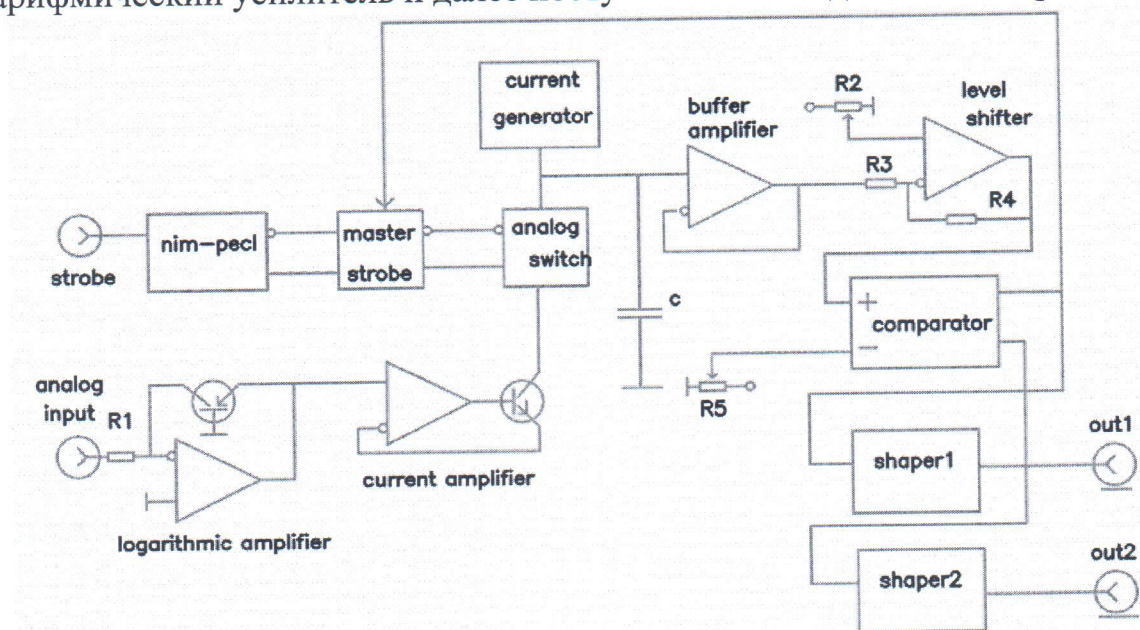


Рис. 3.31. Структурная схема преобразователя QTC.

Два выходных сигнала с QTC, интервал между которыми пропорционален заряду во входном импульсе, поступают на два входа TDC с высоким разрешением: один – на вход СТАРТ, второй – на вход СТОП. При построении характеристики преобразователя QTC для каждого события осуществляется измерение двух параметров: амплитуды, измеренной с помощью QDC (модуль LeCroy 2249A для измерения заряда), и временного интервала (связанного с амплитудой входного импульса), получаемого с помощью преобразователя QTC. На рис. 3.32. представлена типичная характеристика преобразователя QTC, зависимость временного интервала между двумя выходами преобразователя от амплитуды входных сигналов. Интервал между импульсами с QTC изменяется от 35 нс до 130 нс (измерения проводились в МИФИ).

Поскольку было принято решение о дублировании измерений в амплитудном канале одновременным применением двух методов QTC и CFD-LED, ниже будет описан предложенный автором последний.

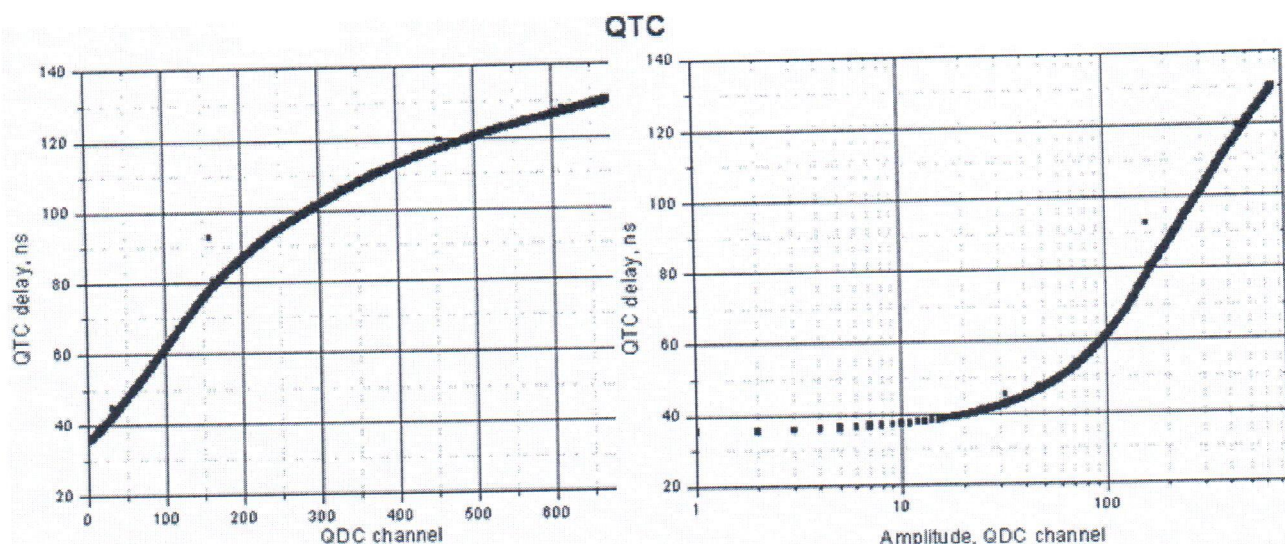


Рис. 3.32. Основная характеристика модуля QTC – зависимость временного интервала между двумя выходами преобразователя от амплитуды входных сигналов (в линейном и логарифмическом масштабе).

Метод преобразования амплитуды во время с применением формирователей со следящим и с постоянным порогом.

Метод преобразования с помощью QTC проверен неоднократно в результате калибровок. К сожалению, модуль QTC имеет время преобразования в полном диапазоне около 100 нс, что неприемлемо при регистрации протонов с периодом столкновений 25 нс. Поэтому при работе на протонах был предложен другой оригинальный метод преобразование амплитуды во время (метод измерения амплитуды сигналов CFD-LED), основанный на разности моментов срабатывания двух быстрых формирователей CFD 454 и LED (в качестве формирователя с постоянным порогом при первоначальных исследованиях применялся быстрый формирователь фирмы Phillips Scientific). Преобразование амплитуд во время производится в ограниченном динамическом диапазоне входных амплитуд, информация записывается и хранится в базе данных эксперимента. Амплитуды сигналов с фотоумножителей проверяются во всём измеряемом диапазоне для контроля детектора, но особенно важной является информация о малых амплитудах (в диапазоне от 40 мВ до 200 мВ), т.к. именно она будет использоваться для off-line амплитудно-временной коррекции (алгоритм и результаты off-line коррекции будут описаны в главе 4).

Методика быстрого преобразования амплитуды во время с помощью формирователей со следящим порогом и с постоянным порогом, предложенная автором, заключается в следующем:

CFD 454 работает с привязкой по фронту и формирует стартовый сигнал, не зависящий от амплитуды (срабатывает на уровне 0,15 - 0,2 от фронта нарастания). Время нарастания сигнала с ФЭУ-187 несколько зависит от напряжения на фотоумножителе и составляет величину около 1,5 нс. Поскольку напряжение на ФЭУ в процессе измерения меняться не будет, то и временная отметка тоже не изменится;

ФПП формирует сигнал «стоп», положение которого на временной оси сильно зависит от амплитуды входного сигнала. Рис. 3.33 иллюстрирует работу формирователей CFD и LED (ФПП).

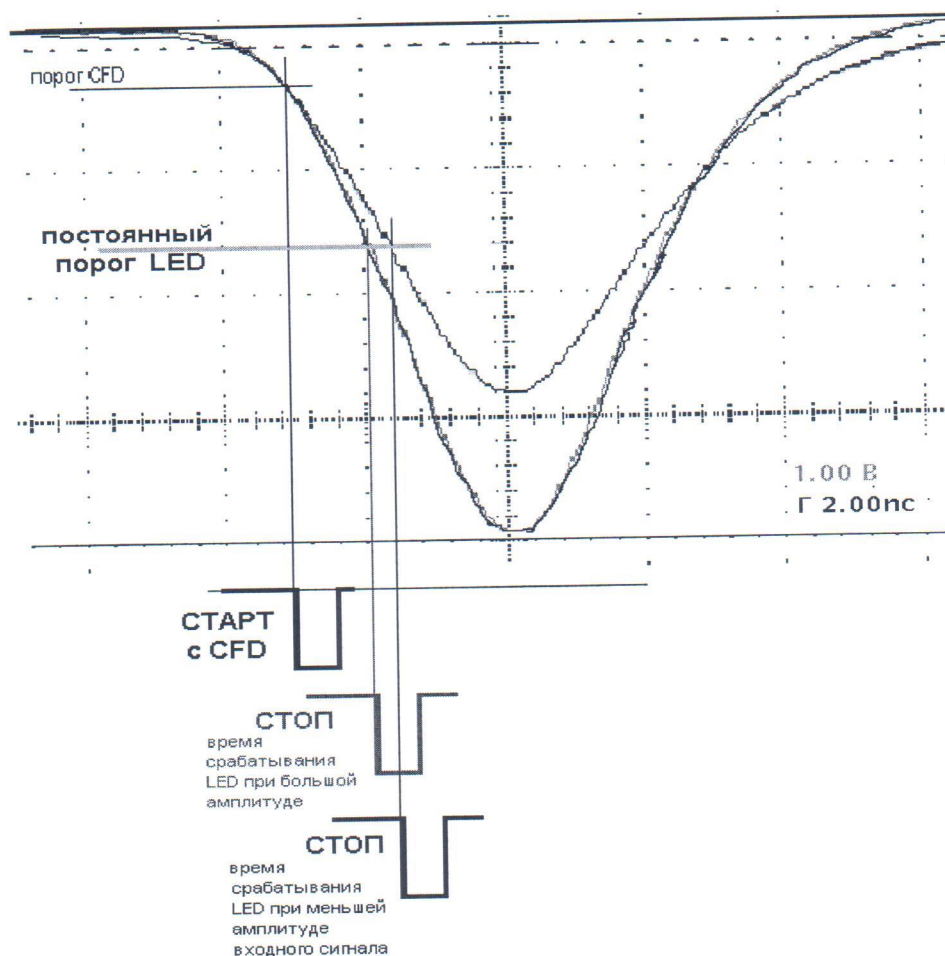


Рис. 3.33. Принцип работы формирователя со следящим порогом и с постоянным порогом.

Сигнал «стоп», поступающий с ФПП, будет «гулять», т.к. время срабатывания (задержка выходного импульса) формирователя с постоянным порогом (формирователя-дискриминатора) зависит от амплитуды входного сигнала. Разность задержек для сигналов с большой амплитудой и малой (близкой к порогу) относительно начала импульса может достигать длительности фронта входного сигнала, для ФЭУ-187 это около 1,5 нс. Измерение задержки осуществляется относительно момента срабатывания CFD 454, который слабо зависит от амплитуды (см. рис. 3.26, 3.27).

На рис. 3.34 представлена типичная зависимости задержки срабатывания формирователя с постоянным порогом (характеристика приведена для ФПП фирмы Phillips Scientific Model 708). Для формирователя с постоянным порогом получается, что чем больше амплитуда, тем меньше задержка формирователя. Измеряемый временной диапазон для малых амплитуд порядка 200 пс, а временное разрешение CFD на порядок лучше, поэтому можно считать, что измерение амплитуды осуществляется с 10 % точностью.

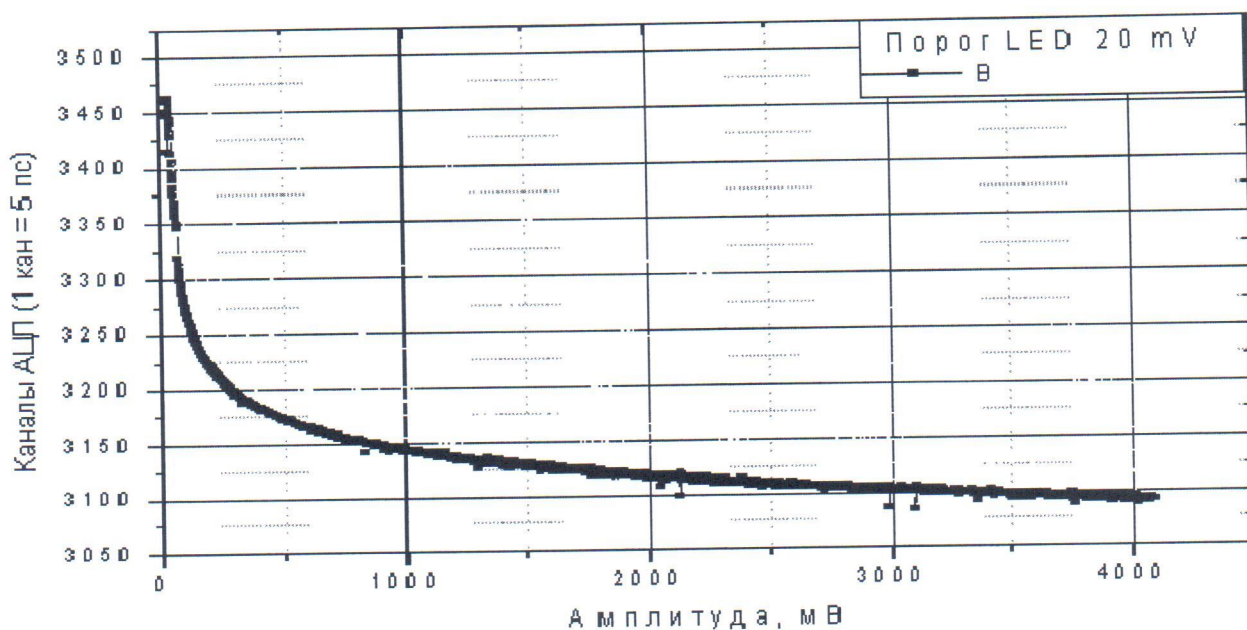


Рис. 3.34. Изменение задержки выходного сигнала формирователя с постоянным порогом от амплитуды входного сигнала для порога в 20 мВ.

Поскольку амплитудная информация нужна для: 1) контроля стабильности фотоумножителей; 2) проведения амплитудно-временной коррекции - выполнение этих задач не требует высокого амплитудного разрешения.

Восьмиканальный ФПП фирмы Phillips Scientific (Model 708), успешно используемый в лаборатории, выполнен в стандарте NIM, программно не управляемый, пороги настраиваются индивидуально для каждого канала и аппаратно, поэтому его использование в эксперименте исключено, т.к. доступа в зону расположения электроники не будет (возможно, порог срабатывания ФПП придётся изменять в процессе настройки и калибровки).

Были проведены сравнения двух методов преобразования амплитуды во временной интервал: QTC и CFD-LED (LED V 895). На рис. 3.35 приведены спектры, соответствующие регистрации 1 МР, измеренные с помощью CFD-LED при использовании лазера и на пучке частиц.

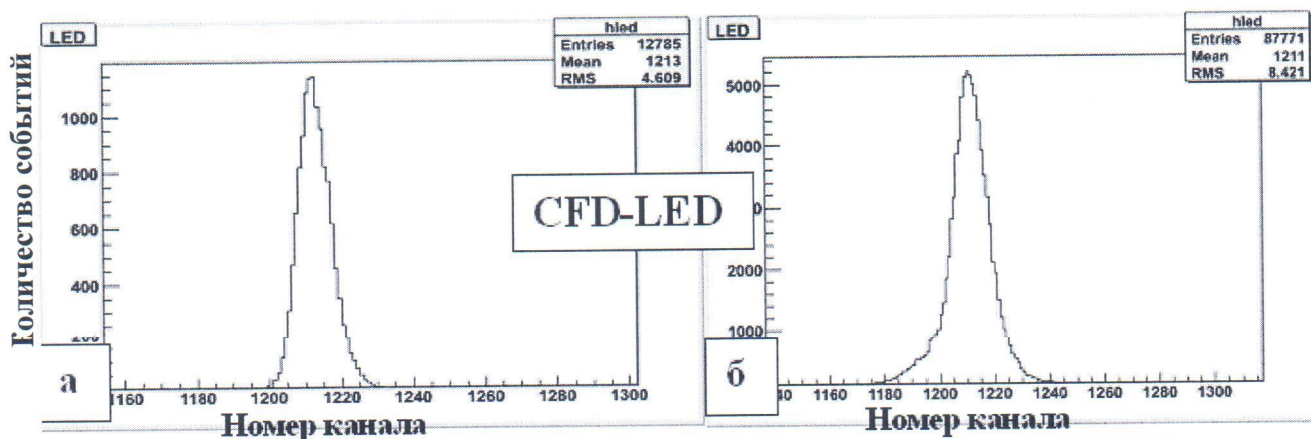


Рис. 3.35. Амплитудный спектр, измеренный с помощью CFD-LED при использовании лазера (а) и на пучке релятивистских частиц (б).

На рис. 3.36 приведены спектры для 1, 2 и 3 МІР (минимально ионизирующих частиц), измеренные методом CFD-LED. Видно хорошее разрешение с шагом в 1 частицу. Таким образом, в области малых амплитуд при регистрации протон - протонных событий метод преобразования CFD – LED даёт прекрасные результаты.

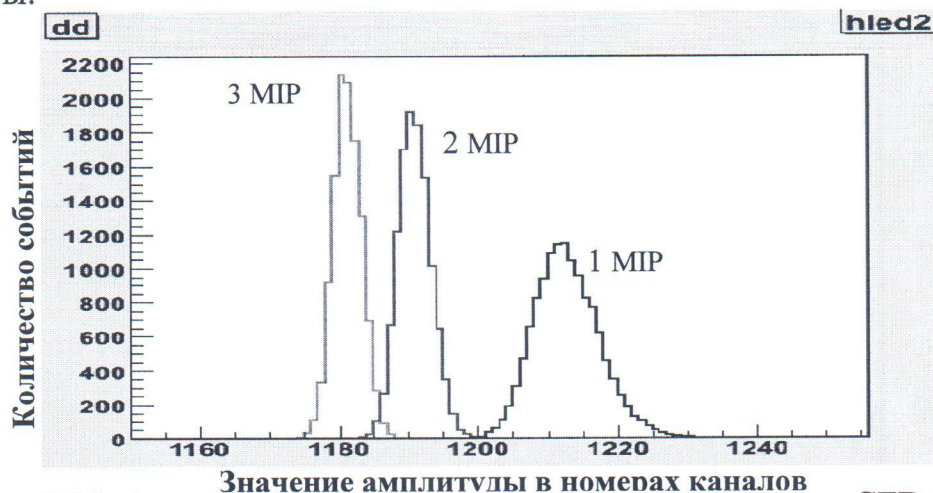


Рис. 3.36. Амплитудные спектры, полученные методом CFD-LED.

Метод CFD-LED хорошо работает при малых амплитудах (до 3 МІР). Поскольку в протон - протонной моде загрузка детектора Т0, согласно расчётам, составляет 0,3, то вероятность попадания трёх и более частиц в один фотоумножитель пренебрежимо мала.

Преимущество метода CFD-LED основанного на разности моментов срабатывания формирователей - быстрота преобразования амплитуды во временной интервал (за 1,5 - 2 нс). Введение в схему детектора одновременно двух формирователей временной отметки является оригинальным решением, позволяющим задублировать измерение сразу двух основных параметров – измерение временной отметки и измерение амплитуды сигнала с целью повышения надёжности функционирования в течение многолетнего эксперимента.

3.4. Модуль управляемых линий задержек DCDL-4.

Двадцать четыре временных канала детектора Т0 должны обеспечивать временное разрешение всей системы не хуже 50 пс в течение всего времени эксперимента (10 лет). Это требует постоянства задержек сигналов во всех временных каналах с погрешностью ± 10 пс. Неизбежное расхождение задержек в процессе эксплуатации требует их периодической корректировки с помощью управляемых цифровых линий задержек.

Обычно, если требования не слишком высокие к точности (более 100...150 пс), используются устройства задержки электрических сигналов на пассивных цепях: распределенных LC-структурах или кабельных линиях задержки. Наиболее часто в практике эксперимента используются типовые модули задержек на коаксиальных кабелях, обеспечивающие диапазон временных задержек 2...64 нс, обычно с шагом 0,5 нс. Реализация же временных задержек с шагом 10 пс таким способом практически исключена из-

за невозможности точной разделки кабельных линий и их надлежащей коммутации. Поэтому было принято решение использовать для разработки линий задержек цифровые способы. В связи с массовым распространением высокоскоростных систем цифровой связи и передачи данных возник массовый спрос на управляемые линии задержек цифровых сигналов для обеспечения надёжной синхронизации в системах связи. Ряд фирм – изготовителей электронных компонентов начали производство специализированных БИС для этих целей. Наиболее доступными изделиями в настоящее время являются БИС фирм Analog Devices, Micrel и ON Semiconductors. Анализ информации по данным компонентам показал, что наиболее удовлетворяющими поставленным требованиям являются БИС SY100EP195V(MC100EP195FA) программируемых линий задержек, выпускаемые фирмами Micrel и ON Semiconductors [111]. Наличие двух производителей позволяет обеспечить стабильность поставок этих компонентов. Поэтому для реализации модуля цифровых управляемых линий задержек и были выбраны именно эти БИС.

