

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-96-152

На правах рукописи  
УДК 621.3.038.612

p-693

РОМАНОВ  
Юрий Иванович

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ  
МНОГОКАНАЛЬНЫХ СВЕТОВОДНЫХ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ  
ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Специальность: 01.04.01 — техника  
эксперимента, физика приборов,  
автоматизация физических исследований

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Дубна 1996

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор технических наук, с.н.с.

Никитюк Николай

Михайлович

кандидат технических наук, с.н.с.

Воеводин Михаил

Александрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Шелаев Игорь

Александрович

кандидат физико-математических  
наук, с.н.с.

Алексеев Николай

Николаевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт теоретической и экспериментальной  
физики (ИТЭФ), г.Москва.

Защита диссертации состоится "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1996 г.  
в "\_\_\_\_" час. на заседании диссертационного совета Д-047.01.02  
в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных  
исследований, г.Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1996 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета -

*М.Ф.Лихачёв*

М.Ф.Лихачёв

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Целью настоящей работы является создание и внедрение световодных систем для передачи цифровой и аналоговой информации между ЭВМ и оборудованием в стандарте КАМАК, используемым для контроля и управления ионных источников линейных ускорителей, находящихся на высоковольтном терминале. В состав этих систем входят многоканальные электронно-оптические модули для передачи данных в кодах "NRZ" и "Manchester", а также аналоговой информации с использованием модуляции по интенсивности и частотной модуляции.

Актуальность работы определяется спецификой работы ионных источников совместно с линейными ускорителями. Высокие уровни импульсных электромагнитного и радиационного излучений, высокая разность потенциалов источника относительно земли ( $\sim 750$  кВ) делают световодные системы единственным возможным каналом передачи информации "источник - пульт управления" и обратно.

Кроме того, разработка и внедрение волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) является актуальным и перспективным направлением, как с точки зрения использования их в системах управления высоковольтными электрофизическими установками (ЭФУ), так и во многих других областях науки и техники (связь, телеконтроль, телесигнализация и т.д.).

Использование ВОЛС влечёт за собой необходимость создания определённой элементной базы, учитывающей структурные особенности и свойственные оптическим линиям принципы передачи. Новые принципы передачи информации выдвигают ряд требований к разработке соответствующих компонентов, без которых невозможно обеспечить максимальное использование всех достоинств оптического волокна.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложена оригинальная конструкция тестируемого оптического соединителя, основанная на его разделении на две части - розеточную, состоящую из узла юстировки оптических элементов и вилочную, с фиксатором оболочки волоконно-оптического кабеля и капилляром, центрирующим световодную жилу с оптическим элементом, интегрально сформированным на её конце, относительно наконечника;
- получены экспериментальные результаты зависимостей эффективности ввода излучения от радиуса микролинзы, сформированной на торце световода;

- разработаны и созданы помехозащищённые многоканальные модули ВОЛС с использованием кодов "NRZ" и "Manchester", циклическим опросом каналов и защитой данных повторением, а также ВОЛС, работающие в асинхронном режиме;

- разработаны и созданы двунаправленные ВОЛС с АМ- и ЧМ-модуляцией для передачи аналоговой информации по моноволоконному оптическому кабелю;

- предложены и реализованы на практике интегрированные ВОЛС типа "ВОЛСтрон".

Практическая ценность работы состоит в следующем. На основе анализа требований и в результате практической работы автора разработаны и изготовлены простые и надёжные каналы связи на основе волоконной оптики. Создание автоматизированных систем управления и контроля ионных источников линейных ускорителей с использованием волоконно-оптических линий связи позволило улучшить пространственные и временные характеристики ионных пучков, существенно сократить время настройки источника и упростить его эксплуатацию. Изготовленная многоканальная аппаратура позволяет передавать массивы информации по ВОЛС, имеющих как параллельную, так и последовательную структуры. Параллельная организация световодных каналов используется для создания монтажных, - последовательная - для внутриобъектовых и междобъектовых ВОЛС с применением каналовобразующих систем "уплотнение - разуплотнение" передаваемой информации. Разработанная аппаратура ВОЛС нашла своё применение в системах автоматизации ЭФУ как в Лаборатории высоких энергий, так и в других лабораториях ОИЯИ, а также в ряде институтов СССР и других стран-участниц ОИЯИ (Болгарии, Польше, ЧСФР, Германии).

Основные результаты работы обсуждались на научно-методических семинарах Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, докладывались на Международных симпозиумах по физике высоких энергий в Брукхейвене (США) 1982 г., в Бейджинге (КНР) 1993 г., на Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1981 г.; Дубна, 1983 г.; Дубна, 1985 г.; Дубна, 1987 г.; Дубна, 1989 г.; ИТЭФ, 1990 г.), опубликованы в научных журналах и в виде сообщений ОИЯИ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Она содержит 122 страницы машинописного текста, 3 таблицы, 55 рисунков и список литературы из 77 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована необходимость и актуальность разработки и создания унифицированных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для работы в системах контроля и управления ионными источниками, расположенными на высоковольтном терминале в радиационной зоне линейного ускорителя. Сформулированы цели, научная новизна и практическая ценность выполненных работ, дано краткое описание глав.

В первой главе дан обзор разработок основных оптических компонентов. Сформулированы требования к элементам ВОЛС, дано краткое описание оптических передающих сред и их направляющих устройств, применяемых на высоковольтных электрофизических установках (ЭФУ). Отмечено, что именно они определяют назначение световодной системы в целом и её параметры. В состав устройств связи входят усилители для накачки излучателей, излучатели, волоконные световоды с соответствующими соединителями, фотоприёмники, усилители для приёма оптических сигналов. Усилители для накачки излучателей обеспечивают получение импульсов тока  $(0,15...15)A$  с длительностью фронтов от сотен до единиц нс. Входные сигналы усилителей соответствуют сигналам схем ТТЛ и ЭСЛ логики. В качестве излучателей использованы светодиоды, суперлюминесцентные диоды и полупроводниковые лазеры, соответственно обеспечивающие скорость передачи единицы, десятки и сотни Мбод. В зависимости от требуемой дальности и скорости передачи световодами служат оптические жгуты и моноволоконные кабели. Если применение оптических жгутов характеризуется достаточно простыми разъёмами, то в случае моноволоконных оптических кабелей потребовалось создать высокоточные соединители или разъёмы с юстировкой.

