

С 344.3
М-42

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

13 - 5029

С.В. Медведь

**РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ
ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
НА ПУЧКАХ ЧАСТИЦ СИНХРОЦИКЛОТРОНА ОИЯИ**

Специальность 260 - приборы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Дубна 1970

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

В.А. Копылов-Свиридов

кандидат технических наук, профессор

Г.В. Глебович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

ордена Ленина Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова.

Автореферат разослан

1970 г.

Защита диссертации состоится

1970 г.

на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ по адресу: г. Дубна, Московской области, Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных проблем.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических наук

О.А. Займидорога

13 - 5029

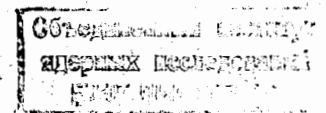
С.В. Медведь

РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ
ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
НА ПУЧКАХ ЧАСТИЦ СИНХРОЦИКЛОТРОНА ОИЯИ

Специальность 260 - приборы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

68.21 бр.



Постановка большинства экспериментов на пучках частиц современных ускорителей немислима без применения радиоэлектроники. Во многих опытах основную роль в процессах выделения изучаемого взаимодействия и регистрации параметров участвующих в нем частиц играют электронные методы.

При разработке электронной аппаратуры, предназначенной для использования в опытах на пучках, приходится учитывать такой специфический фактор, как неравномерное распределение частиц по времени в пучке ускорителя. Временная структура пучков существенно зависит от типа ускорителя, и даже на одном и том же ускорителе она меняется при переходе от пучков одних частиц к другим. В связи с этим представлялось желательным получение сведений о временной структуре применительно к пучкам частиц синхроциклотрона ОИЯИ.

Из многочисленных возможностей современной радиоэлектроники в экспериментах на пучках частиц от ускорителей на средние и высокие энергии наибольшее развитие получили методы селекции импульсов по времени, особенно в наносекундной области длительностей и интервалов. По мере освоения этого диапазона недостаточная широкополосность некоторых из пассивных элементов высокочастотного тракта начинает ограничивать быстродействие и разрешающую способность схем. Это обстоятельство заставляет подходить к выбору пассивных элементов тракта более строго, чем делалось раньше. Были проведены исследования ряда таких элементов (коаксиальные ка-

бели, высокочастотные разъемы и др.). При этом представлялось целесообразным сочетание расчетных методов с экспериментом.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения.

Первая глава посвящена изучению временной структуры пучков частиц, выведенных из синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Синхроциклотрон, как и все ускорители протонов на средних и высокие энергии, работает циклически. Временная структура выведенных пучков имеет двойную периодичность, связанную, во-первых, с частотой повторения циклов ускорения — "макроструктуру", и, во-вторых, с частотой ускоряющего напряжения — "микроструктуру". Периоды обеих структур резко отличаются друг от друга.

Знание параметров макроструктуры пучка позволяет рассчитывать загрузку детекторов и входных цепей аппаратуры и вводить поправки на просчеты, связанные с мертвым временем отдельных узлов аппаратуры. Эти сведения также необходимы при конструировании экспериментальных установок, работа которых синхронизирована с частотой повторения циклов ускорения.

Временная макроструктура изучалась единым для всех пучков методом ^{/1/}. Блок-схема аппаратуры представлена на рис. 1.

На рис. 2А и 2Б показаны измеренные распределения для выведенного пучка мюонов (среднее время вывода 620 мксек) и для пучка протонов (время вывода 160 мксек). На ускорителе ЛЯП с целью уменьшения загрузки входных блоков аппаратуры при сохранении полной интенсивности был осуществлен оригинальный способ медленного вывода пучка ^{/16/}. Этот способ позволил увеличить продолжительность вывода мезонов до 2,5 мсек, что видно из рис. 2В.

Знание высокочастотной структуры (микроструктуры) пучков необходимо для количественной оценки "мгновенной" за-

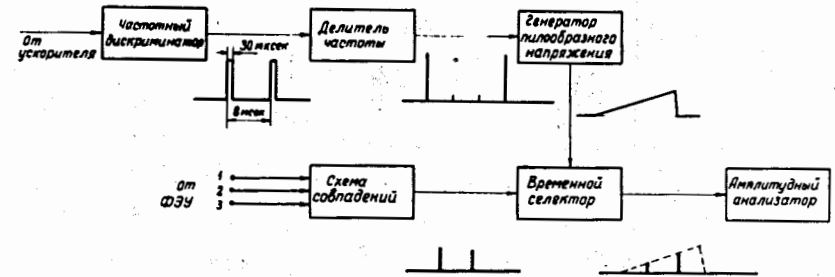


Рис.1. Блок-схема аппаратуры для измерения макроструктуры пучков.