БИС MC100EP195V представляет собой микросхему программируемой задержки, предназначенной в основном для выравнивания фронтов синхронизирующих импульсов и подстройки временных задержек. Она обеспечивает регулируемую задержку дифференциальных входных сигналов в стандартах NECL/PECL. Блок задержек содержит программируемую матрицу вентиля и мультиплексор, как показано на рис. 3.41.

Задержка в микросхеме изменяется с помощью цифрового кода степенями по 10 пс в диапазоне до 10,2 нс. Необходимая величина задержки устанавливается по 10 входным линиям данных D[9:0] при участии управляющего сигнала LEN. Низкий уровень на входе LEN обеспечивает непосредственную передачу кода задержки в БИС по линиям D[9:0].

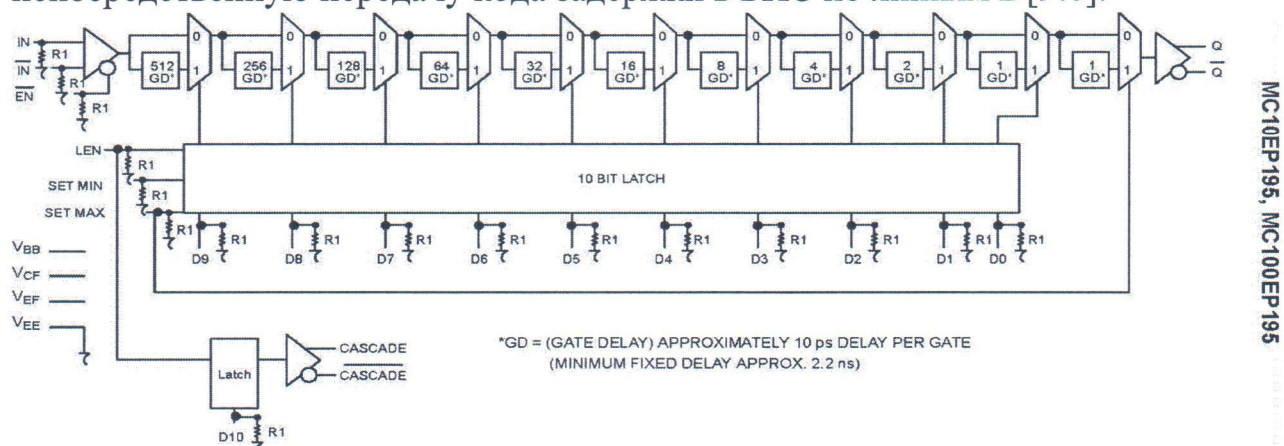


Рис. 3.41. Структурная схема БИС MC100EP195FA.

Перепад из низкого в высокий уровень по этому входу блокирует внутренний регистр кода задержки от поступления следующих кодов по линиям D[9:0]. Из-за наличия внутреннего мультиплексора БИС имеет фиксированную начальную задержку 2,4 нс. Входы данных D[9:0] могут быть запрограммированы на различные уровни входных сигналов посредством надлежащей коммутации выводов VEF и VCF микросхемы для логических уровней LVCMOS, ECL, или LVTTTL. Входные уровни данных в форматах

LVC MOS и LV TTL доступны только при работе с входными сигналами в формате PECL. Отметим, что все компоненты семейства MC100 имеют температурную компенсацию. Основные параметры БИС MC100EP195 таковы:

- максимальная частота входных сигналов - не менее 1,2 ГГц;
- программируемый диапазон задержек - от 0 нс до 10 нс;
- шаг изменения задержки - 10 пс;
- диапазон задержек - 2,4 нс12,4 нс;
- режим работы PECL: $V_{CC} = 3,0 \text{ В} \dots 3,6 \text{ В}$; $V_{EE} = 0 \text{ В}$;

В соответствии с техническими требованиями к входным и выходным сигналам модуля цифровых управляемых задержек они должны быть сформированы в логическом стандарте NIM (импульсный токовый сигнал $16 \pm 2 \text{ мА}$ на нагрузке 50 Ом). БИС MC100EP195 не поддерживает такой стандарт входных сигналов. Кроме того, необходимость внешнего управления кодами задержек через систему контроля и управления детекторами обусловила необходимость реализации в модуле какого-либо магистрального или сетевого интерфейса. Исследование возможностей применения в данной разработке различных интерфейсов (CAN 2.0В, Ethernet, IEC-625, VME, и т.д.) показало, что в данном случае наиболее оптимально применение магистрально-модульного интерфейса VME, широко распространенного в промышленности и в практике физического эксперимента. Поэтому в состав модуля задержек был включён приборный интерфейс VME, реализованный на ПЛИС (программируемой логической интегральной схеме) [112]. Структурная схема модуля задержек (1 канал) показана на рис. 3.42.



Рис. 3.42. Структурная схема модуля управляемых задержек (показан один канал модуля).

Основой модуля задержек DCDL-4, как видно из рис. 3.42, является БИС MC100EP195 и схемы трансляторов NIM – ECL и ECL – NIM для входных и выходных сигналов соответственно. Все 4 канала однотипны по схемотехнике и обслуживаются общим блоком интерфейса VME.

Был разработан прототип одного канала модуля задержек (без интерфейса VME), проведены тестовые испытания для оценки его технических параметров. Результаты испытаний подтвердили паспортные характеристики БИС MC100EP195 и были признаны удовлетворительными. Было принято решение о разработке опытного образца четырёхканального модуля цифровых

Входной сигнал в стандарте NIM поступает на преобразователь уровней NIM – ECL, реализованный на базе эмиттерного повторителя на транзисторе BFR93L, с выхода которого сигнал ECL-уровня поступает на вход БИС управляемой задержки MC100EP195. Выходной же сигнал ECL поступает на дифференциальные каскады, выполняющие функцию преобразователя уровня ECL – NIM. Управляющие цифровые коды формируются следующим образом: Так как необходима связь с интерфейсом VME, необходимо согласовать выходные уровни логических сигналов ПЛИС, реализующей этот интерфейс, с уровнями ECL. Поэтому схема согласования уровней здесь выглядит следующим образом. Выходные сигналы ПЛИС интерфейса VME с CMOS-уровнями, совместимыми с TTL-уровнями поступают в буферные регистры SN74LS173, которые активизируются сигналом выборки CS от ПЛИС VME - интерфейса, после чего в них осуществляется запись кода задержки по сигналу

WR (в соответствии с рабочей программой и протоколом VME). Выходной код с уровнями TTL поступает на ИС преобразователей уровня TTL – ECL типа MC10124, выходные сигналы которых поступают на управляющие входы данных БИС MC100EP195.

Необходимость буферных регистров обусловлена тем, что используемая для реализации интерфейса VME ПЛИС не имеет достаточного количества внешних линий ввода-вывода для организации индивидуального ввода кодов задержки в каждую БИС программируемой задержки в модуле.

Принципиальная схема интерфейса VME представлена на рис. 3.44. Кратко рассмотрим основные особенности интерфейса VME. При разработке прототипа интерфейса был выбран максимально простой вариант с минимумом необходимых функций – записи кодов задержки в буферные регистры четырёх каналов задержки и их считывания с целью контроля занесенного в регистры кода. Так как разрядность кода задержки невелика – 10 бит, и число регистров в модуле также небольшое, то в ПЛИС интерфейса реализован только вариант короткой адресации (16 бит) с использованием 16-разрядной шины данных VME-шины.

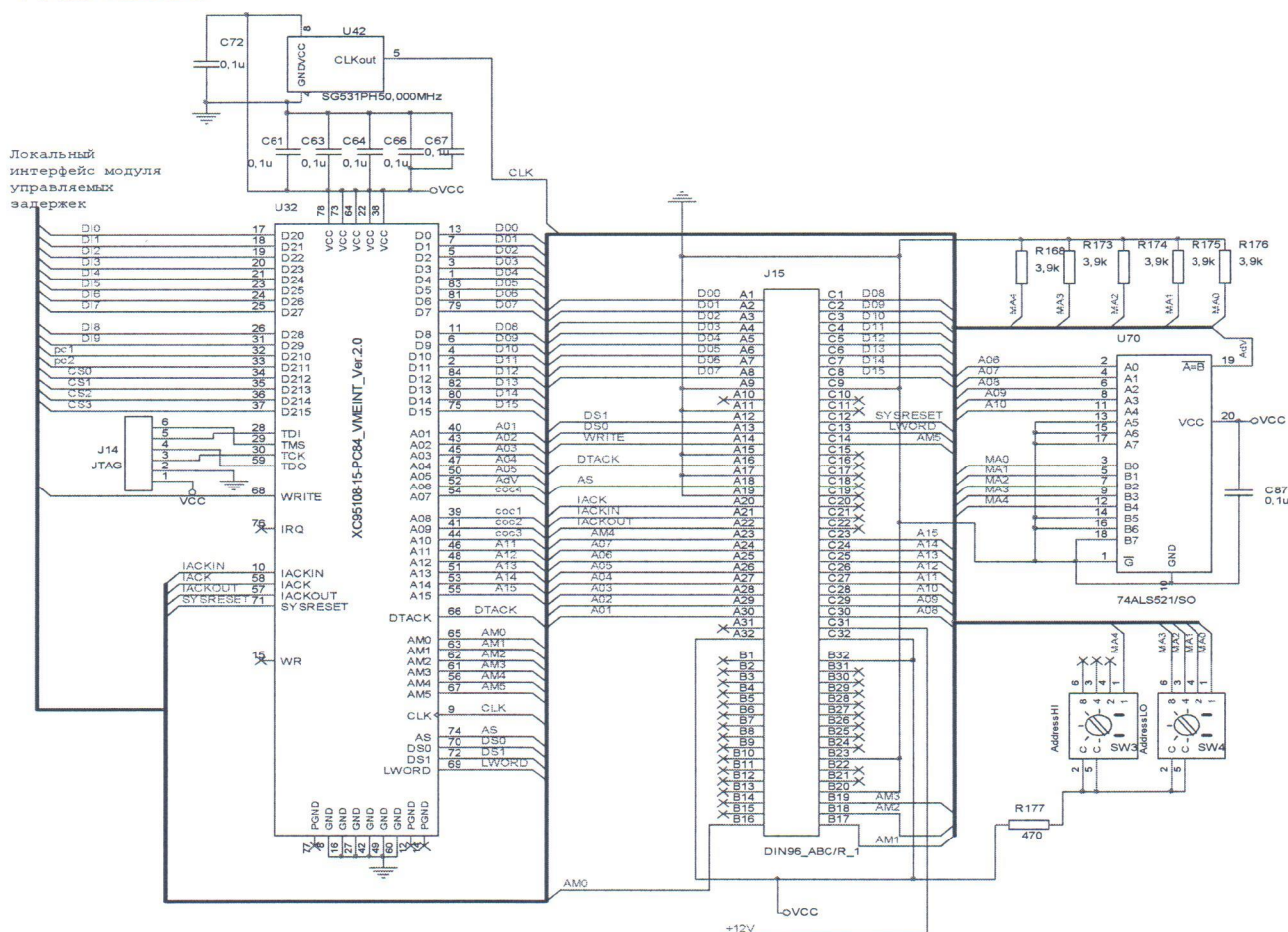


Рис. 3.44. Принципиальная схема интерфейса VME.

По совокупности параметров для реализации пользовательского интерфейса были выбраны ПЛИС XILINX семейства XC95XXX, имеющие следующие параметры, представленные в таблице 3.41:

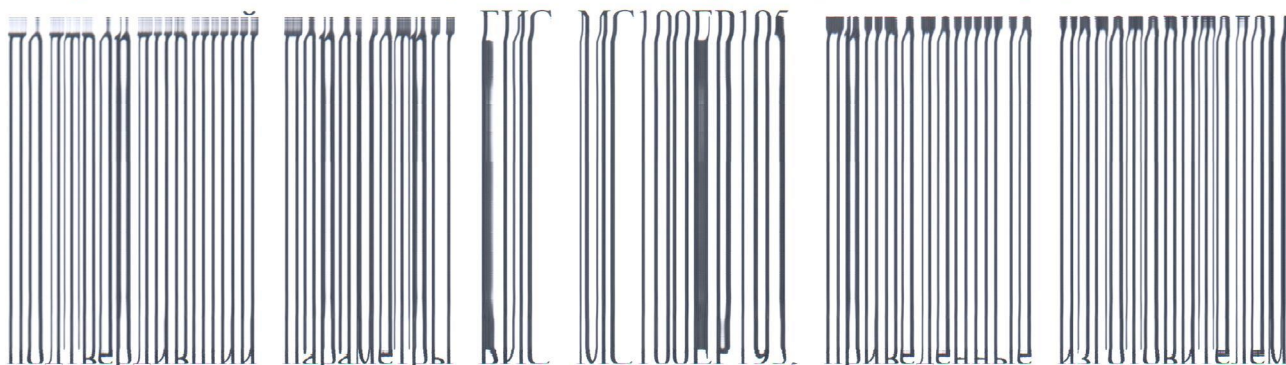
Таблица 3.41.

Feature/Product	XC 9536	XC 9572	XC 95108	XC 95144	XC 95216	XC 95288
Macrocells	36	72	108	144	216	288
Usable Gates	800	1,600	2,400	3,200	4,800	6,400
Tpd (ns)	5.0	7.5	7.5	7.5	10.0	15.0
?SYS (MHz)	100	83.3	83.3	83.3	66.7	55.6
Package	User I/O	User I/O	User I/O	User I/O	User I/O	User I/O
PC44	34	34				
VQ44	34					
CS48	34					
PC84		69	69			
TQ100		72	81	81		
PQ100		72	81	81		
PQ160			108	133	133	
HQ208					166	168
BG352					166	192

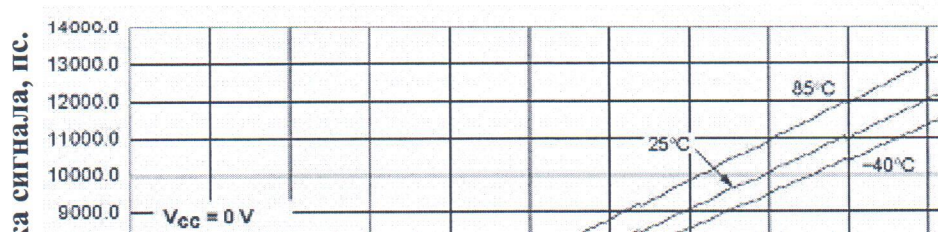
С учётом необходимых для реализации интерфейса ресурсов, была выбрана ПЛИС XC95108-15-PC84.

Итак, на основе результатов исследования прототипа модуля управляемой задержки, выполненных осенью 2004 г. – весной 2005 г., и руководствуясь выше изложенными доводами, была разработана схемотехника

четырёхканального модуля цифровых управляемых линий задержек в VME-стандарте DCDL-4. После финишной сборки модуль DCDL-4 в начале ноября 2005 г. прошел тестирование в ЦЕРН в составе T0-C сборки электронных модулей детектора. На первом этапе тестирования осуществлялось управление модулем с помощью контроллера VME – USB типа V1718 фирмы C.A.E.N., размещенного в одном крейте с тестируемым модулем и визуальный контроль задержки входного импульса по цифровому осциллографу TDS3052,



(рис. 3.45).



На следующем этапе тестирования отдельные каналы управляемых задержек модуля DCDL-4 включались в измерительный тракт, имитирующий практически полную структуру систему сбора данных (DAQ) и систему контроля и управления детектором (DCS), принятую для детектора T0 эксперимента ALICE.

В тестовых испытаниях для имитации вспышки черенковского детектора использовался полупроводниковый импульсный лазер с длиной волны 406 нм и длительностью импульса порядка 40 пс. Световой импульс от лазера через оптический аттенюатор, управляемый через сетевой адаптер DIGI One, поступал на оптический разветвитель, откуда световой сигнал распределялся на фотокатоды четырёх ФЭУ. Интенсивность световых вспышек на ФЭУ регулировалась в большом диапазоне оптическим аттенюатором. Выходные электрические сигналы с ФЭУ поступали на входы формирователей со следящим порогом (CFD 454), и уже их выходные сигналы временной отметки в стандарте NIM поступали на входы модуля управляемых линий задержек DCDL-4, размещенного в VME-крейте, оснащенного модулем контроллера VME – USB типа V1718, выпускаемого фирмой C.A.E.N.

Управление задержкой осуществлялось с отдельного PC- совместимого компьютера, оснащенного интерфейсом USB под управлением демонстрационной программы, поставляемой фирмой C.A.E.N. в комплекте с модулем V1718. Выходные сигналы с модуля DCDL-4 и синхронизирующий сигнал от лазера поступали на модуль время - цифрового преобразователя, размещенный во втором VME-крейте. Для набора данных использовался прототип системы сбора данных детектора T0 (процессор VME со специально разработанным программным обеспечением).

На рис. 3.46 представлена зависимость задержки выходного сигнала штатного модуля DCDL-4 от установленного цифрового кода для двух каналов блока. Аналогичные характеристики были получены для всех остальных каналов.

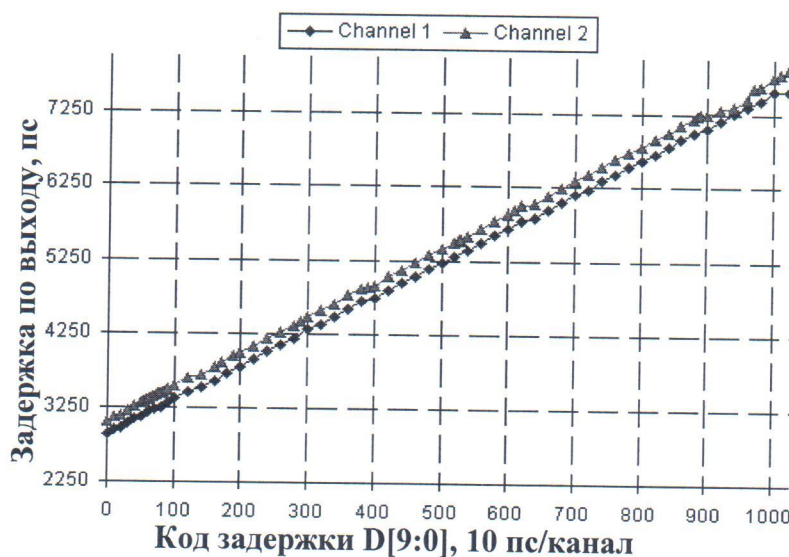


Рис. 3.46. Зависимость задержки выходного сигнала (для двух каналов) модуля DCDL-4 от цифрового кода.

Результаты анализа полученных временных распределений показали, что отклонения от линейности характеристик модуля задержек не превышают ± 12 пс, а вносимый во временное разрешение тракта вклад DCDL-4, не превышает 10 пс.

Таким образом, полученные результаты удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к модулю управляемых задержек. Были изготовлены 6 штатных модулей DCDL-4 и 2 запасных.

3.5. Модуль логического отбора сигналов OR.

Следует напомнить, что основная функция модуля логического отбора сигналов OR (отбора по времени) – выдать выходной сигнал в соответствии с передним фронтом первого из 12 сигналов, пришедших на его входы. Устройство модуля не предусматривает определение, с какого именно формирователя CFD пришёл первый сигнал.

На рис. 3.51 представлена функциональная схема модуля OR. Схема состоит из Ф1 - формирователя сигнала «ВОРОТА», который вырабатывается от стартового синхросигнала ВС с ускорителя. Сигналы с формирователей CFD1...CFD12 в стандарте NIM, пройдя через линии задержек DCDL-4, поступают на входы 1 - 12 модуля OR. Если передний фронт сигнала с CFD попадает в «ВОРОТА» (то есть неразрывно связан с ожидаемым событием), то на выходе D-триггера появляется сигнал, который поступает на схему отбора «ИЛИ». Длительность сигнала «ВОРОТА», главным образом, определяется условиями эксперимента ALICE, поэтому в процессе настройки модуля OR существует возможность регулировки длительности этого сигнала и выбора оптимального значения.