Показано, что соосность соединяемых моноволоконных оптических кабелей можно достичь не за счёт точности изготовления деталей оптического соединителя, а за счёт введения в него дополнительных достаточно точных деталей, образующих механизм



для регулировки взаимного положения осей волокон. Использование центрирующих направляющих втулок для оптического соединителя с круглыми наконечниками позволило снизить требования к точности получения наружного диаметра наконечников и внутреннего диаметра втулок. Применением дополнительных деталей для закрепления волокна в наконечнике удалось увеличить диаметр направляющих каналов до величины, не требующей изготовления специнструмента. Отмечено, что использование стеклянных микрокапилляров позволило улучшить условия шлифовки и полировки торцов наконечников после сборки и упростило процесс сборки кабельной части оптических соединителей. В ряде случаев прецизионное отверстие необходимого диаметра для оптического волокна имитировалось стыковой роликов определённого размера.

Для повышения эффективности ввода излучения от электролюминесцентного и лазерного диодов в оптическое волокно обособляется необходимость использования полусферических микролинз в качестве согласующих элементов. Такая полусферическая микролинза может выполняться интегрально с волокном путём разогрева световода в плазме электрического разряда или формироваться "холодным" способом на клеевой основе. Показано, что согласующие элементы, полученные таким образом, позволяют увеличить эффективность ввода излучения в моноволоконный световод до  $18 \pm 20\%$  у светодиодов (рис.1) и до  $70\%$  у полупроводниковых лазеров (рис.2).

Приём оптических сигналов обеспечивается применением р-п и р-и-п - диодами или диодами ЛФД с усилителями, обеспечивающими усиление сигналов по напряжению в несколько тысяч раз в частотном диапазоне от нуля до нескольких сотен мегагерц с выходными сигналами ТТЛ и ЭСЛ-логики.

Важное место занимает изготовление ВОЛС с большими строительными длинами. Оно связано с применением специализированных электродуговых сварочных устройств. Для сварки оптических моноволокон использовалась промышленная установка СВ-1М с монокулярным микроскопом МИР-3 с механизмом фиксации и кистровки волокна. Техническая подготовка торцов световодов включает в себя механическую обработку, очистку в серной кислоте и ацетоне. Отмечено, что введение небольших доз глицерина, растворённого в этиловом спирте, между торцами световодов перед сваркой спо-

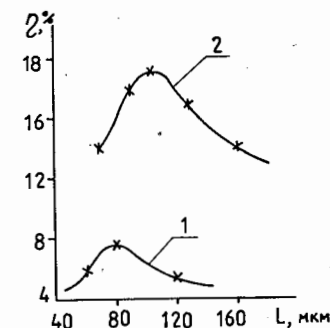


Рис.1. График зависимости эффективности ввода излучения светодиода от осевого смещения световода с клеевой микролинзой диаметром: 1 - 85 мкм; 2 - 150 мкм.

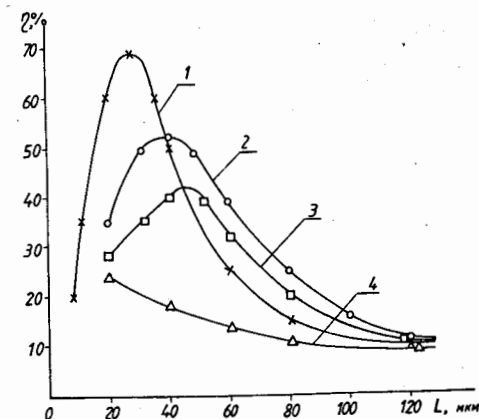


Рис.2. График зависимости эффективности ввода излучения лазерного диода от осевого смещения световода с клеевой микролинзой диаметром: 1 - 55 мкм; 2 - 75 мкм; 3 - 100 мкм; 4 - 60 мкм (плоский торец световода без микролинзы).

способствует получению хорошего сварного соединения, так как позволяет устранить влияние несовершенства сколов световодов и добиться оптимальной юстировки волокон по максимуму оптического сигнала от гелий-неонового лазера. Для измерения потерь в сварных соединениях использовался оптический тестер "Электроника ОТ-7". Сначала измерялась мощность оптического излучения на выходе 50-метрового световода без сварочного шва, а затем - со швом. По полученным результатам определялись оптические потери на сварном соединении волоконных световодов:  $K = 10 \lg P_1/P_2$ , где  $P_1$  - оптическая мощность на выходе световода со сварным швом, а  $P_2$  - без шва. Экспериментальные исследования 20 сварных соединений показали, что потери в них составляют  $0,3 + 1,1$  дБ, что соответствует допустимому эксцентриситету сердцевин соединяемых волокон в  $5...10$  мкм.

Предложенные технические решения, положенные в основу разработок элементной базы, позволяют успешно решать задачи, возникающие при построении любых структур волоконно-оптических систем на ЭФУ.

Вторая глава посвящена общим вопросам разработки и создания короткометражных (монтажных) ВОЛС для ЭФУ с учётом их стоимости и надёжности.