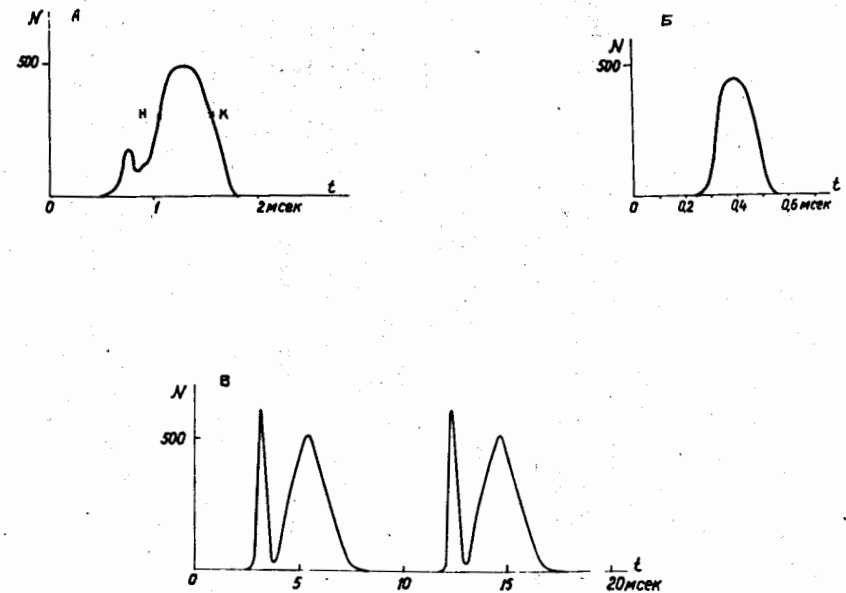


Рис.2. А. Макроструктура выведенного пучка мюонов. Б. Макроструктура выведенного пучка протонов. В. Макроструктура пучка мюонов, выведенного с помощью "растяжки".

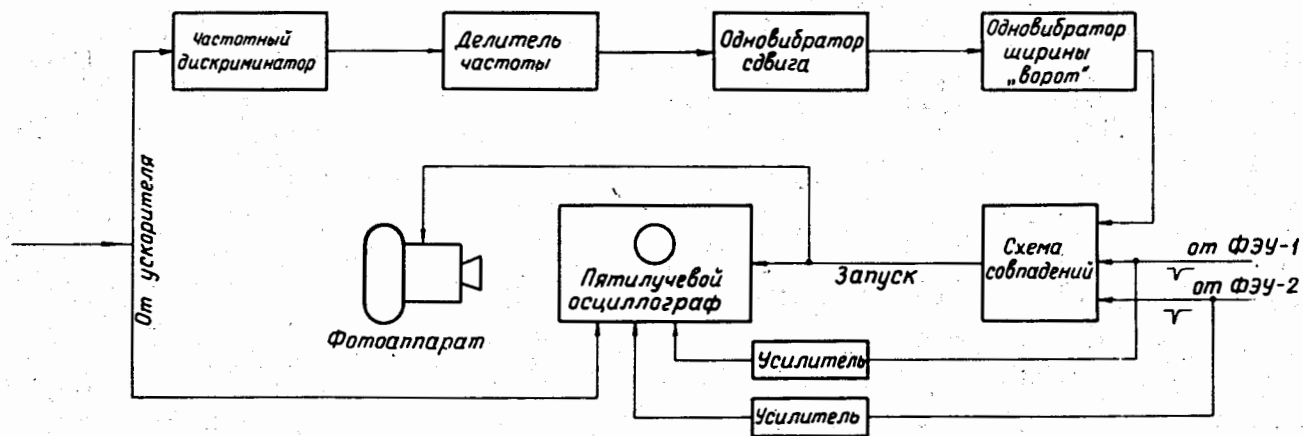


Рис.3. Блок-схема аппаратуры для изучения микроструктуры выведенных пучков.

рузки аппаратуры. С формой импульса микроструктуры связан выбор величины некоторых параметров электронных блоков, например, мертвого времени формирователей. В ряде случаев наличие такой структуры используется для селекции частиц по времени пролета.

В диссертации содержится обзор методов измерения микроструктуры пучков от ускорителей на средние и высокие энергии.

Для изучения временной микроструктуры пучков синхротрона ОИЯИ нами был разработан новый метод с использованием многолучевого осциллографа. Точность предложенного метода ^{1,2/} не связана с разрешающей способностью схем совпадений, а определяется в основном идентичностью каналов осциллографа и флуктуациями фронтов импульсов ФЭУ. Поэтому отпадают поправки на свойства схем совпадений, с чем приходится иметь дело в некоторых других методах. Отсутствуют также искажения, вызванные нестабильностью момента запуска осциллографа. Недостатком нашего метода является повышенная трудоемкость обработки результатов измерений. На рис. 3 представлена блок-схема опыта.