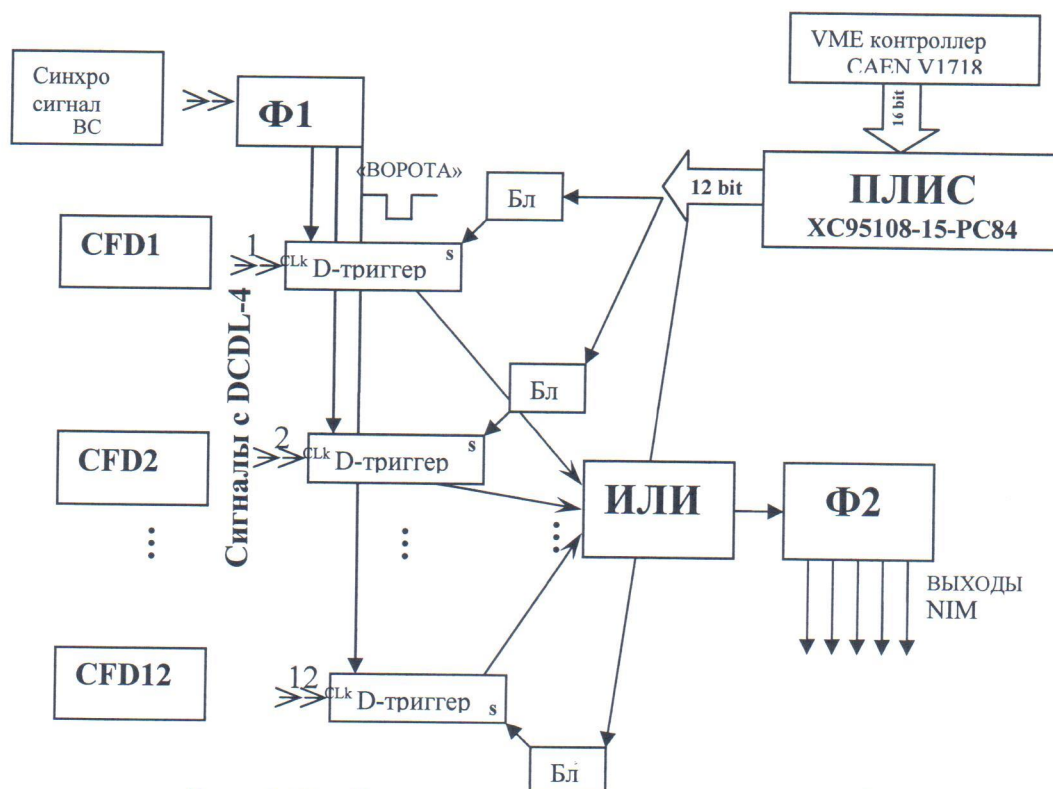


Рис. 3.51. Функциональная схема модуля OR.

На выходе схемы «ИЛИ» сигнал появляется в соответствии с передним фронтом первого сигнала с одного из двенадцати D-триггеров.

Формирователь Ф2 по переднему нарастающему фронту сигнала, пришедшему со схемы «ИЛИ», вырабатывает выходные сигналы длительности 10 - 15 нс и передние фронты этих сигналов соответствуют появлению первого сигнала с формирователя временной отметки.

Представленная функциональная схема определения первого пришедшего сигнала, возможно, покажется на первый взгляд несколько сложной, так как сигнал «ВОРОТА» разветвляется на двенадцать D-триггеров и каждый из сигналов, пришедших с формирователей CFD (если временной канал не заблокирован) попадает или не попадает в «ВОРОТА», потом определяется первый из двенадцати сигналов. Можно было бы избежать разветвления сигнала «ВОРОТА» на двенадцать схем и усложнения принципиальной электрической схемы, если бы сначала происходило определение (по схеме «ИЛИ») первого из двенадцати сигналов с формирователей, а потом происходила проверка: попадает ли передний фронт этого сигнала в «ВОРОТА» или нет. Но при таком изменении значительно снижается эффективность модуля OR и может происходить пропуск полезных событий. Рассмотрим пример: пришёл сигнал с формирователя временной отметки, не относящийся к истинному событию (ложно сработал фотоумножитель от фона, например). Этот сигнал прошёл через схему «ИЛИ», определился как первый, но не совпал по времени с моментом прихода сигнала «ВОРОТ», так как пришёл до или после «ВОРОТ». В это время приходит на схему «ИЛИ» сигнал с формирователя CFD, который связан с интересующим событием (совпадающий по времени с моментом прихода сигнала «ВОРОТ»), но фронт этого сигнала с CFD через схему ИЛИ не пройдёт уже – так полезные события не будут регистрироваться!

При анализе способов построения модуля OR, было выяснено, что самый оптимальный вариант – это представленный на рис. 3.51. Неискажение формы и длительности переднего фронта сигнала с формирователя временной отметки на протяжении всего временного тракта является наиболее важным.

В модуле OR предусмотрена блокировка входных каналов (одного или нескольких) в случае обнаружения дефектов (повреждения ФЭУ, например). Блокировка осуществляется при перепрограммировании ПЛИС XC95108-15-PC84 [112] установкой соответствующих бит, например, специальной программой, разработанной фирмой С.А.Е.Н. для управления модулями через контроллер VME крейта V1718.

На основе представленной функциональной схемы была полностью подобрана быстродействующая элементная база и разработана принципиальная электрическая схема модуля OR для использования блока в VME стандарте.

Принципиальная электрическая схема модуля «OR».

Синхросигнал ВС (в лаборатории сигнал с ускорителя заменял сигнал с генератора) стандарта NIM поступает на разъём J29 на принципиальной электрической схеме модуля OR рис. 3.52. На диффкаскаде транзисторов Q25 и Q26 р-п-р типа построен преобразователь уровня сигнала стандарта NIM в сигнал

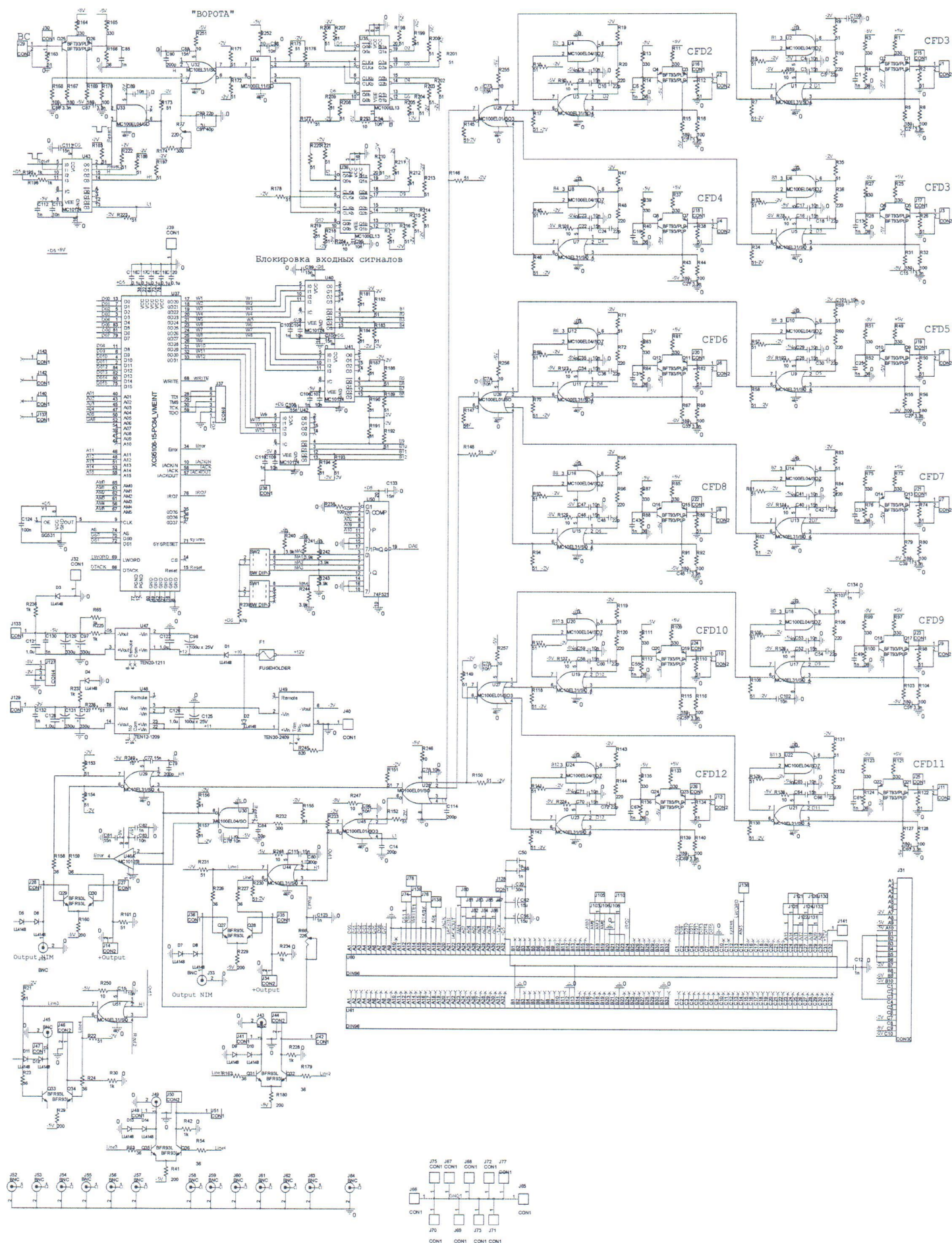


Рис. 3.52. Принципиальная электрическая схема модуля OR.

стандарта ECL. Коллектор транзистора Q25 соединён с тактовым входом 3 D-триггера U32. По переднему фронту строб сигнала ВС формируется сигнал «ВОРОТА» длительностью примерно 4,5 нс с помощью триггера MC10EL31 - микросхема U32. Длительность сигнала «ВОРОТ» можно увеличить или уменьшить по необходимости, изменяя параметр $\tau = RC$. Переход D-триггера - U32 в исходное состояние осуществляется по приоритетному входу сброса R-reset (вход 4) сигналом, который с коллектора транзистора Q26 через микросхему U33 и RC - цепь (резистор $R_{77} = 0$ Ом, $R_{174} = 300$ Ом, ёмкость $C_{92} = 22$ пФ и переменная ёмкость C_{91}). Сигналы с выходов 6 и 7 D-триггера U32 проходят через микросхему U34 (MC100EL11) – разветвитель 1 на 2, с прямых и инверсных выходов 1 и 2, 3 и 4 микросхемы U34 поступают на сдвоенные разветвители 1 на 3 - микросхемы U35, U36 (MC100EL13). С инверсных выходов микросхем U35 и U36 (эти выходы соединены со входами данных двенадцати триггеров U1, U3, U5, U7, U9, U11, U13, U15, U17, U19, U21, U23 (MC10EL31), соединения отмечены как линии D1 - D12) на D-входы триггеров приходят после разветвления сигнал «ВОРОТА». На уровне этих 12 триггеров осуществляется запрет прохода сигналов в случае, если один - два временных канала по той или иной причине выйдут из строя.

Управление модулем OR осуществляется через тот же VME контроллер V1718, что и модуля задержек DCDL-4. В модуле OR предусмотрена блокировка входных сигналов в случае повреждения или выхода из строя фотоумножителя, формирователя CFD или одного из элементов временного тракта.

В специальной программе, разработанной фирмой С.А.Е.Н., далее будет приведена панель управления, создаваемая этой программой, необходимо определить установочные биты, соответствующие блокируемым входам модуля OR и запустить программу. При этом произойдёт перенос данных с линий записи VME D00 - D15 (предусмотрен 16 битный код управления через VME контроллер) в ПЛИС (U37 - XC95108-15-PC84). Внутри ПЛИС происходит преобразование 16 битного кода в 12 установочных бит W1...W12 (выходы внутренних регистров ПЛИС - микросхемы U37). Сигналами W1...W12, проходящими через преобразователи уровней (микросхемы U40 - U42 MC10124), выходы которых соединены со входами 3 микросхем U2, U4, U6, U8, U10, U12, U14, U16, U18, U20, U22, U24 (MC100EL04) по линиям В1- В24, происходит блокировка соответствующих каналов.

Каждый инверсный выход микросхем U35, U36 соединен со входом 2 - вход данных у двенадцати D-триггеров (MC10EL31). На этот вход данных приходит сигнал «ВОРОТА», в которые и должен попасть сигнал, пришедший с формирователя временной отметки. Сигнал «ВОРОТА» связан с синхросигналом и, если сигнал с формирователя попадает в «ВОРОТА» (в заданный интервал времени), то он проходит на схему отбора «ИЛИ», построенную на микросхемах U25 – U28. В качестве схемы отбора «ИЛИ» используется 4 микросхемы MC100EL01 (одну двенадцативходовую микросхему «ИЛИ» с

требуемым быстродействием не удалось найти в номенклатуре промышленных изделий). Сигнал с выхода 7 микросхемы U28 поступает на тактовый вход 3 D-триггера U29. На входе данных 2 установлен высокий уровень ECL логики -0,8 В.

На уровне триггеров U1, U3, U5, U7, U9, U11, U13, U15, U17, U19, U21, U23 (MC10EL31) осуществляется отбор интересующих нас событий, связанных с внешним синхросигналом следующим образом: если сигналы с формирователей CFD1 – CFD12 не попадают в «ВОРОТА» - отрицательные перепад из уровня -0,8 В в -1,8 В, то на выходе 7 (например, D-триггера микросхемы U1) установлен высокий уровень ECL логики -0,8 В, на выходе 6 – низкий уровень ECL логики -1,8 В. Выход 7 U1 соединен со входом 2 микросхемы U4 «И», на втором входе 3 которой установлен высокий уровень. На инверсном выходе 6 микросхем U2 (или U4, U6, U8, U10, U12, U14, U16, U18, U20, U22, U24 (MC100EL04)) – будет низкий уровень (при условии, что на обоих входах схемы «И» будут высокие уровни). Таким образом, 12 D-триггеров не блокируются низким уровнем.

Если же был установлен бит блокировки какого-либо канала (например, первого), то на входе 3 микросхемы U2 – низкий уровень -1,8 В, на инверсном выходе появиться высокий уровень, который и заблокирует D-триггер U1 по приоритетному входу 1-Set и сигнал с CFD не пройдет на схему отбора «ИЛИ».

Сигнал с инверсного выхода 6 микросхемы U28 поступает на соединенные входы 1 и 2 схемы «И» U45, на входах 3 и 4 U45 (микросхемы MC100EL01) установлен низкий уровень -1,8 В. Если с выхода 6 есть сигнал, то через U45 он проходит на выходы 6 и 7.

Для увеличения числа выходов модуля OR была разработана схема каскадов, которая построена на D-триггерах U29, U44, U51 и RC цепи обратной связи сброса триггеров в исходное состояние с переменным резистором для изменения длительности четырёх выходных импульсов от 4,5 нс до 12 нс. На парах транзисторов Q27 и Q28, Q29 и Q30, Q31 и Q32, Q33 и Q34, Q35 и Q36 p-n (BFR93L) включённых по схеме с общим эмиттером построены преобразователи уровней ECL в NIM.

Ёмкостью C_{123} и переменным резистором R_{66} можно увеличивать или уменьшать длительность выходного сигнала по необходимости. Дифференциальные сигналы с инверсного выхода 6 и прямого выхода 7 D-триггера U29 через последовательно включенные резисторы R_{158} и R_{159} поступают в базы транзисторов Q29 и Q30, на этом дифференциальном каскаде и построен выходной один из преобразователей сигналов стандарта ECL в стандарт NIM. Выходные сигналы NIM стандарта поступают на внешние LEMO разъёмы J13, J33, J43, J45, J49.

На выходах модуля OR получаем сигналы, которые появляются в соответствии с передним фронтом первого пришедшего сигнала с временного формирователя CFD 454.

Принципиальная электрическая схема модуля OR была разработана с помощью специальной программы OrCad, а трассировка платы и выравнивание сигнальных печатных проводников было выполнено с помощью программы Layout Plus программного комплекса «CADENCE 14.0». Необходимая техническая документация для производства четырёхслойной печатной платы и специальные форматы файлов были подготовлены и на их основе была изготовлена плата. Осуществлён монтаж всех элементов на печатную плату согласно электрической схеме и сборочным чертежам.

Тестирование модуля OR.

Настройка и отладка модуля OR проводилась сначала в лаборатории МИФИ. На рис. 3.53 показан штатный модуль OR в крейте VME на испытаниях в лаборатории, выполненный в стандарте VME с соблюдением всех протоколов обмена информацией компьютера с модулем через контроллер V1718.

На входы с передней панели модуля поступали двенадцать сигналов с выходов формирователей временной отметки, на выходе модуля OR получали сигнал, который соответствовал первому пришедшему сигналу с временного формирователя. В качестве стартового синхросигнала ВС использовался сигнал с генератора. В ходе отладки были устранены высокочастотные наводки и помехи. (В штатной версии модуля OR в печатной плате были сделаны два дополнительных внутренних слоя: один внутренний слой – сплошной полигон земли, а на втором внутреннем слое размещены трассы питания.)

На рис. 3.53 показан модуль OR в крейте VME, на осциллографе справа выходной сигнал, длительностью 10 нс с модуля OR.

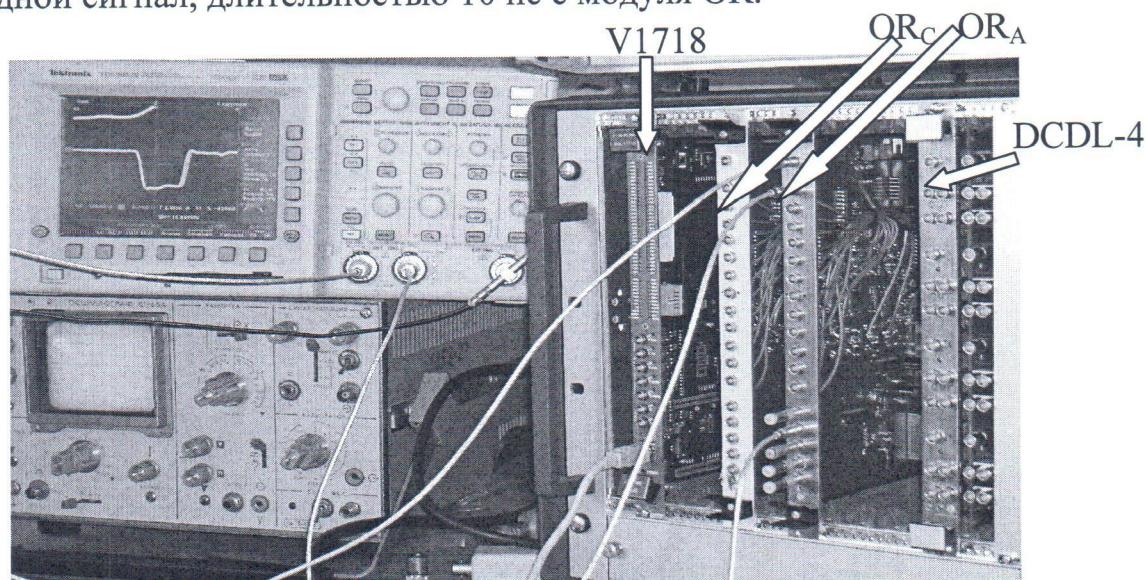


Рис. 3.53. Штатные модули DCDL-4, OR_C и OR_A в крейте VME на испытаниях в лаборатории МИФИ.

Разработанный модуль функционировал на предельной частоте используемого генератора в 30 МГц. В лаборатории МИФИ была проверена блокировка входных каналов модуля OR.

Управление модулем OR осуществлялось с помощью VME контроллера V1718. С панели управления, предложенной фирмой C.A.E.N. (рис. 3.54), производились соответствующие обращения к модулю V1718 (в панели CAEN VME Settings) и производились необходимые установки модуля OR (Address Mode, Data Width, Address (Hex), DWrite (Hex)).

При установке данных в панели управления, после исполнения программы биты блокировки записывались во внутренние регистры ПЛИС. Так для проверки функции блокировки отключались входные временные каналы по необходимости.

Аналогичная программа и панель управления использовалась при отладке модулей DCDL-4.

Испытания модуля OR проводились как в лаборатории так и на ускорителе PS в ЦЕРН в составе детектора T0 совместно с системой считывания и обработки данных. На более совершенной аппаратуре было показано, что разработанный блок работает в необходимом диапазоне частот от одиночных импульсов до 40 МГц. На рис. 3.55 представлена упрощённая схема тестирования.

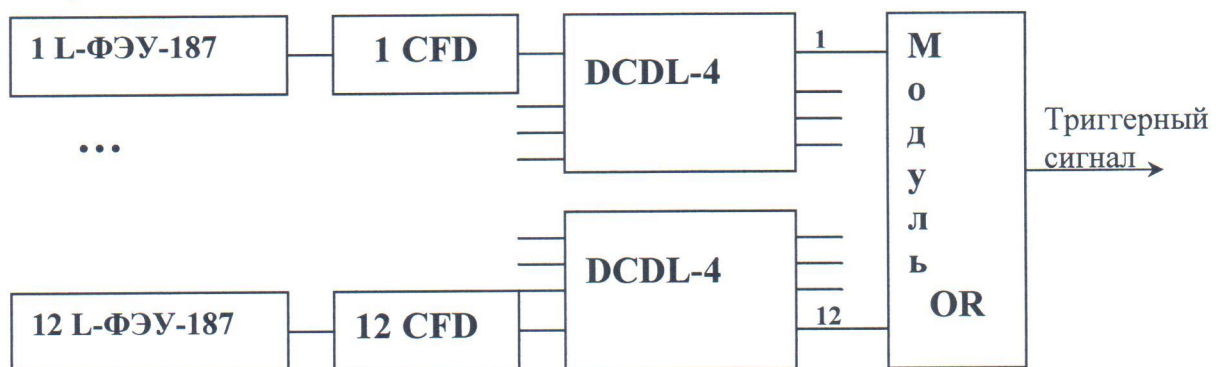


Рис. 3.55. Схема тестирования модулей DCDL-4 и OR.