В системах управления ЭФУ используется, как правило, до десятка и более одноканальных ВОЛС среднего быстродействия ( $0,1...10$ ) МГц. Такая многолинейная структура оптоэлектронных каналов создаётся путём прокладки волоконно-оптического кабеля (ВОК) поверх ограждения ЭФУ для обеспечения связи между блоками аппаратуры, расположенными на высоковольтном терминале инжектора и пультом управления. Степень интеграции оптоэлектронных каналов определяется исполнением конечных устройств (передающих, приёмных). Показано, что каналы ВОЛС малой протяжённости ( $5...10$ ) м целесообразно изготавливать оптически неразъёмными. Исключение составляют отдельные случаи, когда введение в линейный тракт дорогостоящих оптических соединителей диктуется условиями применения (например, при прохождении труб, стен, всевозможных перегородок и т.д.). Оценка эффективности применения короткометражных (монтажных) ВОЛС на ЭФУ показывает, что отказ от использования оптического соединителя в несколько раз снижает стоимость канала ВОЛС и, вместе с тем, повышает его надёжность. Стремление

сохранить в составе оптоэлектронных каналов разъёмность конструкции привело к созданию более простых и дешёвых "активных" соединителей, изготовленных на основе стандартных электрических разъёмов с той или иной комбинацией выводов. Описывается схемотехника каналов ВОЛС, их работа в экстремальных условиях. Приводится расчёт ВОЛС. При создании короткометражных световодных каналов впервые изготовлен и успешно прошёл испытания "активный" соединитель "ВОК-прибор" с использованием элементов малогабаритного электрического разъёма типа ЛЕМО (рис.3). Для создания многоканальных систем синхронизации криогенного электронно-лучевого ионизатора "Крион" и систем управления и контроля источника сверхпроводящего инжектора установки "СПИН" оптоэлектронные преобразователи набирались в тефлоновую обойму с подключением к электронному обрамлению через многоконтактный активный разъёмный соединитель на базе электрического разъёма РР-15-15 (рис.4). "Сухая" стыковка "световодная жила - оптический преобразователь" обеспечила постоянный оптический контакт со световодной линией. Продолжение работ по совершенствованию монтажных ВОЛС позволило создать более совершенное изделие электронной техники - ВОЛСтрон, содержащее в качестве канала передачи информации отрезок ВОК, который оптически и механически неразъёмно соединён с оконечными устройствами. При изготовлении монтажных ВОЛС и ВОЛСтрона использовалось характерное для "фотонных" линий связи сочетание GaAs - светодиода, p-n - фотодиода и многомодового ВОК, что обеспечивает низкую стоимость, высокие долговечность и надёжность этих устройств. Структурная схема короткометражного канала ВОЛС приведена на рис.5.

Отмечено, что с точки зрения увеличения помехозащищённости среднескоростных приёмных оптических более перспективен метод построения фотоприёмников с гальваническими связями операционных усилителей (ОУ). Для повышения разрешающей способности фотоприёмника необходимо, чтобы сигнальный ток фотодатчика превышал значение входного тока ОУ. Этому и другим требованиям, в основном, отвечают высокоскоростные ОУ с полевыми транзисторами на входе, включённые по схеме с отрицательной обратной связью. Показано, что фотоприёмник, построенный по схеме "ток-напряжение" имеет преимущества перед высокоомпадансной схемой включения, так как фотодиод (ФД) нагружается на малый входной импеданс усилителя, что обеспечивает оптимальный, относительно быстродей-

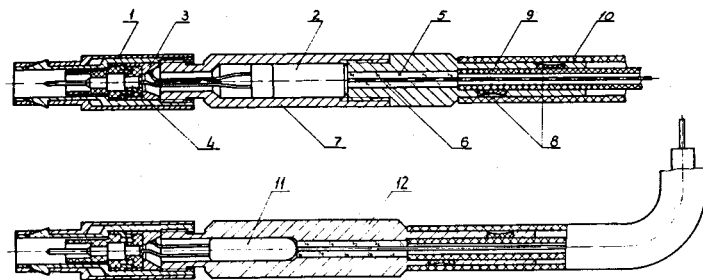


Рис.3. Активный разъёмный соединитель с использованием электрического разъёма типа ЛЕМО: (1 – корпус; 2 – фотодиод; 3–4 – точки распайки электрических выводов; 5 – капилляр; 6, 12 – наконечники; 7 – корпус приборной части; 8 – отверстия в хвостовике для нанесения клея; 9 – ВОК; 10 – защитный кембрик; 11 – светодиод).

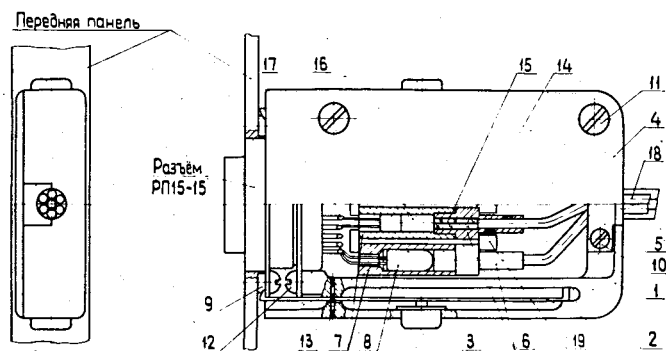


Рис.4. Многоконтактный активный разъёмный соединитель на базе электрического разъёма РП-15-15: (1 – корпус; 2 – пластинчатая пружина; 3 – кнопка; 4 – крышка корпуса; 5 – фиксатор ВОК; 6 – втулка; 7 – втулка для оптического компонента; 8 – светодиод; 9, 13 – элементы крепления; 14 – ОВ; 15 – капилляр; 16 – фотодиод).

вия режим ФД и расширяет информационную полосу принимаемых сигналов. Проанализированы составляющие температурного дрейфа ОУ и вклад фотодиода в температурный дрейф фотоприёмного устройства. Показаны возможные пути уменьшения этих погрешностей. Приведены примеры построения отказоустойчивых короткометражных ВОЛС: а) с применением дифференциального фотоприёмника; б) с применением стабилизирующего МДМ-канала.