Одна из фотографий с экрана осциллографа приведена на рис. 4. Измерялось расстояние от точки А пересечения восходящей ветви синусоиды со вторым лучом до точки В пересечения касательной к фронту импульса фотоумножителя с продолжением того же луча. Период синусоиды (отрезок луча АС) измерялся через каждые 100 кадров. Отношение отрезков АВ и АС давало относительную фазу момента прихода частицы. Абсолютная фаза не определялась. Точность измерений (включая просмотр) составляла $\pm 0,8$ нсек. Всего было обработано 10000 фотографий.

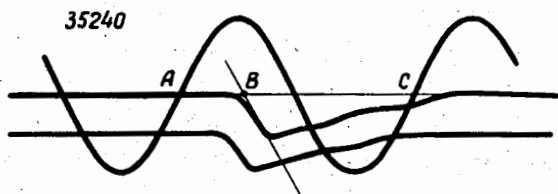


Рис.4. Фотография с экрана многолучевого осциллографа.

Измерения микроструктуры проводились на пучках протонов, мюонов и пионов. Все опыты выполнены на полной интенсивности внутреннего пучка ускорителя, в начале и конце процесса вывода (соответственно точки *H* и *K* на рис. 2А).

Измеренные распределения интенсивности в микроимпульсе выведенных вторичных пучков имеют вид асимметричных пиков со средней шириной 12–15 нсек. Для выведенного пучка протонов распределение симметрично, его можно аппроксимировать гауссовской кривой со среднеквадратичным разбросом $\sigma = 5,5$ нсек.

Микроструктура растянутого пучка вторичных частиц изучалась при помощи системы задержанных совпадений. Было показано отсутствие периодической структуры во втором широком пике макроимпульса интенсивности (рис. 2В).

Мы использовали метод задержанных совпадений в данном случае для получения лишь качественной информации. Во многих других работах он применяется для количественной оценки некоторых экспериментальных величин, например, фона случайных совпадений, которым сопровождается изучаемый процесс. Величина фона, измеренная таким образом, содержит в себе небольшую систематическую ошибку, а именно: скорость счета действительного числа случайных совпадений всегда меньше скорости счета случайных совпадений, измеряемых с помощью задержки.

В диссертации приводятся расчетные соотношения ^{/4/}, позволяющие учесть эту ошибку для двух встречающихся схем экспериментов: 1) измерение поглощения пучка частиц рассеивателем ^{/7/}, 2) измерение кривой разрешения по одному из счетчиков телескопа.

Вторая глава диссертации посвящена вопросу об искажении формы сигналов наносекундной длительности при прохождении их по отрезкам коаксиальных кабелей. Такие кабели, связывающие детекторы с блоками регистрирующей аппаратуры, стали существенной частью экспериментального оборудования в

опытах на ускорителях. Помимо этого, коаксиальные кабели используются как соединительные элементы между модульными блоками, а также в качестве прецизионных линий задержки.

Существующая теория переходных процессов в коаксиальном кабеле ^{/14/} позволяет найти вид переходной характеристики как при строгом учете всех компонент затухания, так и на основании тех или иных упрощающих предположений. Однако переходные характеристики недостаточно наглядны для физика-экспериментатора, поскольку на их основе трудно сделать количественные оценки систематических ошибок, возникающих в эксперименте и обусловленных искажениями формы рабочих сигналов.

Чтобы помочь физика-экспериментатору при выборе коаксиального кабеля для проведения новых экспериментов, нами составлены справочные пособия ^{/8,9/}, содержащие в графическом виде материалы по искажению формы наиболее часто применяемых сигналов.

При работе над программой в первую очередь были учтены специфические интересы физиков, работающих на ускорителях. Однако программа построена так, что допускает введение новых блоков, описывающих формы сигналов, характерные для других областей экспериментальной физики.

В основу вычислительного алгоритма положены следующие предпосылки. Искажения формы сигналов при передаче их по коаксиальному кабелю обусловлены сопротивлением внешнего и внутреннего проводников и потерями в диэлектрике. Соотношение между обоими видами потерь зависит как от конструкции кабеля, так и от частотного спектра передаваемого сигнала. На частотах порядка десятков мегагерц преобладают потери в проводниках. По мере повышения частоты начинают сказываться потери в диэлектрике. Величина затухания в нем растет быстрее, чем затухание в проводниках. Сопротивление проводников *R* представляет собой комплексную величину, пропорциональную квадратному корню из частоты

$$R = a_0 (j\omega)^{1/2},$$

где a_0 — коэффициент, определяемый конструкцией кабеля.