Вспышки черенковского детектора имитировались импульсным лазером. Световой импульс от лазера через attenuator поступал на оптический распределитель, откуда световой сигнал проходил на фотокатоды двенадцати ФЭУ. Далее сигналы с ФЭУ1...ФЭУ12 поступали на входы формирователей CFD, а их выходные сигналы в стандарте NIM поступали на входы модуля

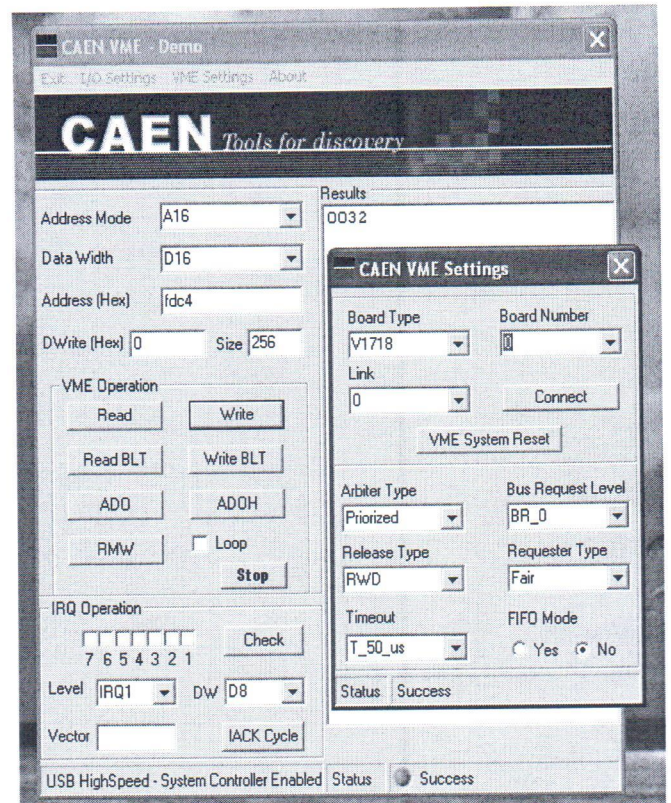


Рис. 3.54. Панель управления модулями через VME контроллер V1718

управляемых линий задержек DCDL-4, размещенного в крейте VME. Выходные сигналы с модуля DCDL-4 и синхронизирующий сигнал от лазера поступали на входы модуля OR. Выходной сигнал с модуля OR приходил в систему сбора данных и являлся сигналом «СТОП». «СТАРТ» системы сбора данных был синхронизован с сигналом от лазера.

Модуль OR был проверен на функциональность и вклад в общее временное разрешение. Модуль оказался полностью функциональным, а его вклад в суммарное временное разрешение пренебрежимо мал.

Проводились исследования модуля OR на линейность. На один из двенадцати входов модуля подавался сигнал с CFD через блок управляемых линий задержек DCDL-4. Задержка входного сигнала изменялась с помощью модуля DCDL-4, с выхода которого сигнал поступал на один из входов OR. Исследовалась зависимость задержки выходного сигнала с модуля OR от входного. На рис. 3.56 представлена характеристика одного из каналов модуля DCDL-4, а также представлена зависимость задержки выходного сигнала с модуля OR совместно с DCDL (верхний график) от входного. Модуль OR повторяет входную характеристику (выходной сигнал с модуля DCDL) в пределах длительности «ВОРОТ» $\sim 4,5$ нс.

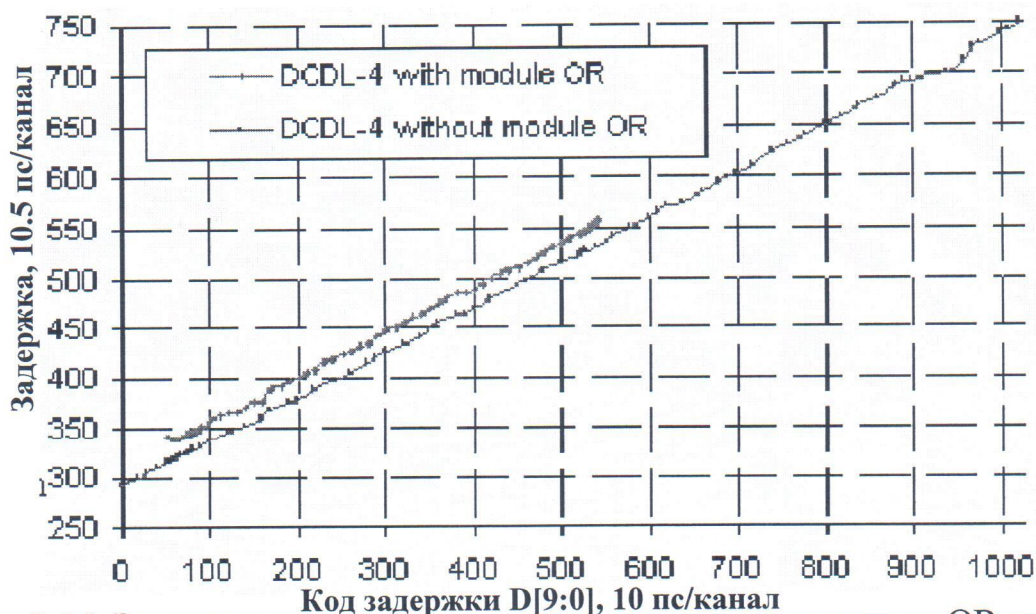


Рис. 3.56. Зависимость задержки выходного сигнала с модуля OR от входного.

Была проверена главная функция модуля OR – выделение первого сигнала (из 12 пришедших на входы и попадающих в «ВОРОТА»). В процессе настройки и отладки проводилось исследование на предмет, с какой минимальной разницей во времени пришедшие и попадающие в «ВОРОТА» сигналы с формирователей временной отметки будут выделяться модулем OR. На один вход подавался сигнал с первого CFD1, на второй вход модуля OR поступал сигнал с CFD2 с 30 пс задержкой относительно первого, выходные сигналы появлялись в соответствии с первым пришедшим сигналом. В процессе отладки исследовалось, нет ли взаимного влияния каналов друг на друга внутри блока. Анализ полученной временной зависимости показали, что

вносимый модулем OR во временное разрешение тракта вклад не превышает 10 пс.

3.6. Усреднитель временных интервалов «Mean Timer».

Принцип работы усреднителя временных интервалов основан на следующем: при очень больших энергиях ускорителя (~ 5 ТэВ) частицы, летящие под небольшим углом к оси пучка, как было показано расчётами (гл. 2), практически имеют скорость, равную скорости света. Этот факт, а также то, что черенковские счётчики расположены максимально близко к оси трубы ускорителя и летят в детектор практически под нулевым углом, позволяют применить для получения точной временной отметки метод время-координатной компенсации (усреднение временных интервалов) [113]. Центр тяжести (на временной оси) двух входных сигналов, приходящих во времена T_{0A} и T_{0C} , в случае фиксированного расстояния между двумя сборками черенковских счётчиков детектора и неизменной скорости частиц, не зависит от положения точки столкновения и равен $(T_{0A} + T_{0C})/2$. Среди номенклатуры промышленных изделий имеется 16-канальный усреднитель временных интервалов фирмы C.A.E.N., модуль V706 [114], имеющий следующие характеристики: временное разрешение - 200 пс; задержку от входа до выхода 38 ± 1 нс; 32 дифференциальных входа в ECL стандарте. По основным своим параметрам он не удовлетворяет требованиям эксперимента, его временное разрешение на порядок хуже необходимого.

Поэтому нами был разработан усреднитель временных интервалов, функциональная схема которого приведена на рис. 3.61.

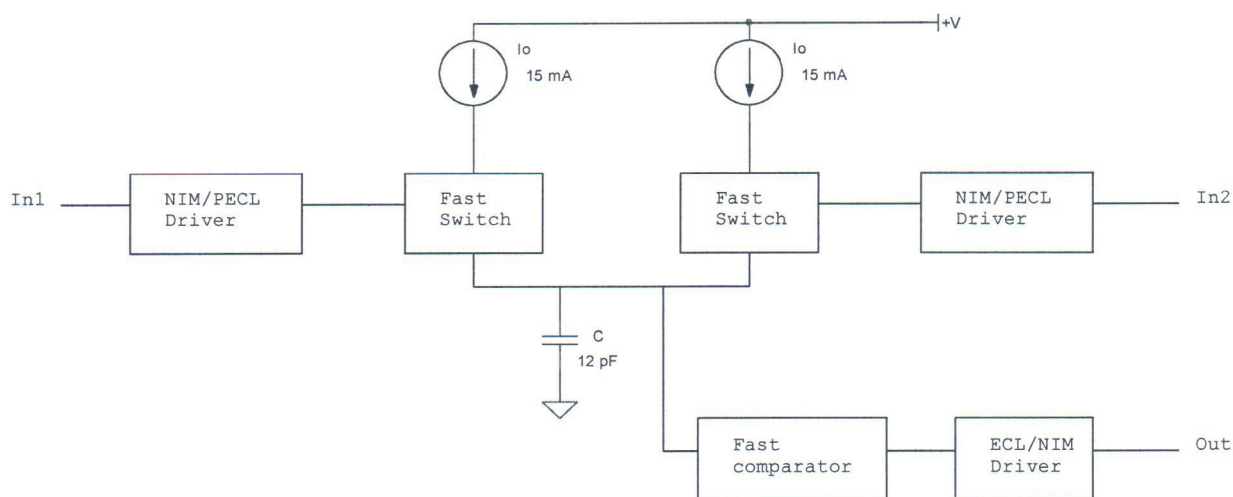


Рис. 3.61. Функциональная схема усреднителя временных интервалов «Mean Timer».

Кружками со стрелочками обозначены генераторы постоянного тока I_0 .
NIM/PECL Driver - преобразователи сигналов из NIM в стандарт PECL.

Fast Switch – быстрые ключи

Fast comparator – быстрый компаратор

ECL/NIM driver – преобразователь сигналов из ECL в стандарт NIM.

Принцип работы усреднителя временных интервалов «Mean Timer» поясняется временными диаграммами, представленными на рис. 3.62.

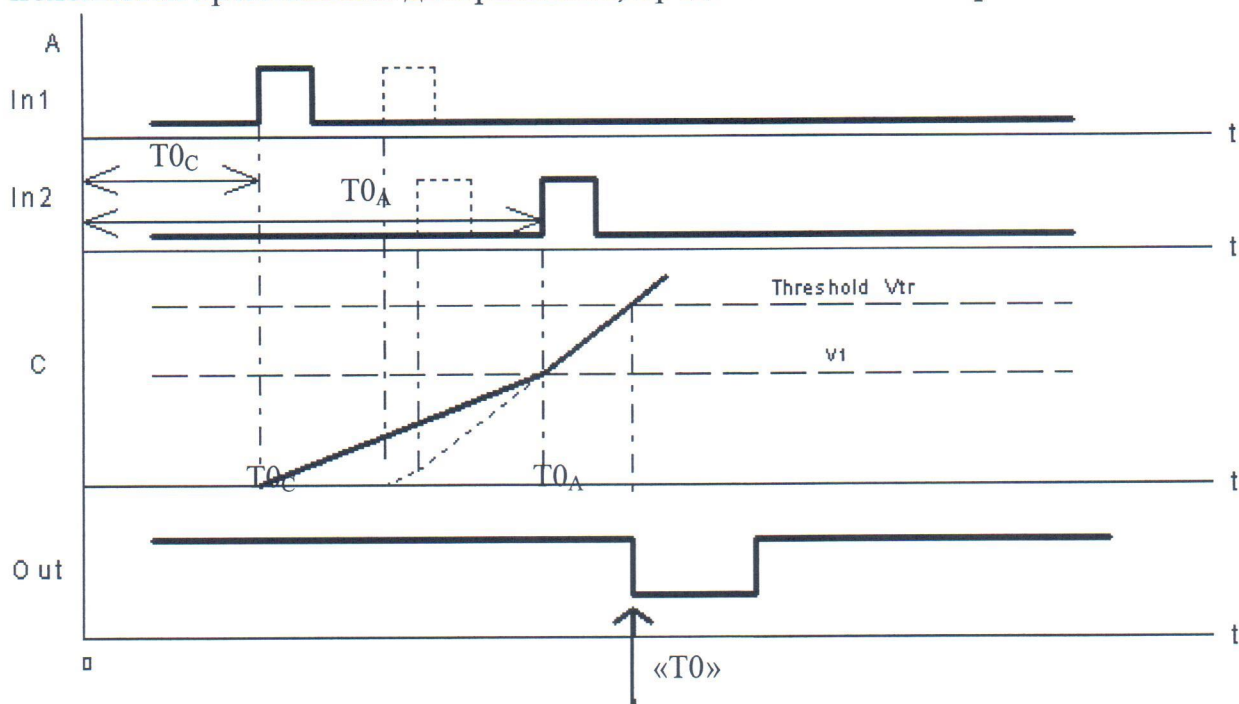


Рис. 3.62. Временные диаграммы работы блока «Mean Timer».

Первый сигнал, приходящий из точки столкновения в момент времени T_{0C} отпирает быстрый ключ 1, и ёмкость C начинает линейно заряжаться током « $I_{зар}$ » от генератора тока ГТ1. Второй сигнал, приходящий в момент времени T_{0A} , отпирая быстрый ключ 2, добавляет то же значение « $I_{зар}$ » от генератора тока ГТ2, и суммарный ток принимает значение « $2I_{зар}$ ».

Полагая, что порог компаратора равен V_{tr} , можно записать следующие соотношения:

$$V_1 = I_{зар} \cdot (T_{0A} - T_{0C})/C;$$

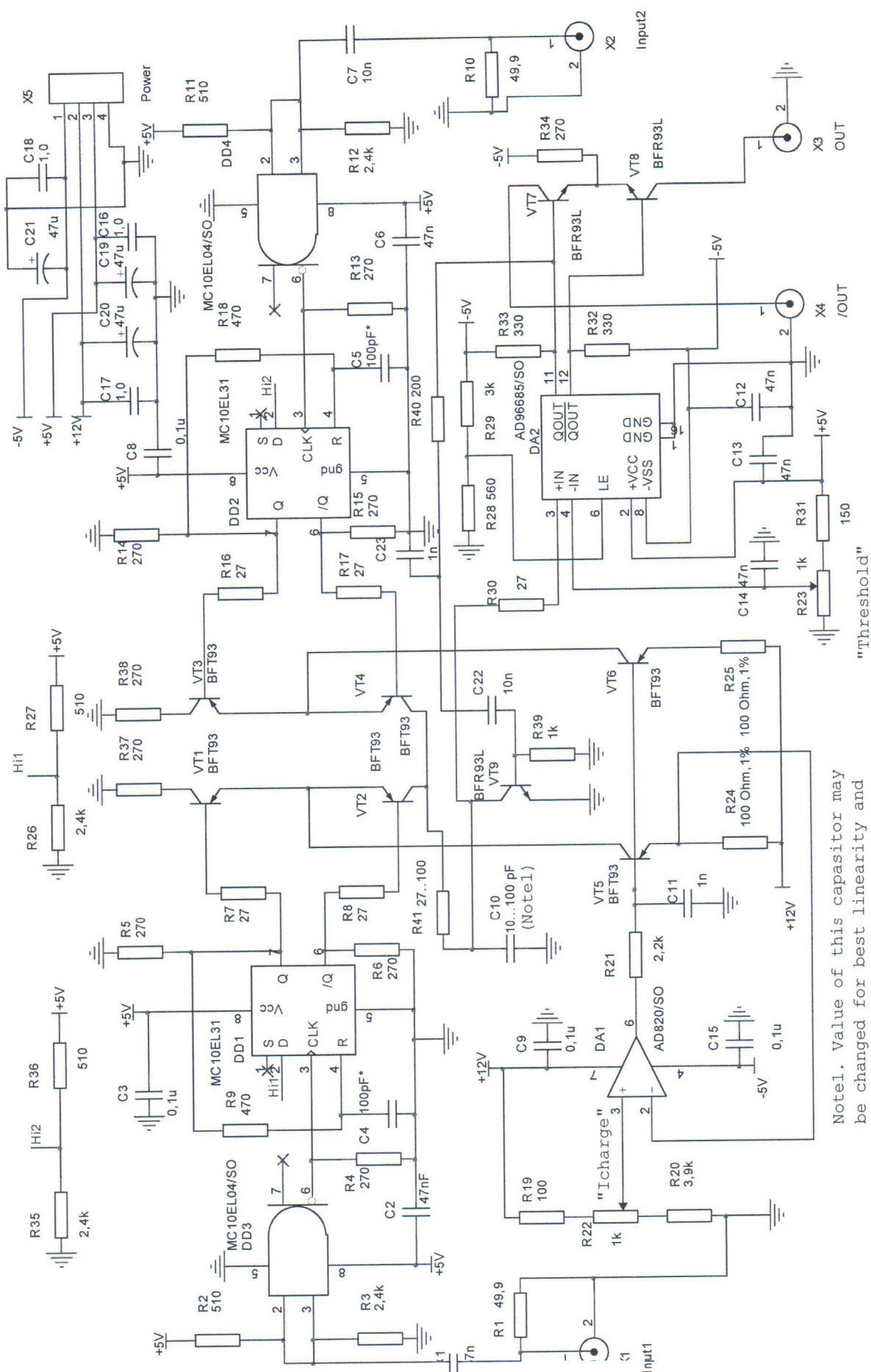
$$V_{tr} - V_1 = 2I_{зар} \cdot (T_0 - T_{0A})/C;$$

$$V_{tr} - I_{зар} \cdot (T_{0A} - T_{0C})/C = 2I_{зар} \cdot (T_0 - T_{0A})/C.$$

Окончательно, « T_0 » = $V_{tr} \cdot C / 2I_{зар} + (T_{0A} + T_{0C})/2$, где $V_{tr} \cdot C / 2I_{зар}$ - дополнительная задержка усреднителя.

Принципиальная электрическая схема усреднителя временных интервалов блока «Mean Timer» приведена на рис. 3.63.

Кратко опишем назначение отдельных узлов блока усреднителя временных интервалов. Логические элементы DD3 и DD4 (MC10EL04 - 2И/И-НЕ) преобразуют уровни входных сигналов из стандарта NIM в стандарт PECL (Positive Emitter-Coupled Logic), т.к. ключи 1 и 2 требуют положительных уровней управляющего сигнала. D - триггеры DD1 и DD2 (MC10EL31)



Notel. Value of this capacitor may be changed for best linearity and desired time range

Рис. 3.63. Принципиальная электрическая схема «Mean Timer».

включены по схеме одновибратора, и формируют выходные парафазные логические сигналы длительностью около 20 нс. Сформированные одновибраторами парафазные сигналы управляют аналоговыми дифференциальными ключами, реализованными на биполярных р-п-р транзисторах VT1..VT4 (BFT93, $f_T > 5$ ГГц). Ключи обеспечивают заряд накопительной ёмкости C_{10} во время действия входных сигналов от двояного генератора тока, выполненного на ОУ DA1 (AD820 или аналогичный) и биполярных р-п-р транзисторах VT5 и VT6 (BFT93). Величина тока заряда $I_{зар}$ устанавливается с помощью многооборотного потенциометра R22. Сигнал, сформированный на накопительной ёмкости C_{10} , поступает на вход компаратора DA2 (AD96685), порог срабатывания которого устанавливается потенциометром R23. Компаратор включён по стандартной схеме с выходными парафазными сигналами ECL-логики. Биполярные п-р-п транзисторы VT7 и VT8 (BFR93) образуют преобразователь уровня ECL-NIM. Для работы схеме необходимы три источника питания +5, -5, и +12 В.

С целью проверки функциональности и измерения характеристик основных узлов и систем детектора, а также подтверждения расчётных характеристик в реальных условиях на пучке ускорителя был создан прототип детектора T0. Были разработаны и изготовлены основные узлы быстрой электроники, отвечающие за выработку основного сигнала временной отметки «T0», необходимого для работы TOF. В состав прототипа входили: 3 черенковских счётчика на основе кварцевых радиаторов и ФЭУ-187, формирователь временной отметки, модуль усреднителя временных интервалов «Mean Timer», а также триггерный модуль TVDC. Испытания прототипа детектора T0 проводились на пучке пионов с энергией 6 ГэВ/с с ускорителя PS (ЦЕРН). Профиль пучка в пределах апертуры установки был практически равномерным. Схема эксперимента приведена на рис. 3.64.