Исследование работы ВОЛС в радиационных условиях показали, что наиболее чувствительными к воздействию ионизирующего излучения являются световодные волокна. Отмечено, что уровень наведённого поглощения в ВОК при импульсных воздействиях ионизирующих излучений может на несколько порядков превышать уровень, вызванный достаточно длительным облучением ВОК с малой мощностью дозы, однако она сравнительно быстро релаксирует. Для решения проблемы повышения радиационной стойкости и помехозащищённости короткометражных ВОЛС предложено:

- 1) использование в диапазоне длин волн  $800 + 900$  нм оптических моноволокон только типа "кварц-полимер" и "кварц-кварц", как наиболее радиационно стойких;
- 2) переход в рабочий диапазон длин волн  $1300 + 1700$  нм;
- 3) предварительное проведение технологической радиационной тренировки моноволокон;
- 4) использование опторазвязок и незаземлённых источников питания.

Описанные методы стабилизации параметров оптоэлектронных модулей для работы с цифровыми сигналами произвольного формата упрощают схемотехнику построения световодного информационного канала связи, существенно повышая его надёжность.

Третья глава содержит описание разработанной аппаратуры многоканальных цифровых ВОЛС, входящих в состав систем управления и контроля ионных источников. Анализ задач, решаемых в процессе автоматизации ЭФУ показывает, что световодные системы целесообразно строить по модульному принципу, выделяя в их составе аппаратуру передачи импульсов синхронизации и собственно программно-аппаратную систему сбора данных, а также вспомогательную и служебную аппаратуру, расширяющую и дополняющую возможности многоканальных ВОЛС. Это позволяет для каждого из при-

менений использовать оптимальный по составу и конфигурации набор модулей из их функционально полного набора. Одна из первых унифицированных модульных систем сбора данных ионного источника позволяет одновременно контролировать и отображать с помощью цифровых индикаторов четыре медленно изменяющихся параметра, а также наблюдать форму импульсов с помощью осциллографа: а) ионного тока; б) электронного тока. Передача этих параметров идёт попеременно, с частотой синхроимпульсов запуска источника. В телеметрической системе применяется кодирование аналоговой информации по способу АИМ-ВИМ с последующим преобразованием её в двоично-десятичный код и временное разделение каналов. В качестве коммуникационной среды передачи данных использован трёхметровый жгутовой световодный кабель.

Для синхронизации режимов технологических систем служит многоканальный программно-управляемый таймер ИОЦПЗ-ОИ. Таймер включает в себя дешифратор функций КАМАК, кварцевый генератор  $F = 1 \text{ МГц}$  с делителями опорной тактовой частоты, мультиплексор данных и 10 независимых каналов задержки с рабочим диапазоном  $1 \text{ мкс} \dots 99 \text{ с}$ . Прибор использовался в составе системы синхронизации криогенного электронно-лучевого ионизатора "Крион-1" в сеансах ускорения ядер углерода  $^{12}\text{C}$  и неона  $^{22}\text{Ne}$ . Система чтения информации с выводом на дисплей типа VT-340 осуществляла визуальный контроль временных уставок пусковых сигналов, передаваемых по IO-канальной ВОЛС.

Интеграция короткометражных ВОЛС на первом этапе внедрения на высоковольтных ЭФУ характеризуется наращиванием числа простых каналов в параллель. Параллельная организация каналов ВОЛС используется для повышения скорости передачи цифровой информации на малые и средние расстояния. Особенно наглядно этот принцип организации каналов зафиксирован при построении системы дистанционного управления и контроля (ДУК) источника "дуоплазatron" установки "СПИН".

Система ДУК размещена в двух крейтах КАМАК. Один из них установлен на пульте управления, другой – на высоковольтном терминале. Связь между крейтами осуществляется по восьми IO-метровым параллельным приёмо-передающим каналам ВОЛС, служащим для передачи цифровой и аналоговой информации (рис.6).

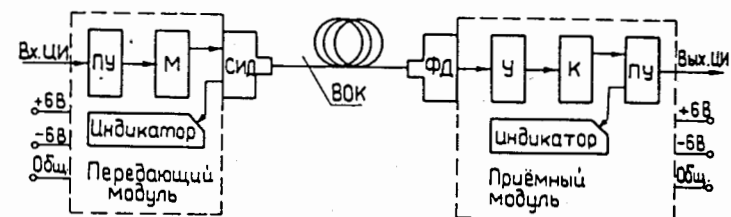


Рис.5. Структурная схема цифрового канала ВОЛС:  
ПУ – преобразователь уровней; М – модулятор;  
СИД – светоизлучающий диод; ВОК – волоконно-оптический кабель; ФД – фотодиод; У – усилитель; К – компаратор;  
Вх./Вых.ЦИ – вход/выход цифровой информации.

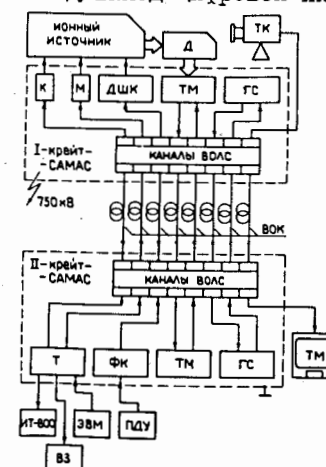


Рис.6. Структурная схема оптоэлектронной системы управления и контроля ионного источника "СПИН":  
в/в терминал: К – блок привода клапана натекателя; М – блок запуска модулятора дуги; ДШК – дешифратор команд управления электроприводами; ТМ – телеметрия; Д – датчики; ГС – устройство дуплексной громкой связи; ТК – устройство передачи видеосигналов от телекамеры.  
Пульт управления: Т – таймер; ФК – формирователь команд управления с пультом дистанционного управления (ПДУ); ТМ – телеметрия; ГС – устройство дуплексной громкой связи; ТМ – устройство приёма видеосигнала с выходом на телемонитор (ТМ).

Выигрыш в сроках создания ДУК для форинжектора установки "СПИН" был достигнут за счёт уменьшения объёма проектирования аппаратной части отдельных систем и их упрощения. В качестве примера предлагается к рассмотрению система телеметрии, создание которой потребовало наименьших затрат. Она состоит из двух полукомплектов:

а) управляемого аналогового коммутатора и датчиков, расположенных на высоковольтном терминале;

б) цифрового частотомера и генератора адреса каналов - на пульте управления установкой.