Для расчета диэлектрических потерь необходимо знать частотную зависимость $\operatorname{tg} \delta$. По литературным данным $\operatorname{tg} \delta$ практически постоянен в области частот до 3 ГГц для фторопластовой изоляции, и до нескольких сотен мегагерц для полиэтилена. При дальнейшем повышении частоты угол потерь возрастает. Сигналы, которые передаются по коаксиальным кабелям от современных детекторов ядерных излучений, имеют фронт порядка одной наносекунды. Исходя из этого, в дальнейших расчетах величина $\operatorname{tg} \delta$ была принята постоянной.

Коэффициент передачи однородного отрезка кабеля длиной l , нагруженного на активное сопротивление, равное волновому, может быть записан, при некоторых условиях, в следующей форме:

$$K(j\omega) = \exp(-l a \sqrt{j\omega}) \cdot \exp(-b l \omega).$$

Величины a и b определяются одним из двух способов. Первый — прямой, с использованием сведений о геометрических размерах кабеля и электрических свойствах проводников. Таким способом выполнены расчеты в большинстве опубликованных работ. Он достаточно прост, но требует знания некоторых конструктивных параметров кабеля, что не всегда доступно экспериментатору.

Представляется более удобным косвенный метод определения интересующих нас величин из частотных характеристик кабеля, которые обычно приводятся в справочниках, либо могут быть измерены.

Обратимся к рис. 5. На нем изображена частотная характеристика кабеля. По оси ординат в логарифмическом масштабе отложено затухание A , выраженное в логарифмических единицах (децибелах), а по оси абсцисс — логарифм частоты. В та-

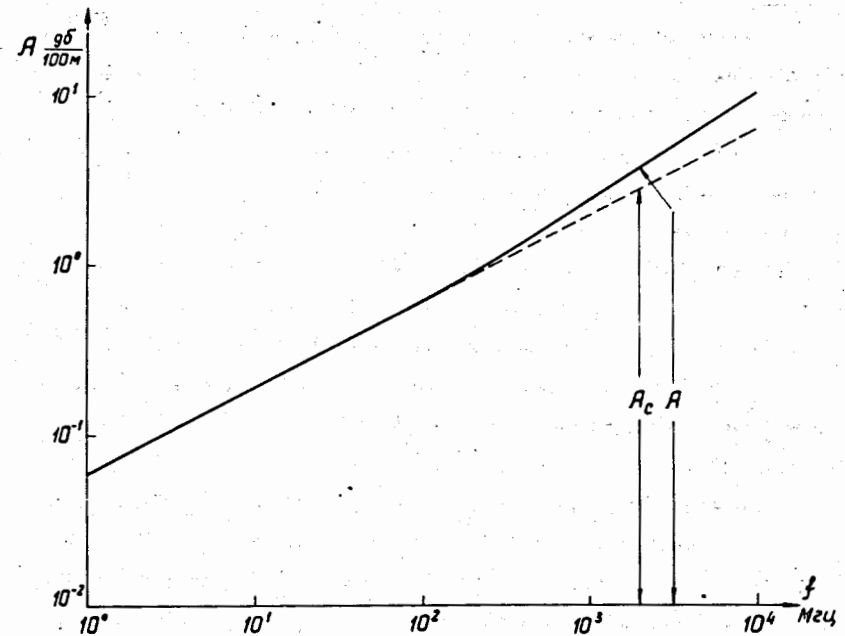


Рис. 5. Частотная характеристика коаксиального кабеля. A — кривая полных потерь. A_c — кривая потерь в проводниках.

ких координатах характеристика кабеля в области низких частот представляет собой прямую линию. Отклонения от прямой начинаются там, где потери в диэлектрике A_d начинают вносить существенную долю в полные потери A . Экстраполяцией из области низких частот получены значения потерь в проводниках A_c (пунктирная линия) для высоких частот. В диссертации приводятся формулы, позволяющие вычислить коэффициенты a и b по измеренным затуханиям A_c и $A_d = A - A_c$.

Таким образом, алгоритм определения формы сигнала сведен к следующей последовательности операций: вычислению коэффициентов, характеризующих коаксиальный кабель, вычислению импульсной характеристики и последовательному нахождению интегралов

$$U_{\text{вых.}}(t) = \int_0^t U_{\text{вх.}}(\tau) v(t-\tau) d\tau$$

в каждой требуемой точке на оси времени.