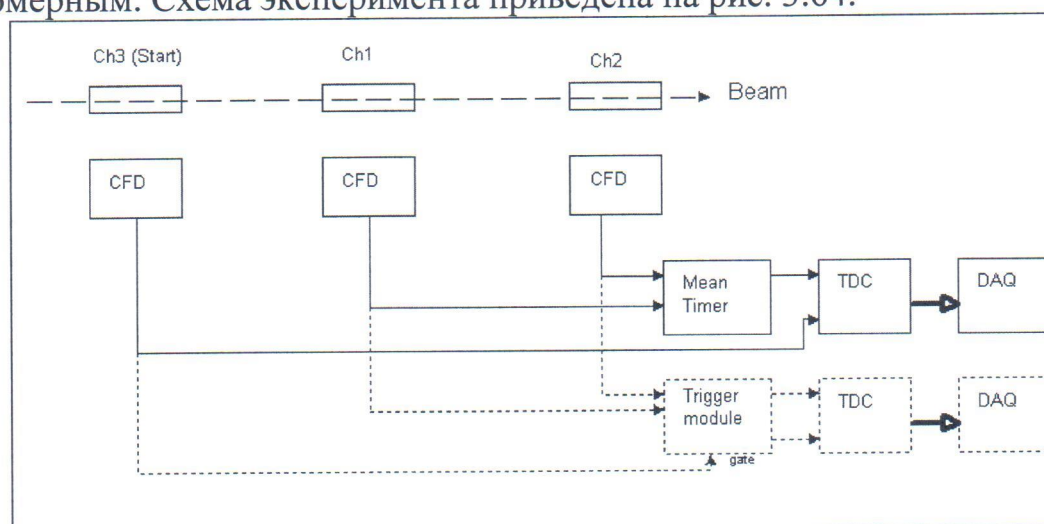


Рис. 3.64. Схема испытания прототипа детектора на пучке ускорителя.

Черенковские счётчики Ch1 (ФЭУ-187 с кварцевым радиатором) и Ch2 имитировали T0-A и T0-C сборки детектора. Третий черенковский счётчик Ch3 (Start) служил для генерации независимого сигнала временной отметки, а также в качестве триггерного, относительно которого измерялись задержки первого и

второго счётчиков, а также задержка выходного сигнала усреднителя временных интервалов. Сигналы со всех трёх черенковских счётчиков подавались на формирователи со следящим порогом CFD и на время - цифровые преобразователи (TDC) с шириной канала 10,5 пс и далее поступали в систему сбора и обработки информации.

Качество время - координатной компенсации модулем усреднителя временных интервалов проверялось путём смещения детекторов Ch 1 и Ch 2 на одно и то же расстояние в противоположные стороны. Такой метод позволяет изменять положение детекторов относительно условной вершины события (фактически относительно неподвижного дополнительного стартового детектора) с точностью порядка 1 мм, что соответствует погрешности на временной оси ~ 3 пс, учитывая, что регистрируемые частицы движутся со скоростью света. Такой точности нельзя было добиться простым изменением задержек в соответствующих каналах. Положение выходного сигнала усреднителя (сигнала «T0») измерялось относительно неподвижного стартового детектора.

На рис. 3.65 приведены зависимости задержки сигналов отдельных черенковских счётчиков (Ch1, Ch2) от величины смещения по пучку (кружки и ромбы), а также положение (задержка) выходного сигнала «T0» (квадраты) с усреднителя временных интервалов. Измерения проводились с помощью высокоточного время - цифрового преобразователя.

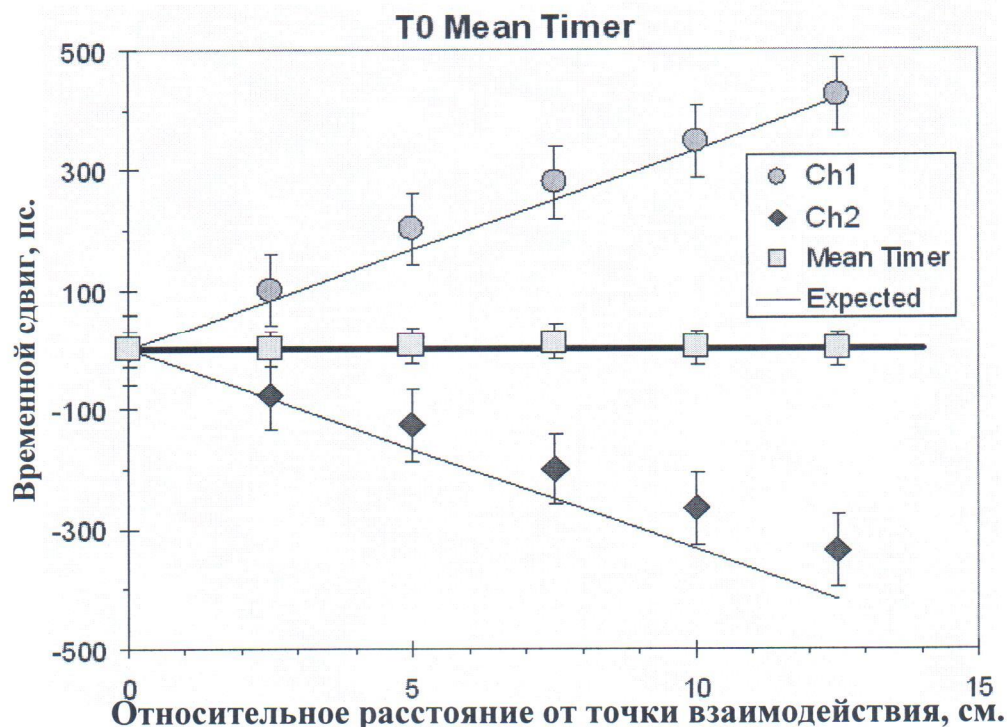


Рис. 3.65. Зависимости задержки сигналов отдельных Ch1, Ch2 черенковских счётчиков от величины смещения по пучку.

Из рис. 3.65 видно, что задержки сигналов отдельных детекторов меняются линейно на величину, соответствующую смещению детекторов вдоль

оси пучка. В то же время выходной сигнал «T0» не меняет своего положения на оси времени с точностью около ± 15 пс. Прототип усреднителя временных интервалов был рассчитан на диапазон компенсации порядка 3σ (15 см) флуктуаций положения точки столкновения частиц. Диапазон компенсаций может быть расширен путем уменьшения зарядного тока. На основе прототипа был разработан и отлажен штатный усреднитель временных интервалов с характеристиками, представленными в гл. 4.

В эксперименте на пучке частиц измерялось относительное временное разрешение пары черенковских счётчиков во всех возможных комбинациях. Во всех случаях временное разрешение не превышало 55 пс, т.е. не более 40 пс для отдельного счётчика. Типичное распределение временных интервалов между двумя счётчиками приведено на рис. 3.66.

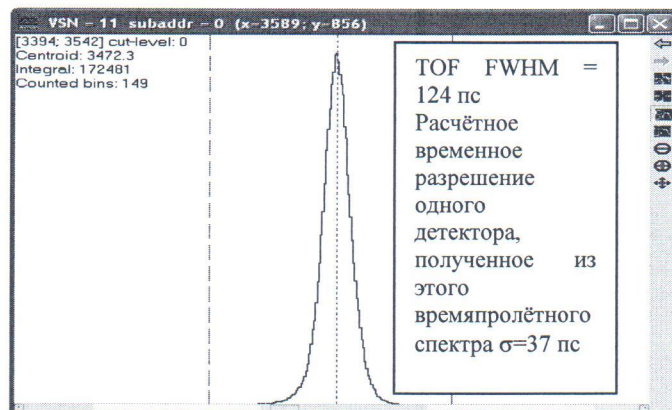


Рис. 3.66. Времяпролётный спектр между детекторами Ch1 и Ch2.

Усреднитель временных интервалов «Mean Timer» является важной составной частью детектора T0 эксперимента ALICE, обеспечивающий формирование специального сигнала временной отметки «T0», однозначно определяющего момент времени столкновения ионов (протонов), не зависящий от конкретного положения точки столкновения в вакуумной трубе ускорителя. Точность определения этой отметки должна быть не хуже 50 пс, включая разрешение самих детекторов. Реально точность усреднения должна быть не более ± 15 пс, чтобы не вносить заметного вклада в общее разрешение системы. Идеальный усреднитель, согласно теории, должен давать временное разрешение в $\sqrt{2}$ раз лучше, чем каждый черенковский счётчик по отдельности.

Временное разрешение сигнала «T0» измерялось по отношению к стартовому детектору, имеющему наилучшее собственное разрешение. Среднее значение временного разрешения, усредненное по четырем измерениям, оказалось равным 28 пс! Этот результат практически совпадает с теоретически ожидаемым – разрешение сигнала «T0» должно быть в 1,4 раза лучше, чем разрешение одного детектора (37 пс).

Вопросы долговременной и температурной стабильности разработанной цепочки модулей изучались в процессе испытаний в ЦЕРН. Общая длительность испытаний составляет около трёх месяцев, при этом стабильность положения сигналов во временных каналах системы считывания анализировалась сразу после включения, а также после прогрева аппаратуры. Общий сдвиг положения сигналов во временных каналах составляет 1-2 канала (около 50 пс). Тем не менее, не исключено, что в процессе длительной эксплуатации общий сдвиг будет превышать указанную величину. Именно поэтому предусмотрена процедура непрерывной калибровки детектора T0 с помощью импульсного

лазера и корректировка положения сигналов во временных каналах (задержка сигналов с помощью дистанционного управления по магистрали VME (см. гл. 4)).

Кроме того, в системе крейтов электроники предусмотрено охлаждение и температурная стабилизация отдельных модулей. Эта задача решается централизованно для всей системы ALICE и не входит в круг вопросов данной работы.

Выводы к главе 3.

1) Экспериментально обоснован выбор формирователя временной отметки со следящим порогом CFD 454 фирмы CANBERRA и формирователя с постоянным порогом - дискриминатора LED V895, фирмы C.A.E.N.

2) Разработан и оттестирован блок управляемых от контроллера VME линий задержек DCDL-4. Разработка является уникальной в своем роде, среди номенклатуры промышленных изделий подобный модуль отсутствует.

3) Изготовлен и испытан модуль логического отбора OR с управлением по магистрали VME. Основные особенности и отличия от похожих изделий: а) модуль работает по передним фронтам сигналов, что обеспечивает временное разрешение, недостижимое при применении стандартной аппаратуры, б) модуль имеет мёртвое время меньше 25 нс (работает на частоте до 40 МГц).

4) Метод усреднения временных интервалов реализован в уникальном модуле «Mean Timer». Полученные характеристики разработанного модуля удовлетворяют требованиям эксперимента. Среди похожих промышленных изделий имеется «Mean Timer» с временным разрешением 200 пс, что на порядок хуже.

5) Разработан и опробован метод преобразования амплитуды во временной интервал с помощью двух формирователей CFD и LED. Метод позволяет преобразовать амплитуду во временной интервал за рекордно короткое время: не более 1,5 – 2 нс.

ГЛАВА 4.

Методика и результаты настройки электроники и калибровки детектора на импульсном лазерном пучке.

Стартовый триггерный детектор T0 представляет собой сложную многоканальную систему. Каждый канал содержит цепочку модулей и сложные последовательности связей между ними (см. рис. 1.31 и 3.10). При этом задержки отдельных экземпляров фотоумножителей могут отличаться на несколько наносекунд из-за индивидуальных конструктивных особенностей и разного напряжения питания. Задержки идентичных электронных узлов также могут отличаться друг от друга на несколько наносекунд. Кроме того, в процессе длительной эксплуатации детектора возможны изменения основных параметров установки, периодический контроль за которыми необходим.

Условия работы детектора T0 в установке ALICE таковы, что настройка и калибровка не являются тривиальными процедурами. Алгоритмы настройки и калибровки электронной системы отрабатывались длительное время в процессе опытной эксплуатации в лаборатории, как по отдельным модулям, так и детектора в целом. Окончательный вариант процедуры калибровки должен быть отработан и алгоритм должен чётко исполняться в период работы всего эксперимента (калибровка будет проводится непрерывно). Последовательность действий, алгоритмы настройки и контроля детектора T0 представлены в разделе 4.2.

В процессе эксплуатации установки ALICE в течение 10 лет неизбежно возникнет необходимость подстройки всех систем стартового детектора T0, прежде всего выравнивания задержек отдельных временных каналов с точностью 10 пс, которое можно выполнить, используя только лазерную систему калибровки. В процессе установки детектора и проведения приёмосдаточных испытаний применение лазерной системы калибровки тоже остаётся единственной возможностью.

4.1. Лазерная система калибровки.

Цель лазерной настройки и калибровки детектора состоит в том, чтобы: 1) отладить работу всей системы детектора T0, выполнить все необходимые настройки и устранить возникающие сбои; 2) провести измерения по амплитудным и временным каналам, снять характеристики для амплитудно-временной коррекции.

Далее сформулированы требования к лазерной системе для проведения выравнивания амплитуд импульсов с фотоумножителей.

1.	Длина волны лазера – 400 нм (голубой свет).
2.	Амплитуда вспышки 100 - 10000 фотоэлектронов.
3.	Длительность световых импульсов с лазера не более 100 пс.
4.	Амплитудная стабильность в течение эксперимента не хуже 1%.

- | | |
|----|---|
| 5. | Равенство интенсивности световых импульсов, поступающих на все ФЭУ. |
| 6. | Возможность калибровки на пучке частиц (на ускорителе). |

Лазерная система калибровки предназначена для настройки и калибровки двадцати четырёх временных каналов детектора Т0 с временным разрешением не хуже 50 пс. Основой лазерной системы калибровки является импульсный лазер PIL40G фирмы Advanced Photonics Systems APhS GmbH с длительностью светового импульса менее 40 пс на длине волны 408 нм, что соответствует диапазону спектральной чувствительности используемого в качестве детектора ФЭУ-187 с кварцевым радиатором.

Кроме выравнивания временных и амплитудных параметров отдельных каналов детектора Т0 при настройке детектора в целом необходимо выставить все регулируемые параметры, обеспечивающие синхронность работы Т0-А и Т0-С плеч детектора: дополнительные задержки, пороги срабатывания формирователей, временные и амплитудные диапазоны выработки триггерных сигналов. Для такой настройки необходимо применять лазерную систему с разветвлением светового сигнала на все 24 фотоумножителя.

Особенностью работы лазерной системы калибровки детектора Т0 является возможность синхронизации световых импульсов как с синхронизирующим сигналом ускорителя, так и с эквивалентным сигналом, заменяющим его в лабораторных условиях. Во время эксперимента можно осуществлять проверку работоспособности детектора при применении лазерной системы в периоды отсутствия пучка. Запуск лазера будет осуществляться по команде с центрального триггерного процессора и будет синхронизован с сигналом ускорителя (разработанная лазерная система обеспечивает работу в таком режиме).

Функциональная схема лазерной системы калибровки детектора Т0 представлена на рис. 4.11. Лазер запускается внешним сигналом, поступающим через интерфейсный блок от системы «slow control» в лаборатории для обеспечения режимов работы электронных узлов, близких к получаемым в эксперименте.

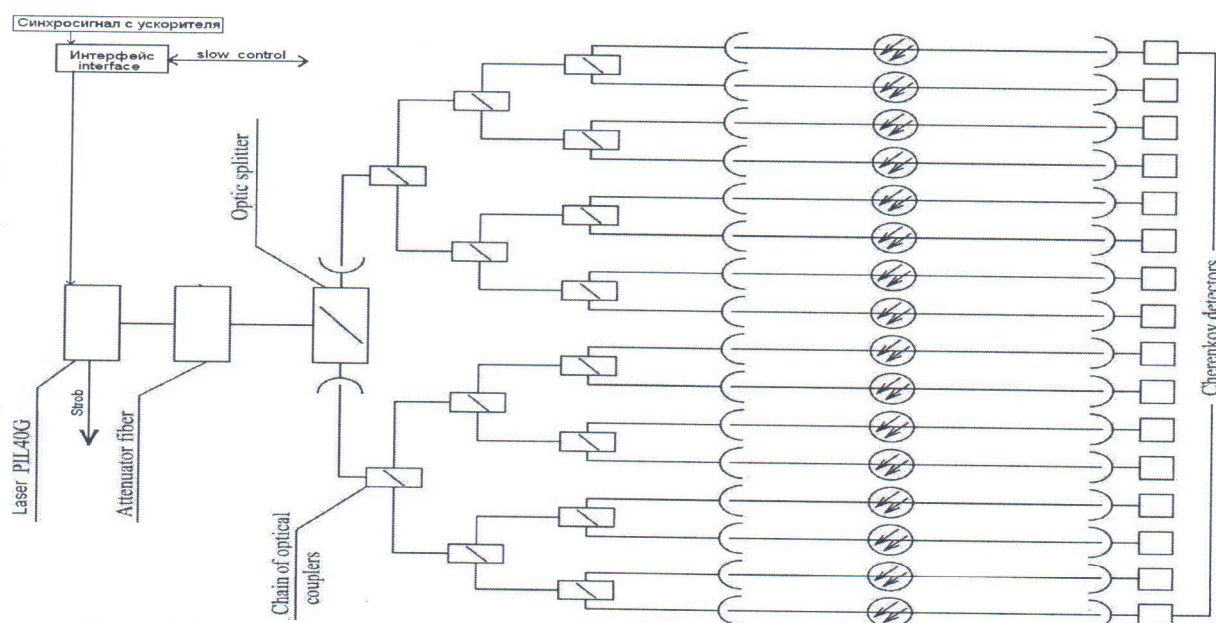


Рис. 4.11. Функциональная схема системы лазерной калибровки.

Импульсный лазер подключается к оптоволоконной системе, состоящей из оптического аттенюатора и системы оптических делителей, с помощью которых световые импульсы подаются на все 24 счётчика одновременно.

Световая вспышка с выхода лазера через фокусирующее устройство поступает на оптический аттенюатор, позволяющий регулировать амплитуду импульсов в широком диапазоне амплитуд. С выхода аттенюатора сигнал проходит на оптический делитель, содержащий оптическую пластину, разветвляющую импульсный сигнал с малыми потерями на два эквивалентных канала. После разветвления импульсного сигнала на 24 канала передача их к черенковским детекторам осуществляется с помощью оптоволоконных кабелей фирмы OZ Optic LTD. Для подачи оптических импульсов на черенковский детектор был разработан специальный узел сопряжения. Он состоит из направляющей втулки на крышке детектора, в которой с помощью гайки фиксируется наконечник оптического волокна. Такая конструкция обеспечивает быструю замену подводящего отрезка волокна, а также ввод света перпендикулярно плоскости радиатора черенковского детектора.

Применение тонкого оптического волокна с диаметром защитной оболочки 0,9 мм позволило значительно уменьшить затеняемую узлом ввода площадь радиатора и уменьшить радиус изгиба оптического волокна.

4.2. Методика настройки стартового детектора T0.

Процедура настройки подразумевает, что в результате работы будет полностью отлажена вся электроника, выявлены и устранены все недостатки, выравнены все задержки в каналах. Таким образом, с помощью лазера будет полностью промоделирована работа детектора, получены основные калибровочные характеристики:

- амплитуды сигналов с фотоумножителей;
- зависимости задержек и временного разрешения CFD и LED от амплитуды входных сигналов (для амплитудно-временной коррекции);
- характеристики QTC преобразователей;
- построены графики амплитудно-временной коррекции по двум каналам CFD-LED и QTC.

Однако, выравнивание задержек при помощи лазера имеет только методический характер – в эксперименте, когда фотоумножители будут срабатывать от частиц, настройка одновременности каналов нарушается, т.к. моменты срабатывания ФЭУ от частиц не соответствуют моментам срабатывания от вспышки лазера (невозможно обеспечить одновременность прихода сигналов от частицы и от вспышки лазера – оптические пути в одном случае, отсутствие – во втором). Пользуясь результатами калибровки на вспышке лазера и графической амплитудно-временной коррекцией, на тестовом пучке частиц придётся полностью перестраивать и корректировать задержки в каналах, выравнивая их с точностью до 10 пс.

С помощью высокочастотных кабелей будет компенсироваться расстояние

(3,5-0,7) м, на которое отличается положение сборок детектора T0-A и T0-C. Кабели подбираются так, чтобы сигналы с детекторов приходили в одно и тоже время с точностью 0,5 нс (около 10 см).

Процедуру настройки детектора придется проводить несколько раз:

1. **В отсутствие магнитного поля.** Необходимо настроить систему и проверить характеристики и соответствие работы всех модулей. Эта процедура будет проводится сначала в лаборатории, непосредственно перед погрузкой всей аппаратуры в шахту и после транспортировки и установки детектора T0 в эксперимент ALICE, и может занять достаточно длительное время.