Оператор дистанционно с пульта управления устанавливает адрес информационного канала на высоковольтном терминале и получает его текущее значение на цифровом табло частотомера. В устройстве использована двухпроводная приёмо-передающая ВОЛС. Положительным качеством такого устройства телеметрии являются простота и надёжность, недостатком - выборочный контроль информационного канала (датчика), создающий неудобства при работе на ЭФУ большого количества датчиков.

Более совершенная световодная система дистанционного измерения параметров ионного источника с выводом информации на дисплей VT-340 построена на основе программно-управляемых блоков КАМАК. Она состоит из двух частей:

а) измерительной, расположенной на высоковольтном терминале;

б) управляющей, расположенной на потенциале "земля" (пульт управления ЛУ-20) и выполняющей следующие задачи:

- генерирование управляющих импульсов, синхронизирующих съём информации с отдельных датчиков и работу измерительного цикла в целом;

- преобразование и первичную обработку данных, поступающих от отдельных датчиков в виде широтно-импульсного кода;

- представление данных оператору в удобной форме на экране дисплея VT-340.

Разделение аппаратуры на две неравные (по количественному составу электронных блоков) части мотивировано, в основном, требованием обеспечения максимальной надёжности телеметрической системы.

В результате выполнения цикла работ по совершенствованию и созданию каналов ВОЛС для работы в экстремальных условиях были изготовлены помехозащищённые системы на новой элементной базе:

а) синхронизация ионного источника с использованием в блоках питания развязывающих трансформаторов с объёмным витком, светодиодов, работающих в форсированном режиме и оптоэлектронных развязок по входному сигналу в передатчике и выходному - в оптическом приёмнике;

б) дистанционного управления режимами работы ионного источника с использованием радиационно-стойкого волоконно-оптического кабеля типа "кварц-полимер" и число-импульсного кода с защитой повторением.

Для создания оптоэлектронных каналов связи с большими строительными длинами (до 1...2) км разработан 19-канальный синхронный волоконно-оптический мультиплексор (ВОМ) с временным уплотнением каналов. В системе использован последовательный код "Manchester". С целью повышения помехозащищённости - реализован метод повторной передачи информации, который компенсирует как возможные сбои в работе электронных блоков устройства, так и помехи, наводимые в ВОК в импульсных радиационных полях.

Для организации связи управляющих ЭВМ с удалённой аппаратурой КАМАК разработан световодный последовательный асинхронный канал связи (СПАКС). Блок СПАКС-01 выполняет параллельные загрузки и выдачу слова данных при управлении от магистрали крейта по командам КАМАК, а блок СПАКС-02 производит эти операции при внешнем управлении через разъёмы на передней панели. Последовательная передача и приём слова в обоих блоках осуществляется через юстируемые оптические соединители ВОЛС, установленные на передней панели.

Для автоматизации работы ионного источника "Крион" создана система управления и контроля с использованием аппаратуры ВОМ, СПАКС и ПЭВМ "Правец-16" (рис.7). Система успешно прошла испытания в сеансах ускорения ядер серы в январе 1993 года на ускорительном комплексе ЛВЗ.



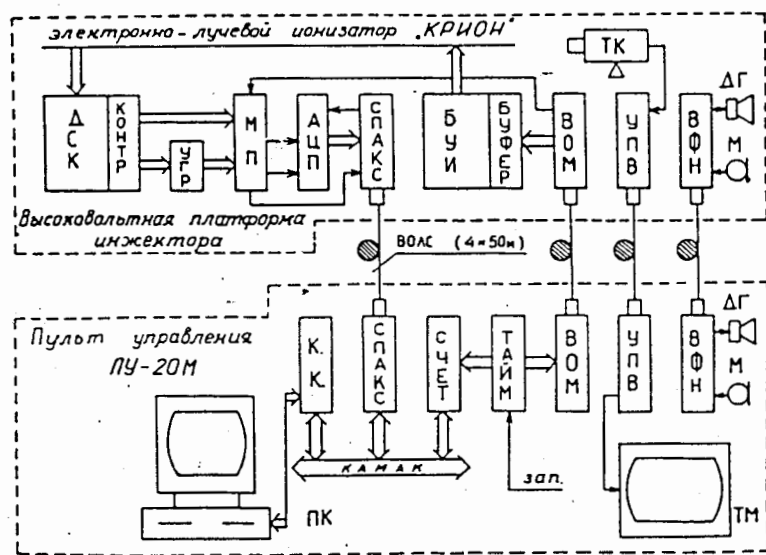


Рис.7. Автоматизированная модульная система управления и контроля ионного источника "Крион". Принятые сокращения:

- а) система управления: БУИ – блок управления инжектором; БУФЕР – устройство контроля прохождения сигналов; ВОМ – волоконно-оптический мультиплексор; ТАЙМ – многоканальный таймер; СЧЕТ – двоичные счётчики;
- б) система контроля: ДСК – датчики системы контроля; КОНТР – устройство контроля датчиков; УТР – устройства гальванической развязки; МП – мультиплексор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; СПАКС – световодный последовательный асинхронный канал связи; КК – контроллер крейта; ПК – персональный компьютер;
- в) сервисные системы: ТК – телекамера "Матрица"; УПВ – устройство приёма/передачи видеосигналов; ТМ – телемонитор; ВФН – система "ВОЛСОФОН"; ДГ – динамическая головка; М – микрофон.

Показано, что использование многоканальных синхронных и асинхронных ВОЛС с уплотнением/разуплотнением информации удешевляет и значительно расширяет технические возможности систем, работающих с моноволоконными световодными линиями большой протяжённости.

