



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

13-99-316

На правах рукописи  
УДК 621.3.038.612

Р-693

**РОМАНОВ**  
Юрий Иванович

**РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ  
МНОГОКАНАЛЬНЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ  
И РАДИОЧАСТОТНЫХ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ,  
СЕРВИСНОЙ АППАРАТУРЫ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ  
ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ**

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Дубна 1999

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований

Научный консультант :  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник

МАЛЬЦЕВ  
Анатолий Андреевич

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук,  
профессор

ЗАИЦЕВ  
Лев Николаевич

доктор технических наук,  
профессор

ОМЕЛЬЯНЕНКО  
Михаил Николаевич

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

ПИСАРЕВ  
Алексей Федорович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Институт физики высоких энергий, г. Протвино, Московская область

Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2000 года в "\_\_\_" часов  
на заседании диссертационного совета Д-047.01.02 в Лаборатории  
высоких энергий Объединенного института ядерных исследований,  
г. Дубна, Московской области, конференц-зал ЛВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1999 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор

*М. Ф. Лихачев*

Лихачев М. Ф.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Проблематику настоящей диссертации определяет широкий круг вопросов автоматизации экспериментальных исследований, связанных с проверкой технических решений при работе ионных источников, установленных на высоковольтном терминале форинжектора линейного ускорителя, и работающих в составе инжекционного комплекса.

Диссертация основана на материалах аналитических исследований и практических разработок, выполненных автором в ЛВЭ ОИЯИ за период с 1976 по 1999 г.г.

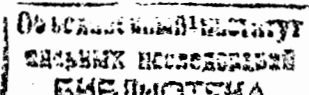
### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ.

Ускорители заряженных частиц являются неременным инструментом для исследования в области ядерной физики и физики элементарных частиц. Важнейшим элементом любого ускорителя ионов является его источник. В настоящее время разработано и исследовано много типов различных источников ионов. Этой проблеме посвящаются международные конференции и совещания российского значения по ускорителям. От параметров используемого источника ионов во многом зависят характеристики пучков ускорителя, эффективность его работы. В стоимость сооружения источника ионов входит и стоимость систем управления и контроля.

Начиная с 60-годов развитие средств и методов обеспечения работы ионных источников оформилось, в два больших направления, одно из которых относится к созданию простых и эффективных систем управления, а другое – связано с автоматизированным сбором данных, т.е. контролем работы жизненно-важных систем источника, установленного на высоковольтном терминале и в радиационной зоне линейного ускорителя.

Совместное решение этих задач, связанных с запуском и эксплуатацией ионных источников, которое в течение длительного периода исследований и разработок проводилось по ежегодным Тематическим планам, утверждаемым дирекцией Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, – является крупной и актуальной научной проблемой.

К первой группе задач, отраженных в данной диссертации, относится автоматизация ионных источников типа дуоплазматрон на линейном ускорителе ЛУ-9 синхрофазотрона ОИЯИ – главного звена экспериментальной базы ЛВЭ и модельного сверхпроводящего синхротрона. Последний был создан в ЛВЭ в 1985 году по программе сооружения ускорителя релятивистских ядер с широким спектром масс, как



вероятный Сверхпроводящий Инжектор Нуклотрона (установка СПИН). Комплекс аппаратуры, изготовленный в кратчайшие сроки для запуска ионного источника СПИН обеспечил высокую надежность управляющих средств и дистанционный контроль параметров по измерениям сигналов от датчиков, что позволило существенно расширить программу изучения различных режимов работы установки отдельно в теплом и криогенном вариантах.

Вторая группа задач диссертации относится к разработке средств управления и контроля для ионных источников типа "ПОЛЯРИС" и "Крион", источников с новыми физико-техническими возможностями. Создание новых оптоэлектронных систем связи с улучшенными характеристиками и другого сопутствующего оборудования для этих источников было необходимо для модернизации базового ускорителя ЛВЭ в рамках выполнения проекта "НУКЛОТРОН".

Третья группа задач, отраженных в диссертации относится к разработке перспективных средств, методик управления и сбора данных с датчиков ионного источника "Крион-С", расположенного на высоковольтной платформе линейного ускорителя. Актуальность этой тематики обусловлена непрерывным усложнением различных технологических систем ионного источника, увеличением количества сервисной аппаратуры и каналов контроля и регистрации сигналов от детекторов пучка.