Алгоритм расчета был реализован в виде программы /10/, написанной для машины типа М-20 (БЭСМ-4). С целью уменьшения количества информации, вводимой каждый раз в машину, оказалось целесообразным снабдить программу библиотекой исходных данных для наиболее часто встречающихся в практике вариантов расчета. В нее входят сведения о величинах затуханий для 12 типов кабелей и таблица длин отрезков (12 значений). Кроме того, в библиотеку введены подпрограммы, позволяющие описывать входные воздействия $U_{вх}$ нескольких типов (прямоугольный сигнал, треугольный сигнал, сигнал произвольной формы, заданный в виде таблицы значений $\{t_i, U_{вх.}(t_i)\}$ и т.д.).

По описанной программе проведено большое количество расчетов переходных характеристик и искажений формы импульсов в кабелях, применяемых в основном в опытах на ускорителях ОИЯИ и Института физики высоких энергий.

Результаты расчетов опубликованы в виде справочника /8/. Искажения формы прямоугольных сигналов были рассчитаны для длительностей в 10 и 3 нсек. Длины отрезков выбраны равными 5, 10, 20, 50, 100 и 200 м.

Для проверки правильности расчетов были получены экспериментальные переходные характеристики кабелей различной длины. Измерения проводились на стробоскопическом осциллографе с собственным временем нарастания около 0,3 нсек. Экспериментальная и расчетная переходные характеристики совпадают во всех случаях удовлетворительно. С помощью той же программы были получены сведения об искажениях треугольных сигналов /9/. Расчеты проведены для двух типов входных сигналов. Импульс с коротким фронтом (от 1 до 3 нсек) и сравнительно медленным спадом (10 нсек) имитирует выходной сигнал ФЭУ при его работе на низкоомную нагрузку. Импульс с фронтом и спадом равной длительности изображает сигнал ФЭУ, сформированный короткозамкнутым отрезком кабеля. На рис. 6

изображены взятые из этой работы расчетные кривые, показывающие искажения формы треугольного импульса, имеющего фронт длительностью 2,0 нсек и спад 10 нсек в кабеле РК-75-4-11.

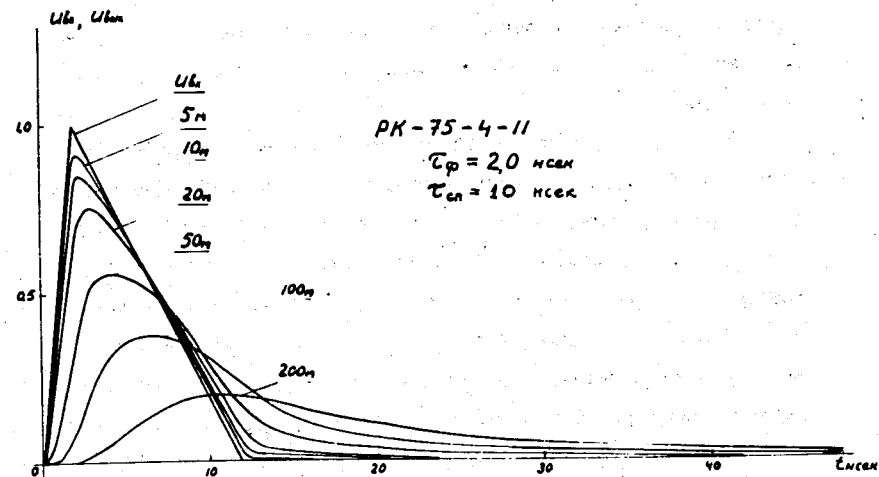


Рис. 6. Искажения треугольных импульсов в кабеле РК-75-4-11.

Представляет интерес дополнительное запаздывание вершины и центра тяжести импульса как следствие искажения формы. Оно зависит от длины отрезка кабеля и спектрального состава импульса. Некоторые количественные соотношения, характеризующие эффект, получены нами впервые /3/. Это явление, заметное в наносекундном диапазоне длительностей сигналов, заставляет относиться осторожно к временной калибровке аппаратуры с помощью импульса от генератора, если форма, а следовательно, и спектральный состав калибровочного импульса отличны от формы рабочего импульса.

Другим важным обстоятельством, которое нельзя не учитывать, является наличие медленного спада ("хвоста") на выходе длинных отрезков кабеля, что может повлиять на работоспособность аппаратуры при высокой частоте следования сигналов. Если импульс детектора после прохождения кабельной линии подвергается амплитудному анализу, то указанное явление накладывает ограничения на среднюю скорость поступления сигналов при заданной точности анализа.

В третьей главе диссертации приведены результаты исследования импульсных характеристик некоторых элементов высокочастотного тракта аппаратуры.