Четвёртая глава посвящена вопросам разработки аналоговых ВОЛС с использованием ИК-светодиодов и полупроводникового лазера для создания систем телевизионной телеметрии, а также аналоговых и цифровых систем для образования каналов служебной связи.

Перспективность применения ВОЛС на ЭФУ, в основном, определяется успешным сочетанием достоинств волоконных световодов и цифровых методов передачи информации. Использование цифровых методов приводит к существенному расширению частотного спектра передаваемого сигнала. Особенно это проявляется при кодировании широкополосных сигналов с большим динамическим диапазоном. В работе обосновывается другой возможный путь передачи аналоговой информации на ЭФУ, основанный на использовании модуляции интенсивности светового потока излучателя. Предпосылками для создания аналоговых ВОЛС являются сокращение полосы пропускания и необходимость использования в канале связи:

- многомодовых многожильных (из поликомпонентного стекла) волоконных световодов с большим диаметром световедущей жилы;
- многомодовых одножильных световодов с малым диаметром световедущей жилы и согласующими элементами на торцах.

В качестве примера приводятся результаты создания широкополосных систем телевизионной телеметрии с высокой разрешающей способностью, изготовленных на базе использования аппаратуры промышленных телевизионных установок (ПТУ) – передающих камер типа КТП-39 и "Матрица", а также блоков ВОЛС, осуществляющих передачу видеосигналов с высоковольтного терминала на пульт управления по 50-метровой линии связи. Импульсные сигналы от подсистем ионного источника измеряются двухканальным осциллографом типа С8-17 с "памятью", считываются ПТУ и передаются по ВОЛС. Информация, воспроизводимая на экране телемонитора, позволяет дежурному оператору визуально фиксировать рабочие параметры ионного источника: импульс контрольного напряжения модулятора и импульс тока дуги источника. Такое построение аппаратуры для неконтактных измерений телевизионными методами на высоковольт-

ном терминале имеет ряд преимуществ:

- использование ВОЛС в качестве канала связи в условиях высокого уровня электромагнитных и импульсных радиационных полей снимает значительную часть этих проблем и обеспечивает гальваническую развязку;

- реализуется передача сигналов в широком частотном диапазоне, так как используемый осциллограф имеет полосу пропускания 0...5 МГц;

- повышается точность измерения, так как на телемониторе оператора измерение производится по видимой масштабной сетке осциллографа;

- повышается помехоустойчивость канала связи, так как съём информации, благодаря использованию осциллографа с "памятью" происходит в паузе между мощными рабочими импульсами ионного источника;

- обеспечивается необходимая аппаратная гибкость.

Замена осциллографа на интерфейс стрелочных индикаторов, подключённых к соответствующим датчикам, позволяет осуществить телевизионный контроль медленно изменяющихся параметров ионного источника.

Одним из важных вопросов, требующих своего решения при разработке телевизионной телеметрии, является создание малогабаритного телемонитора для работы на высоковольтном терминале ионного источника в период настройки системы в условиях низкой освещённости и жёстко лимитированного пространства. Впервые создано устройство формирования телевизионного изображения (УФТИ), позволяющее использовать любой осциллограф, имеющий вход "Z", в качестве телемонитора для контроля качества телевизионного изображения.

Существенным моментом, который необходимо учитывать при проектировании систем телевизионной телеметрии с использованием твёрдотельных приёмников изображения, является их сравнительно низкая радиационная стойкость. Доза радиации, вызывающая заметные повреждения в коммерческих ПЗС с поверхностным каналом, оценивается в  $10^3$  рад (si), сильная деградация - в  $10^4$  рад. Следовательно, состояние ПЗС-матрицы может служить индикатором

верхнего предела дозы облучения.

Наладка и обслуживание систем ВОЛС требуют организации служебной связи между оператором, работающим с аппаратурой на противоположных концах волоконно-оптического тракта. В качестве канала служебной связи можно использовать специально проложенные световодные линии или свободные световоды оптических кабелей. Так, для проведения пуско-наладочных работ на инжекторе установки "СПИН" была создана двухволоконная дуплексная система связи с модуляцией по интенсивности и строительной длиной волоконно-оптической линии 2 км, наращивание которой производилось за счёт использования нестандартных разъёмных и неразъёмных оптических соединителей.

Предложена упрощённая методика расчёта энергетического бюджета световодной системы.

Для удешевления ВОЛС весьма актуально создание моноволоконного световодного тракта и универсального приёмо-передающего полупроводникового прибора, который может быть использован как источник излучения в момент передачи информации и как приёмник в режиме приёма, что позволит придать линиям большую гибкость и эффективность. Проведённые исследования отечественной элементной базы показали, что в качестве многофункционального преобразователя "свето-фотодиод" в ряде случаев может быть использован арсенидо-галлиевый мезозиптаксиальный излучающий диод ИК-диапазона типа АЛII8. Использование этого прибора в системе связи "ВОЛСОФОН" с частотной модуляцией позволило реализовать симплексный режим работы по одному волоконному световоду (рис.8).

В качестве микрофона впервые использован световодный датчик - "оптофон", характеризующий качественно иной подход к решению задачи. Форма частотной характеристики экспериментального акустического датчика имеет неравномерность  $\pm 6$  дБ в диапазоне частот 0,1...12 кГц. Динамический диапазон входных сигналов  $\geq 100$  дБ. Приводятся конструктивные особенности микрофона - оптофона. Отмечено, что перспектива создания моноволоконных световодных трактов информационного обмена, построенных с использованием многофункциональных преобразователей, открывает широкие возможности использования этих приборов на высоковольтных электрофизических установках.