2. **После включения магнита.** С помощью импульсного лазера процедуру настройки детектора необходимо повторить. При включении магнитного поля амплитуды сигналов с фотоумножителей уменьшатся для каждого ФЭУ индивидуально. Для того, чтобы сохранить одинаковыми амплитуды, придётся менять напряжение на ФЭУ, что неизбежно приведёт к незначительному изменению задержек (до 0,3 нс) в каналах. Экспериментальное время, отведенное на этот этап настройки, очень ограничено, поэтому процедура должна быть отработана чётко.

3. **После включения магнита.** На тестовом пучке частиц с помощью модуля DCDL-4 будет проводится корректировка задержек в каналах (моменты срабатывания ФЭУ от частиц не соответствуют моментам срабатывания от вспышки лазера). Будут набираться первые калибровочные данные.

Работы по проверке подсистем детектора проводились в течение года, отработывался процесс настройки и калибровки перед спуском в экспериментальную зону установки ALICE. Система лазерной калибровки используется при настройке и будет функционировать до появления частиц и когда появятся частицы (лазер будет запускаться в промежутках между циклами ускорителя на время порядка 1 мкс).

Процедура настройки подсистем детектора T0 состоит из:

- I. Большого предварительного этапа измерений характеристик отдельных составных частей детектора.
- II. Настройки как отдельных модулей быстрой frond-end электроники, так и системы в целом.

Предварительный этап настройки детектора.

Для выставления напряжений на всех ФЭУ таким образом, чтобы при одинаковом световом потоке, соответствующему регистрации однозарядной релятивистской частицы (MIP), амплитуда сигнала равнялась 50 мВ, вначале нужно установить эквивалентный световой поток. С этой целью один из фотоумножителей - «образцовый» калибровался на пучке релятивистских заряженных частиц. Определялось напряжение питания, при котором сигнал на выходе ФЭУ равнялся 50 мВ. Затем этот «образцовый» фотоумножитель соединялся с лазерной системой калибровки и после выставления ранее определённого напряжения питания подбирались интенсивность вспышки, при которой амплитуда сигнала равнялась 50 мВ. Таким образом, световой поток от импульсного лазера равнялся световому потоку от черенковской вспышки.

Далее процедура проводилась следующим образом: световой поток с одного световода (чтобы световой путь был одинаков) лазерной системы подавался по очереди на каждый из 24 фотоумножителей. При одинаковом световом потоке подбирались и фиксировались напряжения на ФЭУ так, чтобы амплитуды были одинаковыми - 50 мВ. При сборке всей системы амплитуды могут разойтись на 10-20 %, поэтому динамический диапазон лазерного света несколько расширен. С помощью оптического аттенюатора лазерной системы подбирался световой поток таким образом, чтобы он давал амплитуду в 50 мВ в геометрии детектора T0. Как было установлено, это соответствует 21 дБ ослабления световой вспышки от лазера P1L40G. После подключения 24 световодов к фотоумножителям и подачи светового потока проверялось, что амплитуды сигналов с каждого ФЭУ соответствуют калибровочному значению.

Если бы оказалось, что световые потоки разные и отличаются сильно, тогда понадобилось бы для каждого фотоумножителя записывать положение оптического аттенюатора – это сильно бы осложнило процесс калибровки. Однако выяснилось, что оптическая система была выполнена качественно. После тщательной проверки разброс световых потоков оказался порядка 10 %, что даёт возможность калибровать систему при одном значении положения аттенюатора (21 дБ). Учитывая, что разброс световых потоков в процессе эксплуатации может изменяться (изменился коэффициент усиления ФЭУ или помутнел радиатор) и световой поток может уменьшиться со временем (например, из-за старения световодов), предполагается установить порог на формирователе CFD в 25 - 30 мВ для того, чтобы в любом случае регистрировать сигналы. Проверку, что произошло с ФЭУ или радиатором возможно провести только на частицах, поскольку на заряженных частицах в протон - протонной моде сигнал от фотоумножителя в 95% случаев соответствует 1 MIP (минимально ионизирующей частице). При запуске от световой вспышки лазера и на частицах в р-р столкновениях можно проверить, как сдвинется амплитуда. Если при калибровке на лазере амплитудный спектр сместится, а на частицах – положение спектров не изменится, это говорит о том, что произошли изменения в лазерной системе. Если обнаружится, что спектры от лазера и от частиц сдвинутся – это говорит об изменениях характеристик ФЭУ, радиатора, или, возможно, нарушился оптический контакт. Выход из такой ситуации есть – поднять напряжение на фотоумножителях в пределах характеристик, определяемых заводом - изготовителем.

Радиационное старение каналов лазерной системы может проявиться в процессе длительной эксплуатации детектора. Вышедшие из строя счётчики (или блоки электроники) можно будет заменять, но не чаще, чем 1 раз в год. До замены неисправных частей системы предусмотрена возможность поканального отключения.

Алгоритм настройки подсистем детектора T0.

Как уже говорилось, в процессе многократных настроек и калибровок детектора был выработан окончательный алгоритм настройки детектора T0. Он сводится к следующему:

1. Настройка детекторов.

1.1. Проверяется, что все световоды подключены к соответствующим разъёмам.

1.2. При выключенном лазере подаётся высокое напряжение на ФЭУ, проверяются установившиеся значения токов и напряжений.

1.3. На свободные выходы с Shoe-box (выходы после усиления) ставятся заглушки в 50 Ом.

1.4. С помощью осциллографа проверяется наличие шумовых импульсов на выходах всех фотоумножителей (амплитуда шумовых импульсов на нагрузке 50 Ом должна составлять не более 10 мВ).

1.5. После включения лазера с частотой 1 кГц, оптический аттенуатор устанавливается на 21 дБ (что соответствует сигналу от 1 МР). Проверяется, что при таком включении амплитуда импульсов со всех фотоумножителей на нагрузке 50 Ом составляет $50 \text{ мВ} \pm 10\%$. Повторяются измерения для световых импульсов 10 МР (500 мВ) и 100 МР (5В).

2. Настройка электроники.

2.1. Проводится проверка работоспособности разветвителей FANOUT. С точностью лучше, чем 1 мВ, уровень смещения устанавливается максимально близким к нулю на всех выходах разветвителя.

2.2. После подачи на входы разветвителей FANOUT сигналов с Shoe-box (с фотоумножителей сигналы подаются на Shoe-box) повторно проверяется уровень смещения на всех выходах разветвителя. Это важно, т.к. уровень смещения влияет на работу формирователей временной отметки CFD 454. Небольшое смещение в несколько мВ можно скомпенсировать непосредственно в формирователе.

2.3. Проверяется, что амплитуда и форма сигналов на выходах разветвителя FANOUT соответствует входным импульсам.

2.4. Соединение выходов разветвителей со входами CFD (выход_1), LED (выход_2), MPD (выход_3), QTC (выход_4) осуществляется кабелями одинаковой длины.

2.5. Согласно схеме рис. 1.31 (рис. 3.10, поканальное подключение) осуществляется соединение модулей (используется одинаковая длина кабелей для каждой группы блоков).

2.6. Производится синхронизация световых импульсов лазера с сигналом, заменяющим синхросигнал с ускорителя в лабораторных условиях.

2.7. С модуля CPDRM (Clock Pulse Distribution Readout Module) и модуля-распределителя Gate Reference Point Generator (рис. 1.31) синхросигнал разветвляется на модули: OR (CLK), MPD (Gate), TVDC (Gate), QTC (Gate,)

2.8. При настройке всей системы проводится выравнивание задержек во всех двенадцати каналах T0-A сборки детектора (для сборки T0-C аналогично). Выравнивание осуществляется для нормальной работы модулей QTC и MPD (необходимо совпадение всех импульсов с синхросигналом ускорителя или эквивалентным ему).

2.9. Выравнивание задержек осуществляется по сигналам с ФЭУ при работе лазера на выходах FANOUT (или на выходах LED) при подаче на входы

сигналов с амплитудой 10 МР (около 0,5 В). Компенсируется разброс задержек в лазерной системе, контроль осуществлялся с помощью осциллографа с точностью до 200 пс. (Разброс не должен превышать 4 нс – длительности «ВОРОТ» внутри модуля OR).

2.10. При настройке формирователей временной отметки CFD 454 порог срабатывания устанавливается на уровне 20 мВ (сначала аппаратно), значения проверяются мультиметром. (В дальнейшем предусматривается использование дистанционного управления порогами по CANBUS). При необходимости выставить и проверить пороги можно при помощи осциллографа. Уменьшив вспышку до 0,5 мВ, фиксируется, при каких амплитудах срабатывает CFD 454 (осциллограф запускается выходным сигналом с CFD, сигнал с фотоумножителя снимается на выходе разветвителя FANOUT).

2.11. Под форму сигнала с фотоумножителя подбирается задержка формирователя (DL рис. 3.25), вводимая в виде кабеля – наиболее оптимальная на данном этапе составляет 2 нс.

2.12. При включенных ФЭУ и работающей лазерной системе проверяется работа каждого канала CFD 454 при вспышке 1, 10, 100 МР.

2.13. Для организации считывания амплитудной информации проводится настройка формирователей с постоянным порогом LED V895. Для всех входов с помощью специальной программы устанавливается порог регистрации. Выходы LED соединяются с преобразователями уровней 726 Level Translator.

2.14. Проверяется наличие сигналов на выходах преобразователей уровней 726 Level Translator при включенном лазере и питании на ФЭУ.

2.15. Выходы временных формирователей CFD 454 и LED V895 подключаются к преобразователям уровней NIM-LVDS. Сигналы с выходов преобразователей поступают в систему считывания данных на входы TDC.

2.16. Измеряются зависимости задержек формирователей CFD 454 и LED V895 от амплитуд сигналов для всех 24 каналов и информация заносится в таблицы для проведения амплитудно-временной коррекции.

2.17. На управляемые линии задержек DCDL-4 от персонального компьютера с помощью специальной программы подаётся код времени равный 2 нс (во все каналы одинаковый).

2.18. Проверяется наличие сигналов на всех выходах блоков задержек. Сигналы с выходов DCDL-4 проходят на преобразователи уровней NIM-LVDS, после чего поступают в систему считывания данных.

2.19. Проверяется разброс времени прихода сигналов на модуль OR с линий задержек DCDL-4 (должен быть в пределах 4 нс). В некоторых каналах в процессе подстройки задержки будут изменены. Для контроля сигналы с линий задержек DCDL-4 поступают в систему считывания информации.

2.20. При настройке модуля OR на 12 входов подаются сигналы с модулей DCDL-4, на тактовый вход подаётся синхросигнал (тот же сигнал, что и использовался для запуска лазера). Выравнивание всех 12 сигналов на выходе OR осуществляется относительно одного из сигналов T0-A сборки (аналогично для T0-C сборки). Оба модуля OR_A и OR_C должны запускаться от одного синхросигнала. Проверяется, чтобы все входные сигналы, поступающие в

модули OR, попадая в «ВОРОТА» длительностью до 4,5 нс, проходили на выход. (При отсутствии синхросигнала на тактовом входе – сигналов на выходах OR не должно быть).

Методика измерений и проверки функциональной способности модуля OR заключается в следующем: по очереди с помощью специально разработанной программы открывается только один канал (остальные одиннадцать входов блокируются). Задержки для каждого канала на выходе OR выставляются примерно одинаковыми по осциллографу (грубо). Затем измеряется и записывается через систему считывания данных положение сигнала на выходе OR - фиксируется номер канала считывания. Считывание осуществляется через один канал время - цифрового преобразователя TDC, поскольку сами каналы TDC имеют не одинаковую задержку!

С помощью разработанных управляемых линий задержек DCDL-4 при поочерёдном открытии входов в модуле OR во всех 12 каналах (одной сборки) задержки сигналов выравниваются с погрешностью ± 10 пс (контролируется номер канала считывания). Так происходит выравнивание для 12 каналов T0-A сборки и отдельно выравнивание для 12 каналов T0-C сборки.

После того, как положения всех сигналов на выходе OR_A (или OR_C) для каждого конкретного входа определено, все двенадцать входов модуля открываются и в таком (нормальном) режиме работы снова измеряется положение на временной оси сигнала с выхода OR. На пучке частиц процедуру придется повторять неоднократно: открывать входы по очереди и фиксировать положение (номер канала на временной оси) выходного сигнала с модуля OR.

2.21. Сигналы с модулей OR_A и OR_C поступают на усреднитель временных интервалов «Mean Timer», с выхода которого сигнал заводится в систему считывания данных. (Результаты калибровки модуля «Mean Timer» будут приведены в разделе 4.3).

2.22. При настройке QTC на соответствующие входы подаются сигналы с разветвителя FANOUT и синхросигнал Gate от модуля Gate Reference Point Generator на вход strobe. С помощью кабельных линий задержки синхросигнал Gate устанавливается таким образом, чтобы аналоговые сигналы попадали во время действия разрешающих сигналов «ворот».

2.23. На выходах QTC проверяется наличие сигналов. Выходные сигналы СТАРТ и СТОП поступают на преобразователь уровней NIM-LVDS. Сигналы с выходов преобразователей поступают в систему считывания данных на входы TDC с высоким временным разрешением. Измеряются характеристики всех 24 каналов QTC и записываются в таблицы.

2.24. После определения необходимых задержек в каждом канале (полной настройки системы) переменные линии задержки заменяются на кабели нужной длины.

2.25. Блок MPD подключается к разветвителю FANOUT специальным кабелем, сигнал с модуля Gate Reference Point Generator через кабельную линию задержки подаётся на соответствующий вход. Устанавливаются необходимый режим работы и пороги срабатывания. (MPD вырабатывает два логических сигнала, соответствующие центральным и полуженральным

столкновениям). Сигнал малой множественности $T0_{mb}$ (Minimum bias) определяется по команде центрального триггерного процессора и идентичен сигналу $T0_v$.

2.26. Входы блока TVDC подключаются к выходам модулей OR_A и OR_C , устанавливается максимальное временное окно отбора событий (диапазон кодируемых интервалов $\pm 2,5$ нс (5 нс)). При синхронизации срабатывания модулей OR и использовании кабелей одинаковой длины от OR до TVDC – блок TVDC должен срабатывать.

2.27. На соответствующий вход T0 Trigger Unit (логического модуля формирования триггерных сигналов) подается синхросигнал CLK (Clock). С помощью кабельных линий задержки подгоняются сигналы с выходов OR_A , OR_C , MPD, TVDC, которые должны приходить между двумя соседними импульсами CLK. Проверяется наличие сигналов на выходах модуля TOTU.

2.28. Сигналы с блоков DCDL-4, OR_A , OR_C , MPD, TVDC подаются в преобразователи уровней NIM-LVDS. Сигналы с выходов преобразователей подаются в систему считывания данных.

2.29. Для визуального контроля аппаратуры сигналы с преобразователями уровней 726 Level Translator поступают на входы 32 канального модуля Scaler V830 (рис. 1.31).

3. Настройка системы сбора данных.

Сложной, кропотливой является работа по подключению к системе сбора данных – DAQ, интегрированной в эксперимент ALICE, и настройке каналов считывания, подготовке панелей управления модулями front-end электроники. Это отдельная большая работа, сделанная не автором, не входит в содержание настоящей работы.

Алгоритм настройки детектора T0 в процессе работы на ускорителе.

В процессе эксплуатации детектора настройка подсистем сводится к проверке амплитуд сигналов, выравниванию задержек во всех каналах T0-A и T0-C сборок с помощью модулей DCDL-4, изменению порогов регистрации частиц в MPD для каждой конкретной моды (ионной или протон - протонной), изменению порогов в TVDC.

После включения магнита с помощью лазера процедура настройки несколько сократиться. Из выше перечисленных пунктов будут осуществляться:

п. 1.5 - повторный подбор напряжений на всех ФЭУ (амплитуды должны быть около 50 мВ), т.к. после включения магнита амплитуды уменьшатся;

п. 2.6 - синхронизация световых импульсов лазера с сигналом ускорителя;

п. 2.8 - выравнивание задержек во всех каналах для T0-A и T0-C сборок детектора (необходимо совпадение всех импульсов с синхросигналом ускорителя);

п. 2.9 - повторное выравнивание задержек, т.к. после включения магнита сигналы неизбежно разойдутся во времени;

п. 2.12 - проверка работы каждого канала CFD 454 при вспышке 1, 10, 100 MIP при включенных ФЭУ и лазерной системе;

п. 2.16 - измерение зависимостей задержек формирователей CFD 454 и LED V895 (калибровочные характеристики) от амплитуд сигналов для всех каналов под влиянием магнитного поля. Информация заносится в таблицы для проведения амплитудно-временной коррекции.

п. 2.20 - проверка прихода сигналов на модуль OR с линий задержек DCDL-4 (по необходимости будет происходить коррекция и выравнивание);

п. 2.22 - проверка, что аналоговые сигналы приходят во время действия ворот (в период действия синхросигнал Gate);

п. 2.23 - измерение характеристик всех 24 каналов QTC (данные записываются в таблицы);

п. 2.25 - устанавливаются необходимый режим работы и пороги срабатывания MPD, соответствующие двум уровням множественности.

п. 2.27 - проверяется, что сигналы с выходов OR_A , OR_C , MPD, TVDC, поступают между двумя соседними импульсами CLK (Clock). Контролируется наличие сигналов на выходах модуля T0 Trigger Unit.

Подготовка аппаратуры и проведение калибровочных измерений одна из важных задач эксперимента.

Процедура калибровки детектора T0 включает в себя:

I. Измерение характеристик отдельных модулей.

II. Набор данных и получение характеристик системы в целом. Измерение амплитудных спектров.

Калибровка подсистем детектора будет проводиться непрерывно, в промежутках между циклами ускорителя. Результаты предварительной калибровки на вспышке лазера приводятся в разделе 4.3.

4.3. Методы и результаты калибровки детектора T0.

Выравнивание задержек в каналах проводилось с помощью модуля логического отбора сигналов OR согласно п. 2.20. Многочисленные измерения показали, что модуль OR функционирует правильно и выбирает действительно первый из всех сигналов пришедших на вход (если этот сигнал попадает в пределах «ВОРОТ» до 4,5 нс). Согласно измеренным данным определить первый из двух пришедших сигналов можно с точностью не более 30 пс (24,4 пс – цена канала в системе считывания данных). Разброс на 1 - 2 канала не страшен, т.к. это даёт ошибку в определении вершины взаимодействия 1,5 - 2 см при сигме 5,6 см.

Данные калибровки усреднителя временных интервалов «Mean Timer».

В процессе настройки проводилось тщательное исследование характеристик усреднителя временных интервалов «Mean Timer», который должен будет выдавать абсолютную временную привязку. Методика измерений проходила в два этапа: первый - на два входа усреднителя временных интервалов «Mean Timer» подавались 2 сигнала, приходящие одновременно (в оба канала устанавливался с помощью модуля управляемых линий задержек

DCDL-4 одинаковый код задержки, и одновременность прихода сигналов проверялась с помощью системы считывания данных). В первом канале время задержки сигнала увеличивалось на 500 пс, 1 нс, 1,5 нс и т.д. до 10 нс, во втором – оставалось неизменным. Анализ обработанных данных показал, что сигнал на выходе «Mean Timer» приходит в соответствии с входным через 250 пс, 500 пс и т.д., то есть модуль выполняет своё предназначение - усредняет временные интервалы прихода сигналов согласно функции $(T0_A + T0_C)/2$.

Проводилось исследование симметричности входных каналов «Mean Timer»: в первом канале время задержки оставалось постоянным, во втором - увеличивалось с шагом 500 пс до тех пор, пока позволял динамический диапазон управляемых линий задержек DCDL-4. На рис. 4.31 представлены результаты обработки данных: по оси x - программно установленное время задержки сигнала в пс в одном из каналов, по оси y - время, реально получаемое из системы сбора данных. Аналогичная характеристика была получена и для случая, когда в первом канале время задержки увеличивалось с шагом 500 пс, а во втором - оставалось постоянным, т.е. входные каналы «Mean Timer» можно считать симметричными.

Второй этап измерений характеристик усреднителя временных интервалов «Mean Timer» проходил следующим образом: на оба входа подавались 2 сигнала, приходящие одновременно, в первом канале время задержки сигнала увеличивалось на 50 пс, 100 пс, и т.д., во втором – уменьшалось на тоже самое значение и так до тех пор, пока сигналы перекрывались. Сигналы, поступающие на оба входа усреднителя временных интервалов, записывались в систему считывания данных. После обработки записанных данных была получена характеристика «Mean Timer», представлена на рис. 4.32. На этом же рисунке представлено поведение входных

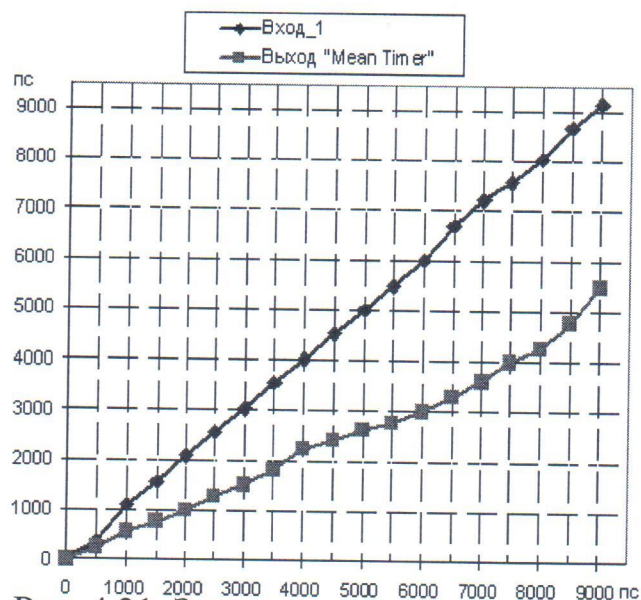


Рис. 4.31. Зависимость выходного сигнала с «Mean Timer» от входного.