После того как коаксиальные кабельные линии связи стали неотъемлемой частью экспериментальной установки, повысился интерес к переходным свойствам высокочастотных разъемов, которыми начинается и оканчивается практически любая такая линия.

По конструктивным соображениям волновое сопротивление разъема почти всегда получается несколько меньшей величины, чем волновое сопротивление подводных кабелей. Нами было проведено исследование [11] влияния степени несогласования указанных сопротивлений на передачу наносекундных импульсов.

Разъем, волновое сопротивление которого отличается от волнового сопротивления кабеля, можно рассматривать как отрезок линии с волновым сопротивлением Z_{B2} , включенный в линию с волновым сопротивлением Z_{B1} . Процесс образования проходящей и отраженной волн удобно рассматривать с помощью так называемой "скрещенной" диаграммы, изображенной на рис. 7. Амплитуды выходного сигнала U_3 и отра-

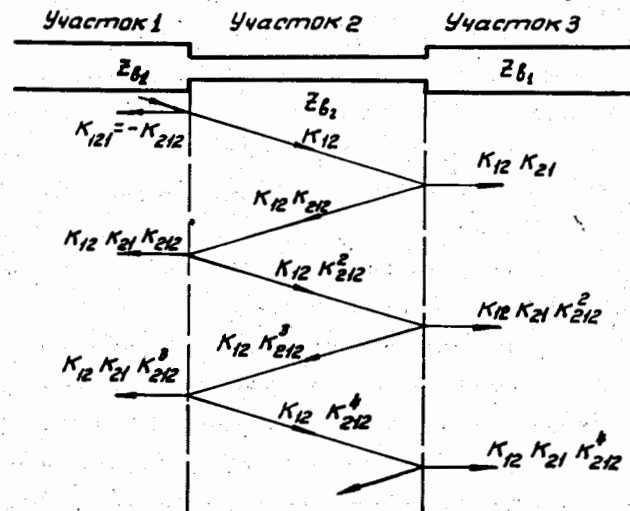


Рис.7. "Скрещенная" диаграмма.

женного сигнала U_1 получаются суммированием со сдвигом по времени соответствующих слагаемых на участке 3 и 1. Были найдены амплитуды прошедшей и отраженной волн для различных $m (= Z_{B2} / Z_{B1})$ в случае прямоугольной формы падающей волны. Определена также форма прошедшей и отраженной волн для сигнала, имеющего линейный фронт t_{ϕ} конечной длительности. В качестве примера на рис. 8 показана зависимость максимальной амплитуды отраженной волны от m и $s (= t_{\phi} / 2t_{пр2})$, где $t_{пр2}$ - время пробега волны по разъему.

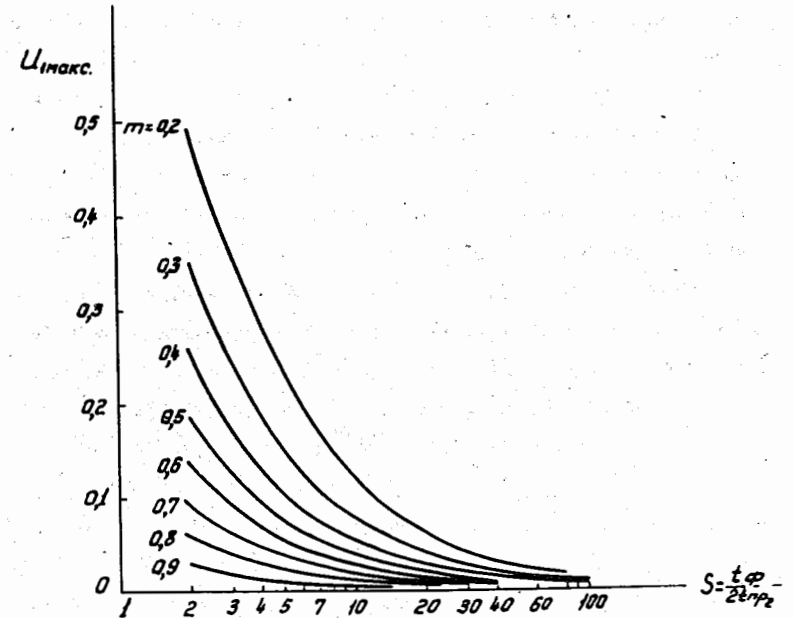


Рис.8. Зависимость амплитуды отраженной волны от m и s для линейного фронта падающей волны.