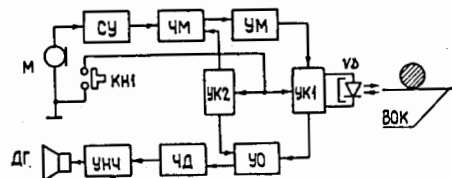


Рис.8. Структурная схема полуккомплекта системы "ВОЛСОФОН":  
 М – микрофон; СУ – согласующий усилитель;  
 ЧМ – частотно-модулированный генератор; УМ – усилитель мощности; Д – светодиод инфракрасного диапазона;  
 ВОК – волоконно-оптический кабель; УО – усилитель-ограничитель; ЧД – частотный детектор; УНЧ – усилитель низкой частоты; ДГ – динамическая головка;  
 УК1, УК2 – дистанционно-управляемый коммутатор;  
 КН1 – кнопка управления режимом приём/передача.

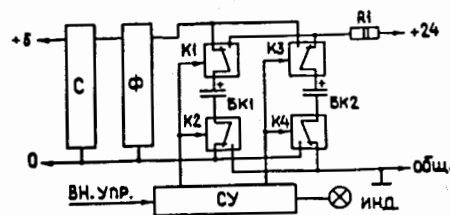


Рис.9. Структурная схема незаземлённого источника питания на суперконденсаторах:  
 СУ – схема управления; К1 + К4 – релейные ключи;  
 БН1, БН2 – батареи ёмкостных накопителей;  
 Ф – транзисторный фильтр; С – стабилизатор напряжения.

Пятая глава посвящена вопросам создания помехозащищённого источника питания приёмных оптических модулей (ПРОМ) ВОЛС, работающих в экстремальных условиях. Экспериментальные исследования показали, что наибольшую опасность для ПРОМ, расположенных на высоковольтном терминале, представляют помехи, создаваемые:

- а) пробоями в ускоряющей системе и разрядной камере ионного источника;
- б) мощными генераторами токов высокой частоты;
- в) эффектами высокого напряжения (тлеющий разряд, коронирование, искрение и т.д.);
- г) импульсной работой тиратронов и тириستоров.

Эти помехи носят импульсный характер и проникают в аналоговую часть ПРОМ, в основном, из общего фидера питания через паразитную ёмкость силового трансформатора источника и общий провод питания. По мере развития ЭФУ уровень помех непрерывно возрастает вследствие расширения спектра рабочих сигналов и, соответственно, сигналов паразитных наводок. В то же время непрерывно снижаются мощности, потребляемые аппаратурой ВОЛС за счёт широкого использования интегральных микросхем. При этом помехозащищённость микроэлектронной базы имеет тенденцию к снижению за счёт повышения быстродействия и уменьшения электропотребления. Компенсационные стабилизаторы напряжения не успевают реагировать на короткие импульсы сетевых помех из-за ограниченности собственной полосы пропускания. Сетевые фильтры, выпускаемые промышленностью для защиты от помех, при использовании на ЭФУ, оказались недостаточно эффективны. Как показал опыт работы, для исключения помех по "земле" и эффектов, создаваемых контурами заземления, в аппаратуре необходимо наличие гальванических развязок.

Анализ недостатков источников питания для ПРОМ показал, что существенно улучшить их характеристики можно применением незаземлённых источников питания (НИП).

Одно из устройств, разработанных для этих целей, изготовлено с применением преобразователя напряжения и развязывающего трансформатора с объёмным витком. Использование развяз-

ващего трансформатора позволило получить большое сопротивление между обмотками с высокой электрической прочностью межобмоточной изоляции и малую проходную ёмкость на уровне единиц пикофарад. Максимальная мощность, получаемая от вторичного источника  $\pm 6$  В, составляет  $P_0 \approx 120$  мВт. Однако, это устройство питания требует рационального размещения ПРОМ и НИП в кассете КАМАК и тщательного экранирования.

Другая, более совершенная конструкция ( $P_0 \approx 500$  мВт), реализована на двух батареях управляемых ёмкостных накопителей ( $2 \times 8 \cdot 10^4$  мкф), поочерёдно переключаемых из режима "заряд" в режим "разряд" с одновременным отключением нагрузки от заземлённой (общей) шины питания источника крейта (рис.9). В схеме управления НИП предусмотрена возможность работы с внешним запуском. Гибкость управления устройством повышает экономичность и помехозащищённость систем ВОЛС за счёт использования импульсного питания там, где это возможно. Нарботка системы ВОЛС на отказ в экстремальных условиях на ЛУ-20М показала, что достоверность передачи данных с использованием данного НИП не хуже  $10^{-9}$ .

Отмечено, что использование НИП в системах ВОЛС, обслуживающих ускорительные установки, позволяют полностью исключить помехи, проникающие через общий фидер питания в фотоприёмные модули. Таким образом, гальваническое разделение шин питания крейта КАМАК и ПРОМ позволяет успешно решать поставленную задачу повышения помехозащищённости аппаратуры ВОЛС на высоковольтных и энергоёмких ЭФУ.

В заключении сформулированы основные итоги проделанной работы:

I. Впервые использована ПЭВМ "Правец-16" для автоматизации сложных систем с использованием световодных каналов информационного обмена на высоковольтных и энергоёмких электрофизических установках.

2. Предложена и реализована архитектура двухволоконной световодной системы мультиплексированных каналов, реализующая алгоритмы передачи импульсов синхронизации и приёма сигналов телеметрии в АСУ ионного источника.

3. Разработана и изготовлена широкополосная ВОЛС для передачи телевизионного изображения с высокой разрешающей способностью. На базе широкополосной ВОЛС и осциллографа с "памятью" впервые реализован аналоговый телевизионный регистратор однократных электрических процессов, происходящих в ионном источнике, установленном на высоковольтном терминале.

4. Создана и испытана качественно новая технология обработки многомодовых оптических волокон до и после электрической сварки, гарантирующая низкое затухание сраста и высокие прочностные свойства соединяемых волокон.

5. Обоснованы основные требования к универсальным оптическим соединителям, применяемым для создания световодных каналов на ЭФУ.

6. Предложена технология формирования "холодным" способом согласующих элементов на торцах оптических волокон с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

7. Разработан и создан набор компонентов, учитывающий структурные особенности волоконно-оптических систем связи.