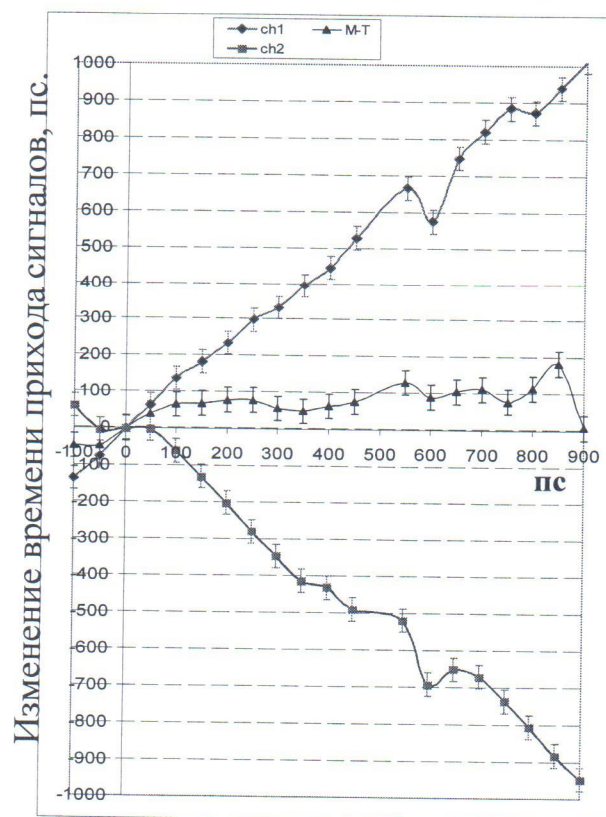


Рис. 4.32. Зависимость задержки прихода сигналов входных ch1, ch2 и выходного с «Mean Timer» от установленного времени задержки.

сигналов ch1 и ch2, снимаемое непосредственно с выходов модуля управляемых линий задержек DCDL-4. По оси x - время в пикосекундах, добавляемое в первый канал и вычитаемое из второго, по оси y - время в пикосекундах: положительная шкала – изменение времени прихода сигнала на первый вход усреднителя временных интервалов после увеличения задержки, отрицательная шкала – изменение времени прихода сигнала на второй вход после уменьшения задержки. Чёрный график с погрешностью измерения ($\sigma = 34$ пс), расположенный посередине рис. 4.32 – характеристика разработанного при непосредственном участии автора усреднителя временных интервалов «Mean Timer». Из приведенной характеристики следует, что в диапазоне изменения задержек до 800 пс, что соответствует сдвигу вершины события в 23 см или 4σ (разброс точки столкновения частиц $\sigma = 5,6$ см), с учётом дифференциальной нелинейности самих линий задержек, изменение положения сигнала «T0» не превышает ± 20 пс, что удовлетворяет требованиям эксперимента.

Метод измерения заряда и данные калибровки QTC.

В процессе разработки детектора T0 были рассмотрены два варианта измерения амплитуды сигналов с фотоумножителей:

- измерение разности моментов срабатывания формирователей со следящим и с постоянным порогом;
- измерение заряда.

Электронный модуль QTC для измерения заряда был разработан в ИЯИ, тестирование осуществлялось сначала в МИФИ. Принцип действия основан на накоплении заряда за время действия «ВОРОТ» (время, несколько превышающее длительность импульса с фотоумножителя) с последующим разрядом. С помощью двух дискриминаторов фиксировались моменты начала заряда и конец разряда, интервал между этими импульсами пропорционален амплитуде измеряемого импульса. Таким образом, осуществлялось преобразование заряда во временной интервал.

На рис. 4.33 представлена схема тестирования преобразователя QTC.

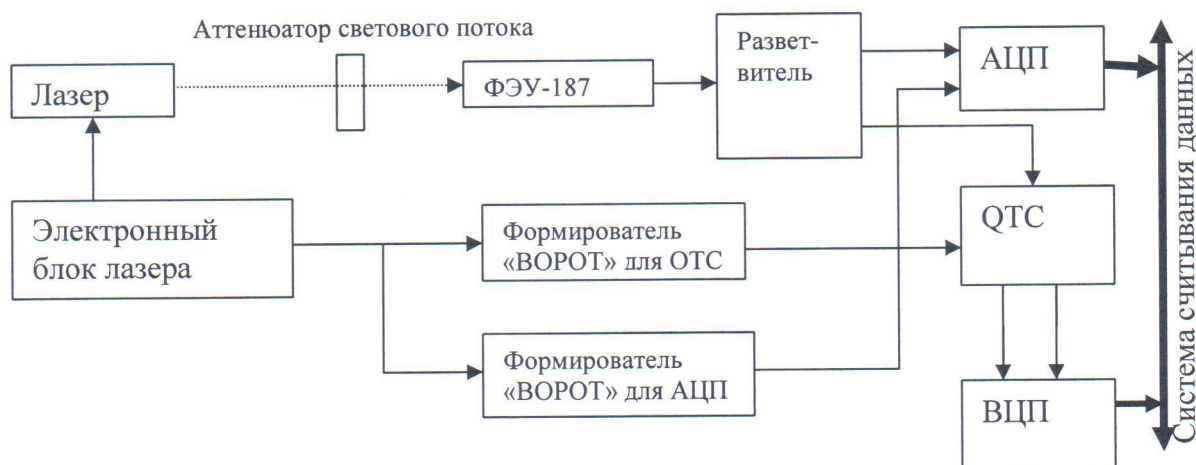


Рис. 4.33. Блок-схема установки для тестирования модуля QTC.

Для тестирования сначала применялся импульсный полупроводниковый лазер с длительностью импульса 70 пс. Световой импульс поступал на фотокатод ФЭУ-187 через аттенюатор, плотность которого циклически изменялась в 1000 раз, т.е. амплитуда импульса с фотоумножителя также изменялась в 1000 раз. Амплитуда импульса с фотоумножителя измерялась с помощью АЦП (ADC 2249A LeCroy) и с помощью тестируемого модуля. На выходе QTC возникали два сигнала «СТАРТ» и «СТОП», интервал между которыми (пропорциональный заряду во входном импульсе) измерялся с помощью ВЦП, собранном на время-амплитудном преобразователе CANBERRA 2145 и АЦП 712 (Polon). Информация считывалась одновременно для каждого события с АЦП и ВЦП, что позволило построить зависимость измеряемого временного интервала между выходными импульсами с QTC от истинной амплитуды (характеристика, аналогичная рис. 3.32).

При калибровке QTC в ЦЕРН, в июне 2007 года, после настройки всей системы были получены временные спектры, измеренные при засветке фотокатода ФЭУ-187 импульсами с лазера, соответствующими регистрации одной минимально ионизирующей частице (1 МИР), двум, трём и т.д. до 100 МИР. На рис. 4.34 (а, б) приведены спектры для 1 – 10 МИР (рис. 4.34, а), для 10 МИР – 100 МИР (на рис. 4.34, б).

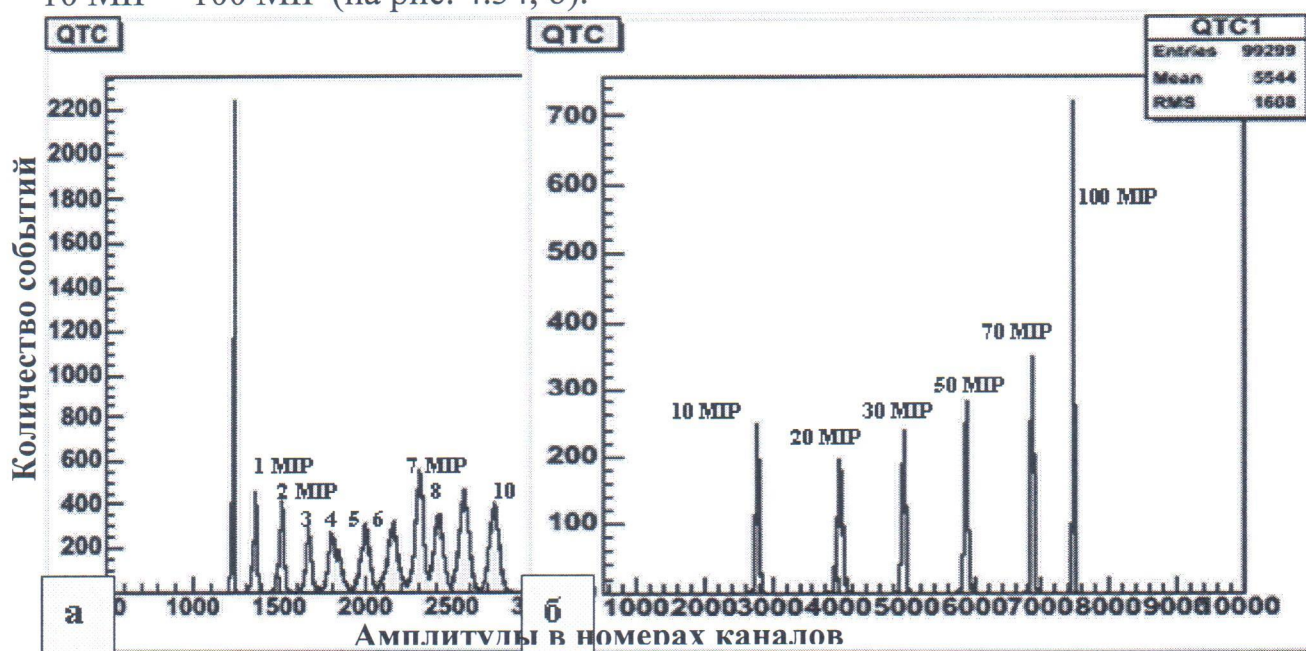
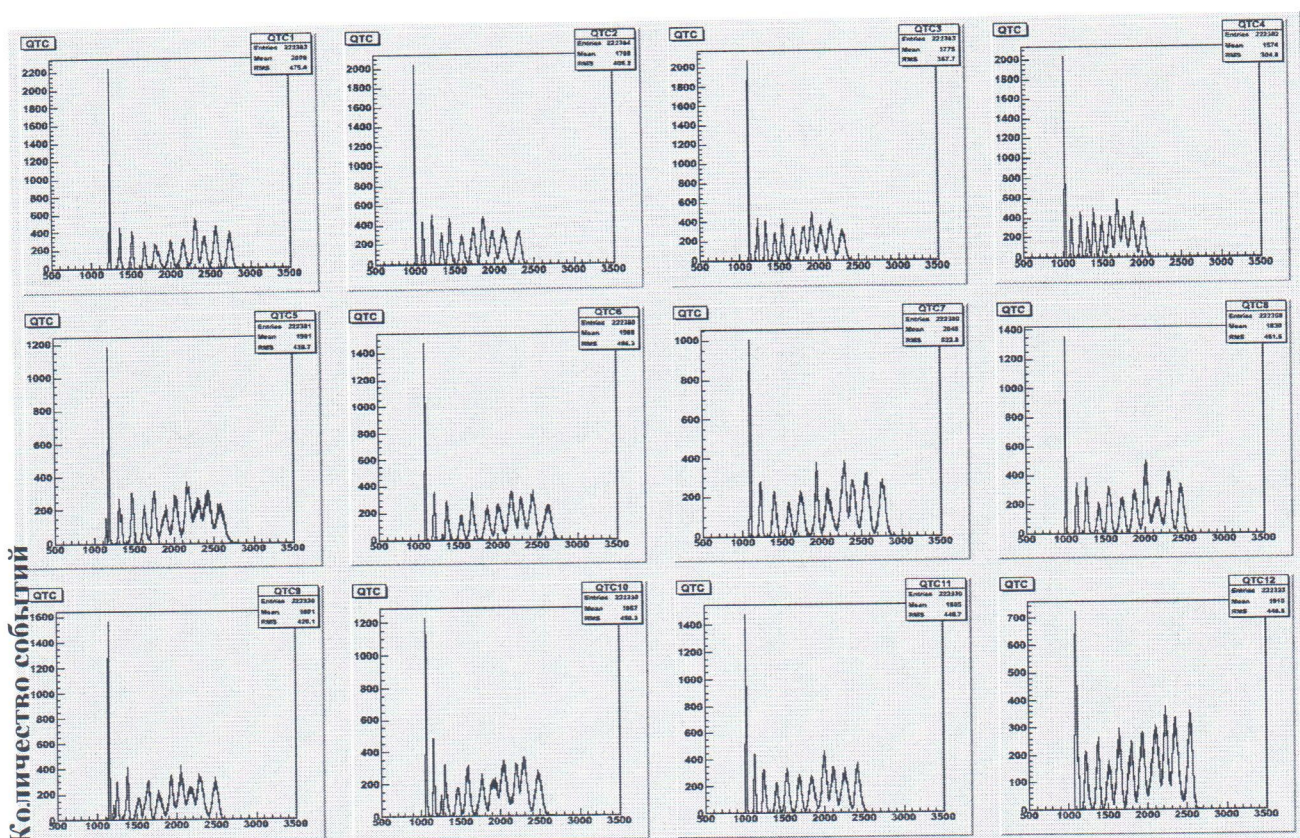


Рис. 4.34. Зависимость положения максимума спектра от амплитуды входных сигналов для одного канала QTC преобразователя: а) 1-10 МИР, б) 10-100 МИР.

Подобные характеристики для 12 каналов Т0-А сборки представлены на рис. 4.35 (аналогичные спектры были получены для других двенадцати каналов Т0-С сборки).



Амплитуды в номерах каналов

Рис. 4.35. Зависимость положения максимума спектра от амплитуды входных сигналов (1-10 МР) для 12 QTC преобразователей.

На рис. 4.36 представлена зависимость временного интервала между выходами преобразователя QTC от амплитуды входных сигналов (одного канала), полученная после обработки данных калибровки (аналогичная рис. 3.32).

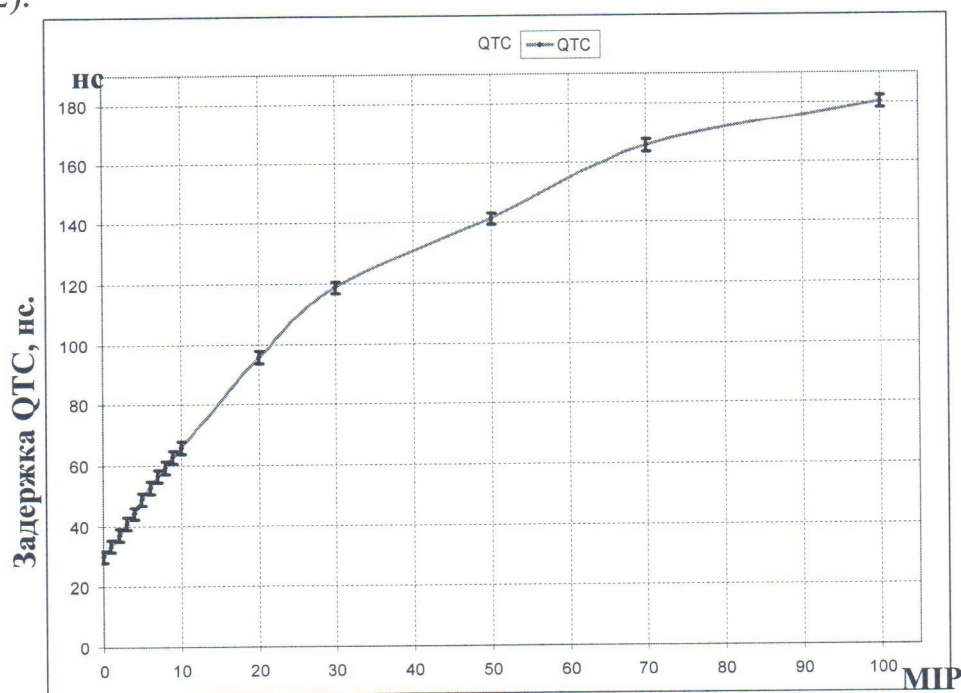


Рис. 4.36. Зависимость положения временного интервала с QTC от амплитуды входных сигналов.

Применение QTC позволяет более эффективно проводить измерения в широком диапазоне амплитуд, однако применение этого метода из-за низкого быстродействия возможно только при регистрации ион - ионных столкновений с периодом 125 нс.

Калибровка формирователя с постоянным порогом LED V 895.

Для измерения амплитуды сигналов с фотоумножителей в области малых значений амплитуд в режиме протон - протонных столкновений с интервалом между столкновениями 25 нс автором был предложен быстрый метод преобразования (CFD-LED), основанный на разности моментов срабатывания формирователей временной отметки двух типов: с постоянным и со следящим порогом (более подробно описан в главе 3). В составе детектора T0 формирователи со следящим порогом есть в каждом канале, т.е. для каждого фотоумножителя, поэтому для реализации этого метода достаточно ввести в состав электронной системы детектора стандартный блок формирователей-дискриминаторов. Для детектора T0 в качестве формирователей с постоянным порогом был выбран управляемый 16-канальный модуль LED V895 фирмы С.А.Е.Н. в стандарте VME, пороги срабатывания которого можно регулировать дистанционно. Выходные сигналы с LED поступают в систему считывания данных на TDC.

В результате калибровки детектора T0 в июне 2007 года были получены характеристики (каждого канала) при применении быстрого метода преобразования CFD-LED. На рис. 4.37 представлены амплитудные спектры для области малых амплитуд 1 - 10 MIP с двенадцати каналов.

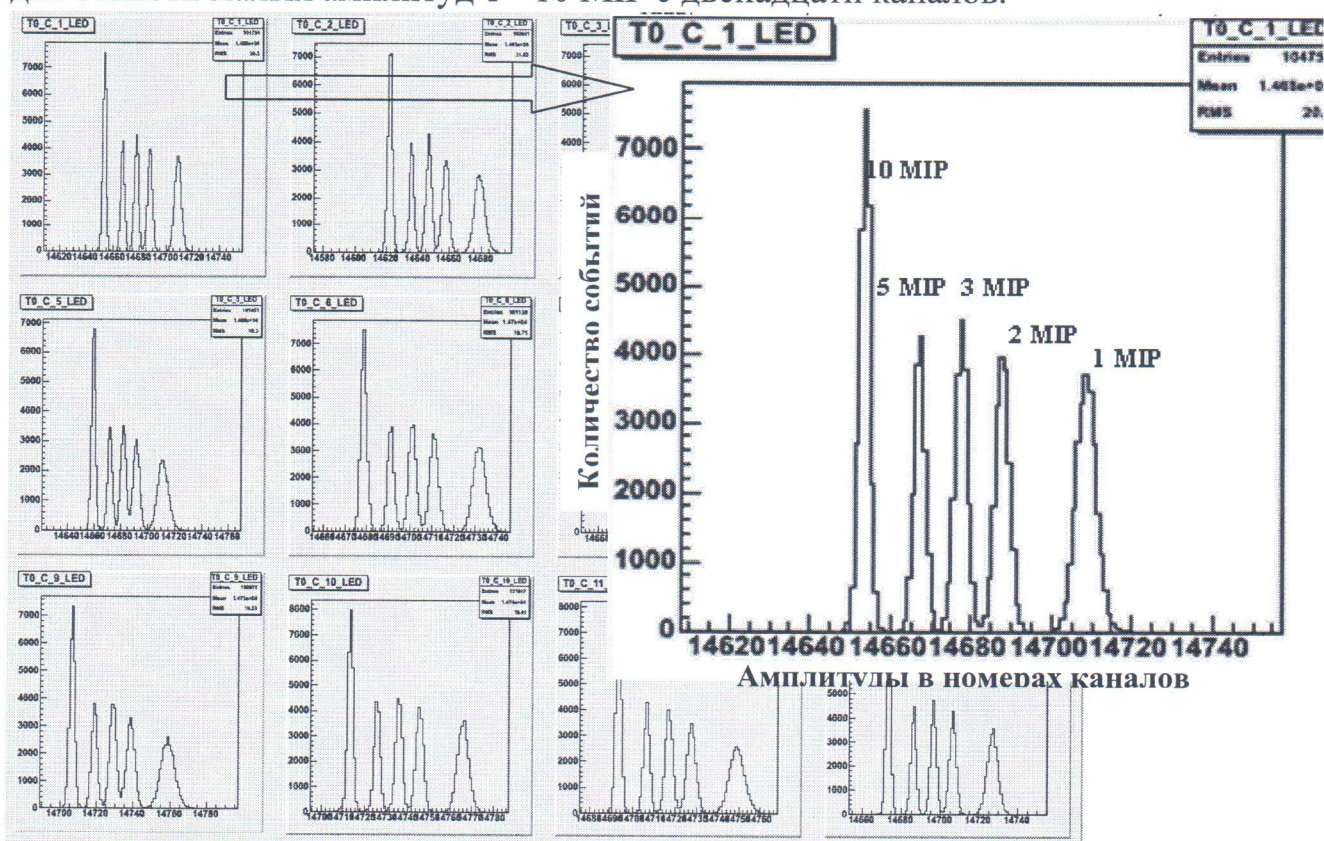


Рис. 4.37. Зависимость положения максимума спектра от амплитуды входных сигналов в диапазоне 1-10 MIP для 12 каналов.