Проведенные вычисления позволяют сделать два вывода:

1. Волновое сопротивление разъема при необходимости может быть выбрано меньшим, чем волновое сопротивление кабеля. Это обстоятельство позволяет обращать внимание на надежность и технологичность разъема. Степень несогласования определяется допустимой величиной отраженного сигнала и искажениями фронта переданного сигнала. Для фронтов длительностью порядка единиц наносекунд возможно уменьшение волнового сопротивления разъема до 0,5-0,6 от волнового сопротивления кабеля.

2. При разработке или выборе разъемов следует стремиться к тому, чтобы время прохождения импульса через разъем было возможно меньше.

Эти выводы были экспериментально проверены на разъемах, которые широко применялись в регистрирующей аппаратуре, изготовленной в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

В связи с широким применением в аппаратуре трансформаторов на ферритовых сердечниках нами было проведено экспериментальное исследование влияния конструктивных параметров простого трансформатора (две обмотки на тороидальном ферритовом сердечнике) на качество передачи сигналов наносекундной длительности.

Источником импульсов служил генератор на ртутном реле. Сигналы подавались непосредственно на пластины трубки. Количественные измерения проводились на диаскопе при 25-кратном увеличении полученных фотографий. Калибровка развертки трубки осуществлялась с помощью кабеля /5/.

Вначале исследовалась зависимость качества передачи импульсов от способа выполнения обмоток трансформатора. Обмотки выполнялись следующими тремя способами: а) сплошная намотка, витки вторичной обмотки лежат поверх первичной; б) сплошная намотка, витки вторичной обмотки лежат между витками первичной; в) намотка с шагом, провода первичной и вторичной обмоток укладываются рядом. Исполнение обмоток по способу в) позволяет понизить величину собственной емкости при сохранении хорошей связи между обмотками. В некотором приближении обмотки такого трансформатора, если он включен определенным образом, можно рассматривать как линию с распределенными постоянными.

Измерение осциллограмм показало, что на передаче фронта испытательного импульса почти не сказывается способ намотки, но появляется зависимость от способа включения обмоток. Если при трансформации полярность импульса изменяется, то его

форма практически не отличается от исходной. Сигнал, прошедший через трансформатор без перемены знака, имеет менее крутой фронт и некоторое искажение формы. Хотя эти искажения невелики и в известной степени скрадываются выбросами переходной характеристики измерительной цепи, ясно, что предположение о работе трансформатора в режиме линии не лишено смысла.

Была исследована работа трансформатора в схеме согласования сопротивлений. Максимальный коэффициент трансформации не превышал 3. Опыты показали, что качество передачи вполне удовлетворительно, хотя реальные коэффициенты трансформации оказались несколько ниже, чем соотношение витков в обмотках. Отражения от нагруженного трансформатора по существу не отличались от отражений на конце кабеля, работающего на волновое сопротивление плюс паразитную емкость.

Способность простейших трансформаторов передавать наносекундные фронты импульсов без существенных искажений (особенно, если при передаче изменяется полярность импульса) была использована для создания некоторых блоков ядерной регистрирующей аппаратуры /6/.

В следующих параграфах этой главы приводятся описания некоторых экспериментальных приемов и вспомогательных расчетов, полезных при определении импульсных и амплитудных характеристик аппаратуры. Сюда относится алгоритм расчета согласованного аттенюатора, предназначенного для осуществления перехода между кабелями с отличающимися волновыми сопротивлениями. Чтобы облегчить подбор резисторов такого аттенюатора, нами было составлено справочное пособие /12/, где содержатся данные для кабелей с наиболее распространенными величинами волновых сопротивлений.

Описан метод калибровки временной шкалы осциллографа /5/, полезный в тех случаях, когда при фотографировании изображения с экрана требуется длительная выдержка.

Кроме того, приведен алгоритм расчета индуктивности звена линии задержки типа m , с учетом индуктивности выводов катушки /13/. Он является уточнением известного метода, изложенного в книге /14/.

В приложении к диссертации дана программа расчета форм импульсов, проходящих по коаксиальному кабелю /10/.

В заключении приводятся основные результаты диссертации.

1. Показана связь параметров регистрирующей аппаратуры с временными характеристиками пучков ускорителя. Для практического выбора этих параметров проведены измерения временной структуры пучков синхроциклотрона, связанной с частотой циклов ускорения. Измерения выполнены для пучков протонов и мезонов при разных методах вывода частиц.

2. Предложен новый метод изучения временной структуры пучков частиц от синхроциклотрона, связанной с частотой ускоряющего напряжения. Метод основан на использовании многолучевого скоростного осциллографа. Измерения выполнены для пучков протонов и мезонов в различные моменты времени по отношению к началу вывода. Показано отсутствие временной структуры в пучке мезонов в случае, если они выводятся с помощью "растяжки".