8. Предложен и реализован комплекс измерительной аппаратуры для снятия индикатрисс излучения светодиодов АЛ107 и АЛ118 перед монтажом их в оптический соединитель.

9. Создан стенд для испытания и настройки систем ВОЛС, оборудованный гелий-неоновым лазером, сварочным устройством, набором специализированного инструмента для обработки волоконно-оптического кабеля, приспособлениями, микроскопом и оптическим тестером.

10. Разработан и создан "оптофон" – световодный акустический датчик (датчик-микрофон) с мембраной-отражателем и местным источником освещения.

11. Впервые разработан и изготовлен в виде модуля КАМАК незаземлённый источник питания на суперконденсаторах, по техническим параметрам превосходящий аккумуляторную батарею, что позволяет создавать качественно новые помехозащищённые системы ВОЛС, имеющие только одно напряжение питания.



12. Предложено и исследовано новое устройство для регистрации информации с координатных камер с помощью волоконной оптики (а.с. № I260888).

Основные материалы диссертации опубликованы в работах:

1. Романов Ю.И. Телеметрическая система "Квант-6" с использованием волоконно-оптической линии связи. ОИЯИ, 10-81-295, Дубна, 1981.
2. Романов Ю.И. Многоканальные волоконно-оптические линии связи в системе управления источником "Полярис". ОИЯИ, 13-82-27, Дубна, 1982.
3. Anichenko N.G., ... Romanov Yu.I., ... Zinoviev L.P. Acceleration of Polarised deuterons at the Synchrophasotron from the Source "Polaris". In : High Energy Spin Physics, 1982, / Brookhaven National Laboratory, p.445 /
4. Романов Ю.И. Устройство синхронизации ионного источника. ОИЯИ, 13-83-478, Дубна, 1983.
5. Романов Ю.И. Многоканальные волоконно-оптические линии связи для систем контроля и управления ионными источниками. В кн.: "Труды восьмого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц", т.П, 1983, Дубна, с.352-354.
6. Воеводин М.А., Романов Ю.И. Аппаратура для передачи аналоговой информации по линиям ВОЛС в электрофизических установках. В кн.: "Труды девятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц", т.1, 1985, Дубна, с. 258-259.
7. Романов Ю.И. Применение телевизионной установки в системе управления высоковольтным ускорителем. ОИЯИ, 13-85-580, Дубна, 1985.
8. Романов Ю.И. Межобъектовая волоконно-оптическая линия связи для передачи аналоговой информации. ОИЯИ, 13-85-599, Дубна, 1985.
9. Романов Ю.И., Турзо И. Система дистанционного измерения параметров ионного источника. ОИЯИ, 13-86-513, Дубна, 1986.

10. Романов Ю.И. Отказоустойчивая волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС). ОИЯИ, 13-86-566, Дубна, 1986.
11. Романов Ю.И. Периферийная оптоэлектронная система дистанционного управления и контроля инжектора установки "СПИН". В кн.: "Труды десятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц", т.1, 1987, Дубна, с.71-72; ОИЯИ, 13-86-533, Дубна, 1986.
12. Романов Ю.И. 19-канальная световодная система передачи данных с временным уплотнением каналов. ОИЯИ, 13-88-636, Дубна, 1988.
13. Романов Ю.И. Стабилизация параметров приёмных оптоэлектронных модулей. ОИЯИ, 13-88-723, Дубна, 1988.
14. Романов Ю.И. Цифровой волстрон для системы телеуправления ионным источником. ОИЯИ, 13-88-827, Дубна, 1988.
15. Романов Ю.И. 19-ти канальный волоконно-оптический мультиплексор. В кн.: "Труды XI-Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц", т.1, 1989, Дубна, с.139-141.
16. Романов Ю.И. Помехозащищённый световодный канал синхронизации ионного источника. ОИЯИ, 13-89-847, Дубна, 1989.
17. Романов Ю.И. Помехозащищённая световодная система дистанционного управления режимами работы ионного источника. ОИЯИ, 13-90-63, Дубна, 1990.
18. Ershov V.P., ... Romanov Yu.I. ... Zhigulin I.V. Polarized deuteron beam at the Dubna Synchrophasotron, JINR E13 - 90 - 331, Dubna, 1990.
19. Романов Ю.И. Моноволокная световодная система для симплексного информационного обмена. ОИЯИ, P13-90-473, Дубна, 1990.
20. Гусаков Ю.В., Романов Ю.И. Волоконно-оптические нестандартные соединители для световодных линий связи высоковольтных электрофизических установок. ОИЯИ, P13-91-148, Дубна, 1991.
21. Романов Ю.И. Незаземлённый источник питания на суперконденсаторах. ОИЯИ, P13-91-317, Дубна, 1991.

22. Романов Ю.И. Световодный канал передачи видеосигналов с использованием полупроводникового лазера. ОИЯИ, РІЗ-92-366, Дубна, 1992.
23. Kovalenko A.D., ... Romanov Yu.I., ... Tsarenrov A.P.  
The first run with  $S$  relativistic nuclei at the LHE accelerating facility in Dubna. JINR Rapid communications N2 /59/ - 93, p. 53.
24. Романов Ю.И. Усилители с гальванически развязанными цепями на основе диодных оптопар. ОИЯИ, РІЗ-93-105, Дубна, 1993.
25. Романов Ю.И. Измерительные устройства с гальванически развязанными цепями на основе высоковольтных оптронов. ОИЯИ, РІЗ-93-128, Дубна, 1993.
26. Овсянников В.П.... Романов Ю.И. и др. Автоматизированная модульная система управления и контроля ионного источника "Крион-С". Дубна, ІЗ-93-219, Дубна, 1993.
27. Ovsyannikov V.P., ... Kovalenko A.D., ... Romanov Yu.I.  
In : Proseeding of the 5 - th International Conference on Ion Sources. Beijing, China, 31 August - 4 September 1993 : Rev. Sci. Instrum. 65.(4), April 1994, p. 1133.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 апреля 1996 года.