Аналогичные характеристики были получены для других 12 каналов Т0-С сборки.

Типичная характеристика LED V895 в диапазоне 1 - 10 МП для одного канала представлена на рис. 4.38 (зависимость задержки срабатывания от амплитуды входных импульсов).

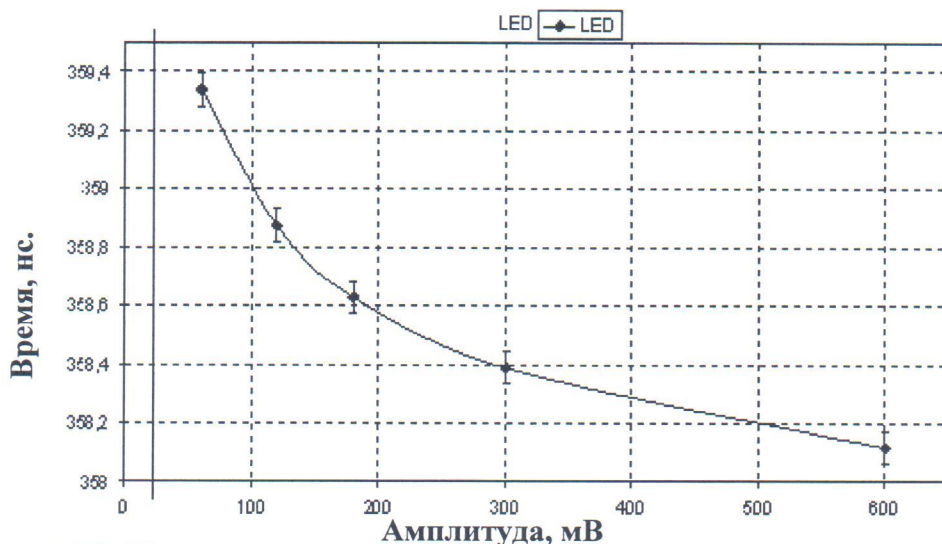


Рис. 4.38. Изменение задержки выходного сигнала формирователя LED V895 от амплитуды входного сигнала.

Из рис. 4.37 видно, что в области малых амплитуд с применением метода измерения амплитуды с помощью LED можно проводить достаточно точные измерения при низком (20 мВ) пороге формирователя (1, 2, 3 МП различаются хорошо). При больших значениях амплитуд входных сигналов, зависимость задержки времени срабатывания формирователя LED от амплитуды выходит на плато. Метод измерения амплитуд CFD-LED применим в детекторе Т0 при регистрации частиц, рождённых в протон - протонных столкновениях.

4.4. Методика амплитудно-временной коррекции on-line и off-line.

Одним из методов улучшения временного разрешения системы является применение амплитудно-временной коррекции. Коррекция проводится после эксперимента (в режиме off-line).

Амплитудно-временная коррекция on-line.

На рис. 3.26 (гл. 3) приведена зависимость, характеризующая точность временной привязки выходного импульса формирователя к входному импульсу. Идеально было бы, если время задержки срабатывания формирователя от амплитуды не зависело. Для получения такого идеального формирования автором разрабатывался формирователь временной отметки CFD с цифровой коррекцией (CFD-DC) [115 - 118].

В состав устройства CFD-DC входит относительно простой временной формирователь CFD и модуль цифровой коррекции DC (Digital Correction). На рис. 4.41 представлена структурная схема тестирования формирователя.

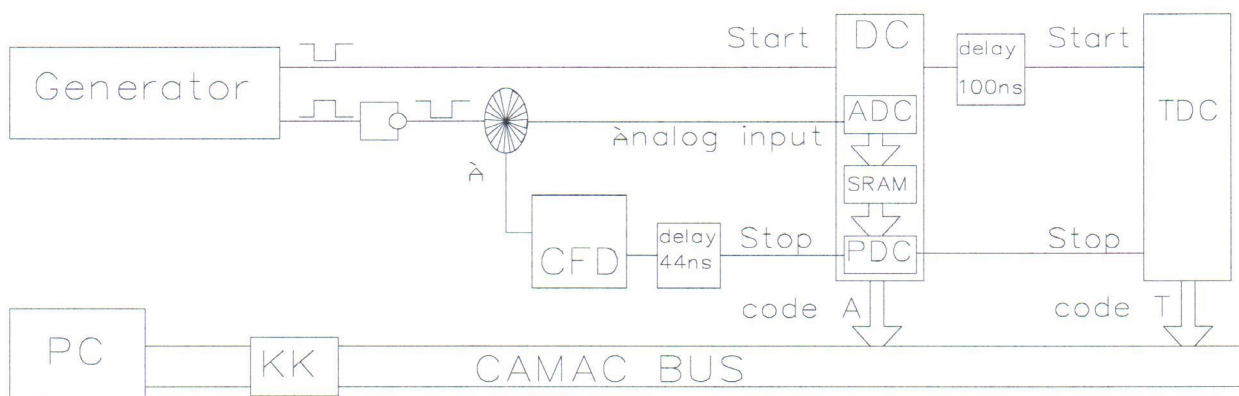


Рис. 4.41. Структурная схема эксперимента.

На первой стадии работы устройства CFD-DC осуществляется измерение «гуляния» задержки формирователя CFD относительно стартового сигнала от амплитуды реальных входных импульсов, т.е. зависимость $t(A)$ аналогичная представленной на рис. 4.42. С помощью специальной программы компьютера по полученным кодам амплитуд и кодам времени задержки строится зависимость $t(A)$, проводится экстраполяция, и определяются необходимые добавочные коды времени задержки соответственно каждой амплитуде для выравнивания задержки формирователя и приближения её к идеальной. На основе полученных данных формируется файл, который записывается в ОЗУ (SRAM) модуля цифровой коррекции DC. Файл содержит коды времени, соответствующие необходимой корректирующей задержке для каждой амплитуды. В рабочем режиме входной сигнал разветвляется и поступает на формирователь CFD и на ADC (внутри модуля DC). Код с ADC подается на адресную шину памяти SRAM, корректирующий код с выхода SRAM поступает на управляющие входы линии задержки PDC (Programmable Delay Chip), с помощью которой сигнал с формирователя задерживается на величину, необходимую для коррекции задержки сигнала с данной амплитудой, получаем зависимость $t_1(A)$ после первой проведённой коррекции. По рис. 4.42 видно, что одной итерации по корректировке оказалось недостаточно, поэтому процедура корректировки проводилась дважды.

Для настройки в качестве исследуемого аналогового и синхронизованного с ним сигнала использовались сигналы с генератора импульсов. Один - сигнал «Start» через модуль «DC» проходил на TDC и являлся сигналом запуска TDC. Второй сигнал, имитирующий аналоговый сигнал с ФЭУ, через инвертор и аттенюатор - A (с помощью которого менялась амплитуда сигнала) поступал на формирователь CFD и вход Input модуля DC. Выходной сигнал с CFD поступал на БИС - программируемую линию задержки (PDC - Programmable Delay Chip). На управляющих входах PDC присутствовал код времени - так, пришедший с CFD сигнал задерживался при помощи PDC на записанное ранее в память время. Задержанный сигнал с PDC поступал на TDC и являлся сигналом «Stop».

Формирователь CFD-DC работает в широком (1:1000) динамическом диапазоне амплитуд и изменение задержки формирователя не превышает 40 пс.

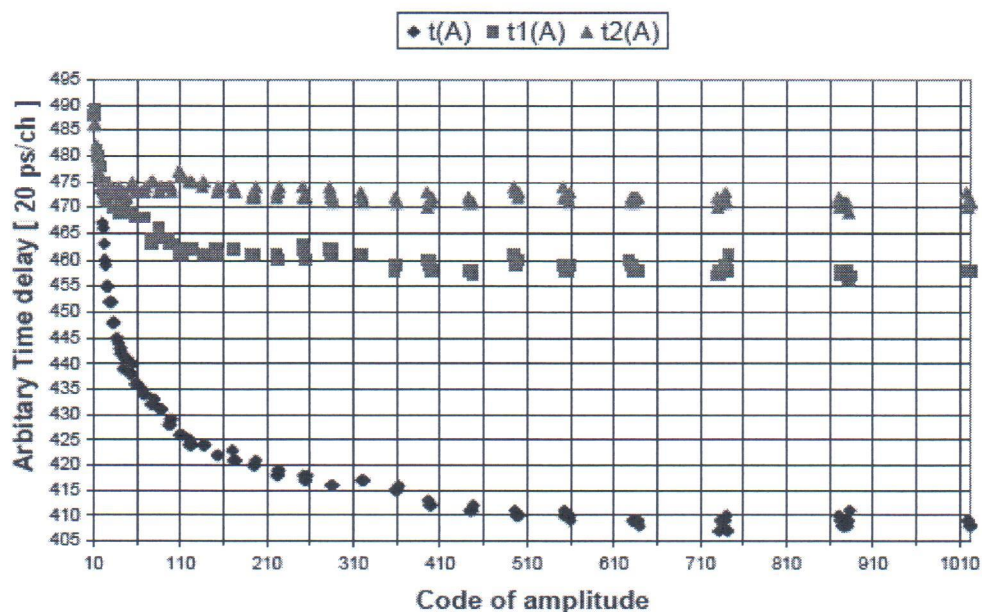


Рис. 4.42. Зависимость изменения задержки формирователя от амплитуды входных импульсов

В разработанном устройстве CFD-DC был реализован метод амплитудно-временной коррекции on-line (коррекция проводилась в реальном времени). К сожалению, из-за сложности устройства и затрат большого количества времени на его доработку (первый прототип был выполнен в стандарте КАМАК) он не будет использоваться на первых стадиях эксперимента, а рассматривается как вариант применения в будущем (при модернизации детектора T0).

Off-line амплитудно-временная коррекция.

В июне 2007 года с помощью лазера измерялись зависимости задержек формирователей CFD 454 и QTC от амплитуд сигналов для двенадцати каналов (T0-A сборки). На основе полученных данных были построены характеристики (зависимости $T(A)$) преобразователей QTC и CFD 454 для каждого канала T0-A сборки (ранее аналогичные характеристики были получены для T0-C сборки).

Off-line амплитудно-временная коррекция проводилась в институте ИЯИ, г. Троицк при участии А. Маевской, Т. Каравичевой, В. Каплина, В. Григорьева.

Для применения off-line коррекции использовался тот же алгоритм коррекции, который применялся в CFD-DC с добавлением автоматической функции сплайн, разработанной А. Маевской. Процедура проведения амплитудно-временная коррекция off-line (каждого канала) осуществлялась программными способами и выглядит следующим образом:

1. Строится зависимость задержки выходного сигнала временной отметки с формирователя CFD 454 от амплитуды (аналогичная рис. 3.26).
2. Для каждого значения амплитуды определяется среднее значение времени задержки.
3. Строится графически зависимость задержки от амплитуды методом сплайн (аппроксимирующие функции) для средних значений и записывается в TGraph - функцию Root.

4. Для каждого среднего значения амплитуды программно определяется Δt (добавочное значение времени) для выравнивания характеристики. Это значение записывается в базу данных и добавляется ко времени, полученному при калибровке формирователя.

На рис. 4.43 представлены: спектр распределения временной отметки с формирователя CFD 454 в большом (1:200) диапазоне входных амплитуд, измеренный при автоматическом изменении значений положения аттенюатора - до проведения амплитудно-временной коррекции (верхний) и после (нижний).

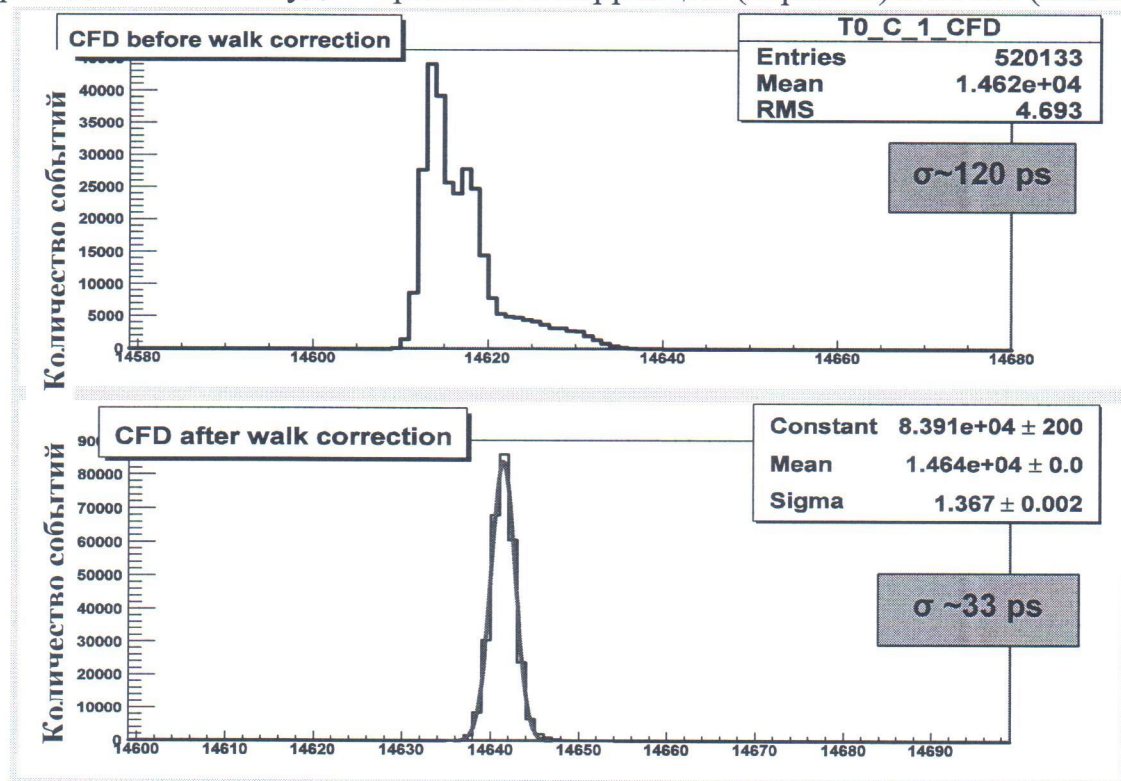


Рис. 4.43. Временной спектр распределения временной отметки формирователя CFD 454 во всем динамическом диапазоне входных амплитуд.

После проведения амплитудно-временной коррекции было получено временное разрешение ФЭУ с формирователем 33 пс (на лазерном пучке) во всем динамическом диапазоне входных амплитуд, что вполне удовлетворяет требования эксперимента.

Выводы к главе 4.

- 1) Представлена и обоснована необходимость применения лазерной системы калибровки. Приведены результаты калибровки всех основных модулей детектора T0 с помощью этой системы.
- 2) Разработана методика настройки стартового детектора T0 в лаборатории с помощью импульсного лазера, приведен алгоритм настройки детектора T0 в процессе работы на ускорителе.
- 3) Изложены методы применения амплитудно-временной коррекции on-line и off-line. После проведения амплитудно-временной коррекции было получено временное разрешение ФЭУ с формирователем CFD 454 в 33 пс во всём динамическом диапазоне входных амплитуд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы диссертации.

1. Разработана и реализована методика построения многоканальной системы сбора временной и амплитудной информации с черенковских счётчиков стартового триггерного детектора T0 эксперимента ALICE. Система электроники детектора T0 отличается малым мёртвым временем (менее 25 нс), пикосекундным временным разрешением (сигма лучше 50 пс), работает в широком (1:200) динамическом диапазоне амплитуд.

2. Разработана и отлажена методика настройки и калибровки всей многоканальной системы стартового триггерного детектора T0 с помощью лазерной системы калибровки. Выработан окончательный алгоритм настройки детектора T0 при работе на ускорителе.

3. Рассчитана вероятность выработки триггерных сигналов детектором T0 как в штатной, так и во внештатных ситуациях (при выходе из строя до 6 счётчиков детектора). В ходе моделирования была отработана методика и программа расчётов, которая позволяет оперативно вычислить вероятность при отказах фотоумножителей, что важно в условиях отсутствия свободного доступа в экспериментальную зону ALICE.

4. Расчёты временных характеристик детектора T0 методом Монте-Карло подтвердили, что скорости первых пришедших на черенковские детекторы частиц равны скорости света. Таким образом, обоснована применимость метода усреднения временных интервалов. Действительно, усреднение временных интервалов практически полностью устраняет зависимость момента появления основного физического сигнала «T0» от координаты точки столкновения. «Хвост» распределения, создаваемый более медленными частицами, пренебрежимо мал (менее 1 %).

5. В процессе калибровки уникального модуля - усреднителя временных интервалов «Mean Timer», разработанного при непосредственном участии автора, было установлено, что изменение положения физического сигнала «T0» не превышает ± 20 пс (в пределах 4σ , соответствующих сдвигу вершины события 23 см). Полученные характеристики разработанного модуля полностью удовлетворяют требованиям эксперимента.

6. Для обеспечения регистрации только первых пришедших частиц был изготовлен и испытан электронный модуль логического отбора OR, имеющий 12 входов (по числу черенковских счётчиков в каждой сборке). Основные особенности и отличия от похожих изделий: а) модуль работает по передним фронтам сигналов, что обеспечивает временное разрешение, недостижимое при применении стандартной аппаратуры, б) модуль имеет мёртвое время меньше 25 нс (работает на частоте до 40 МГц).

7. Разработан и протестирован блок управляемых по магистрали VME линий задержек DCDL-4. Разработка является уникальной в своем роде, среди номенклатуры промышленных изделий подобный модуль отсутствует. Результаты анализа полученных данных показали, что отклонения от линейности характеристик не превышают ± 12 пс, а вносимый во временное разрешение тракта вклад DCDL-4 не превышает 10 пс. Таким образом, полученные результаты удовлетворяют основным требованиям эксперимента ALICE.

8. Экспериментально обоснован выбор формирователей временной отметки со следящим порогом CFD 454 фирмы CANBERRA и формирователей с постоянным порогом - дискриминатора LED V895.

9. Разработан и опробован метод преобразования амплитуды во временной интервал с помощью двух формирователей CFD 454 и LED V895. Метод позволяет преобразовать амплитуду во временной интервал за рекордно короткое время: не более 1,5 – 2 нс.

10. Изложены методы применения амплитудно-временной коррекции on-line и off-line. После проведения амплитудно-временной коррекции было получено временное разрешение ФЭУ с формирователем CFD 454, равное 33 пс во всём диапазоне входных амплитуд.

Благодарности.

В заключении хотелось бы поблагодарить людей, без участия которых настоящая работа не была бы выполнена.

Особую и глубокую благодарность хотела бы выразить моему научному руководителю, заведующему кафедрой «Экспериментальных методов ядерной физики» МИФИ, доктору физико-математических наук Григорьеву Владиславу Анатольевичу. Спасибо за помощь в решении возникающих проблем, за понятные и полные ответы на все мои вопросы.

Хотелось бы выразить огромную благодарность старшему преподавателю кафедры «ЭМЯФ» Логинову Виталию Александровичу за массу полезной и интересной информации, за неоценимую помощь в освоении программных комплексов разработки принципиальных схем и топологии печатных плат, за ежедневные и своевременные ответы на все мои вопросы.

Также хотелось бы выразить огромную признательность к. ф.-м. н. Каплину Владимиру Александровичу, который заложил основы моей научной деятельности, за ценные советы, за помощь в работе с приборами и экспериментальными установками.

Хочу выразить признательность всему коллективу кафедры «ЭМЯФ», научившим меня не только теоретическим наукам, но и умению работать самостоятельно. Огромное спасибо всем за дружественную атмосферу и поддержку.

Огромное спасибо и искренняя благодарность преподавателю кафедры «Физики элементарных частиц», к.т.н. Канцерову Вадиму Абдурахмановичу за полезные советы и замечания, сделанные в процессе работы над диссертационной работой, за поддержку и понимание.

Сотрудничество с ЦЕРН позволило оттестировать разработанные блоки электроники, провести неоднократные испытания системы сбора временной и амплитудной информации с детектора T0 и получить первые калибровочные данные.

Большое спасибо за помощь в работе и сотрудничество коллегам из ИЯИ, г. Троицк.

Отдельное спасибо за помощь в освоении программ моделирования в AliRoot структуре А. Богданову и К. Лapidусу.