3. Обоснованы требования к коаксиальным кабелям, составляющим существенную часть экспериментального оборудования в опытах на пучках частиц от ускорителей. Составлена математическая программа расчета искажений формы наносекундных импульсов, передаваемых по кабелям.

4. Проведены экспериментальные исследования и расчеты искажений сигналов от детекторов частиц для ряда кабелей с волновым сопротивлением 75 и 100 ом. Получены количественные оценки величины дополнительного сдвига вершины импульсов, имеющих разные фронты. Показано затягивание спада импульса. Результаты работы опубликованы в виде справочников.

5. Проведено исследование влияния конструкции коаксиального разъема на передачу импульсов наносекундной длительности. Показано, что при определенных условиях допустимо использовать разъемы, имеющие волновое сопротивление меньшей величины, чем волновое сопротивление кабеля.

6. Проведено экспериментальное исследование влияния конструктивных особенностей импульсного трансформатора с ферритовым сердечником на качество передачи сигналов наносекундной длительности. Даны рекомендации по изготовлению и использованию трансформаторов в регистрирующей аппаратуре.

7. Получены формулы, позволяющие рассчитывать конструктивные параметры катушки звеньев типа m , если величина индуктивности мала.

Практические рекомендации, содержащиеся в диссертации, были использованы при создании ряда блоков электронной регистрирующей аппаратуры. С помощью этой аппаратуры при участии автора были выполнены исследования параметров упругого нуклон-нуклонного взаимодействия на синхроциклотроне ОИЯИ /7,17-21/.

Работы, положенные в основу диссертации /1-13/, были опубликованы в журналах и препринтах ОИЯИ. Часть из них докладывалась на конференциях и симпозиумах по ядерной радиоэлектронике.

Л и т е р а т у р а

1. В.Г. Зинов, С.В. Медведь, Е.Б. Озеров. АЭ 21, 445 (1966).
2. В.Г. Зинов, С.В. Медведь, Е.Б. Озеров. Препринт ОИЯИ Р-2657, Дубна (1966).
3. С.В. Медведь, Ю.Н. Симонов. Материалы симпозиума по наносекундной ядерной радиоэлектронике, Дубна 1967 год, стр. 576.
4. С.В. Медведь, В.И. Москалев, Е.Б. Озеров. Препринт ОИЯИ 1200, Дубна (1963).

5. С.В. Медведь, Е.Б. Озеров. ПТЭ №1, 177 (1963).
6. В.Г. Зинов, С.В. Медведь, Е.Б. Озеров. Препринт ОИЯИ 2350, Дубна (1965).
7. В.П. Джелепов, С.В. Медведь, В.И. Москалев. ДАН СССР, 104, 380 (1955).
8. С.В. Медведь, Ю.Н. Симонов. Препринт ОИЯИ 13-3645, Дубна (1967).
9. С.В. Медведь, Ю.Н. Симонов. Препринт ОИЯИ 13-3646, Дубна (1967).
10. С.В. Медведь, Ю.Н. Симонов. Препринт ОИЯИ 11-3327, Дубна (1967).
11. С.В. Медведь, Е.Б. Озеров. Препринт ОИЯИ 1171, Дубна (1963).
12. С.В. Медведь, Е.Б. Озеров. Препринт ОИЯИ 2200, Дубна (1965).
13. С.В. Медведь, Е.Б. Озеров. Сообщение ОИЯИ Б2-13-4869, Дубна (1969).
14. Л.А. Моругин, Г.В. Глебович. Наносекундная импульсная техника, изд. "Советское радио", М., 1964.
15. Л.А. Меерович, Л.Г. Зеличенко. Импульсная техника, изд. "Советское радио", М., 1953.
16. В.И. Данилов, И.Б. Енчевич, Б.И. Замолодчиков и др., АЭ 19, 289 (1965).
17. Н.С. Амаглобели, Б.М. Головин, Ю.М. Казаринов, С.В. Медведь, Н.М. Полев. ЖЭТФ 38, 660 (1960).
18. В.П. Джелепов, Б.М. Головин, Ю.В. Катышев, А.Д. Конин, С.В. Медведь. ЖЭТФ 36, 735 (1959).
19. Б.М. Головин, В.П. Джелепов, Ю.В. Катышев, А.Д. Конин, С.В. Медведь. ПТЭ №5, 33 (1959).
20. Б.М. Головин, Р.Я. Зилькарнеев, В.С. Киселев, С.В. Медведь и др. ЯФ 5, 146 (1967).
21. Б.М. Головин, Р.Я. Зилькарнеев, В.С. Киселев, С.В. Медведь и др., ЯФ 6, 804 (1967).

Рукопись поступила в издательский отдел
3 апреля 1970 года.