В диссертации также рассматривается одна из тенденций развития оптической связи на высоковольтных электрофизических установках, производственных помещениях ускорительного комплекса и формально выходящая за рамки "проводной" световодной связи, а именно открытая оптическая связь, система, в которой передатчик и приемник находятся в пределах прямой видимости, и оптическая информация распространяется в разделяющей их среде. В отличие от "проводной" - открытая связь во многих случаях и удобнее, и стоит значительно дешевле т.к. не использует волоконно-оптических кабелей с большими строительными длинами для организации каналов связи "ионный источник - пульт управления - ионный источник".

#### ЦЕЛЬ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.

Диссертация ставит целью дальнейшее развитие и совершенствование методов бесконтактной регистрации как медленно изменяющихся параметров, так и однократных электрических процессов, происходящих в ионном источнике, установленном на высоковольтном терминале форинжектора; реализации и практического внедрения аппарат-

но-программных средств с использованием "проводной" (волоконно-оптической линии связи) и беспроводной (атмосферной) оптической связи, а также повышение информативности регистрирующих систем, используемых на электрофизических установках для управления и контроля работы ионного источника; оценку перспективы использования результатов исследований оптоэлектронных систем связи как в технике ускорительного эксперимента, так и для прикладных целей.

#### НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ.

1. Впервые сформулированы общие и конкретные требования к системам управления и контроля ионными источниками линейных ускорителей заряженных частиц;
2. Впервые предложены, разработаны и реализованы на практике - телеметрическая система ТС-6 с использованием 3-х сантиметрового радиоканала и "закрытый" оптический канал - для контроля и управления инжектором линейного ускорителя ядер ЛУ-9М;
3. Впервые предложен, разработан и реализован на практике комплекс управления ионными источниками, установленными на высоковольтном терминале форинжектора синхротронов с использованием волоконно-оптических линий связи;
4. Впервые предложены, разработаны и реализованы на практике бесконтактные методы исследования однократных электрических процессов, происходящих в ионном источнике, установленном на высоковольтном терминале форинжектора линейного ускорителя, с использованием широкополосной ВОЛС и телевизионного регистратора;
5. Решена проблема электромагнитной совместимости, позволившая исключить воздействие на информационные каналы мощных и интенсивных радиопомех, сопровождающих работу линейного ускорителя и систем питания ионного источника;
6. Решена проблема юстировки и согласования характеристик отдельных оптических компонентов аппаратуры ВОЛС, предназначенной для использования в системах управления и контроля ионных источников;
7. Впервые с помощью многоканальных ВОЛС и автоматизированной системы управления и контроля электронно-лучевой ионный источник "КРИОН-С" обеспечил экспериментальную инжекцию многозарядных ионов в НКЛОТРОН, работу ускорительного комплекса синхрофазотрона при ускорении ядер  $S^{16+}$  и эксперименты на линейном ускорителе ЛУ-20 при производстве политрековых мембран;
8. Впервые с помощью многоканальной аппаратуры ВОЛС получены эк-

спериментальные результаты, внесшие значительный вклад в безаварийную работу ионных источников, расположенных на высоковольтном терминале и тем самым обеспечившим успешное проведение первоочередных экспериментов и запланированное выполнение научной программы исследований на ускорительном комплексе ЛВЭ ОИЯИ:

9. Впервые для научных и прикладных исследований разработан и создан набор волоконно-оптических датчиков и знакосинтезирующих индикаторов коллективного пользования, обеспечивающих новые функциональные и сервисные возможности;
10. Разработана технология создания оптоэлектронных систем управления и контроля, сервисной аппаратуры ионных источников линейных ускорителей заряженных частиц.

#### АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.

Основные результаты и выводы, включенные в диссертацию, обсуждались на научно-методических семинарах Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, докладывались на 3-х Международных симпозиумах по физике высоких энергий и на 6-ти Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц:

- Международная конференция по ионным источникам, Брукхэйвен, США, 1982;
- 5 - Международная конференция по ионным источникам, Пекин, КНР, 1983;
- 6 - Международная конференция по ионным источникам, Вислер, Канада, 1985;
- Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1981;
- Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1983;
- Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1985;
- Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1987;
- Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1989;
- Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1990.

ПУБЛИКАЦИИ. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 22 печатных работах в виде препринтов и сообщений ОИЯИ, а

также статей в сборниках "Краткие сообщения ОИЯИ", отечественных и зарубежных журналах (ПТЭ, ФЧАЯ, Rev.Sci.Instrum.), сборниках трудов указанных симпозиумов, совещаний, семинаров.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ отвечают избранной теме, содержанию излагаемого материала и требованиям его цельности. Работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы из 110-ти наименований, содержит 133 страницы машинописного текста и 92 иллюстрации в виде схем, графиков, временных диаграмм и таблиц.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА в проведенное исследование выражается в том, что им лично была разработана программа исследований: выдвинуты положенные в основу работы научные идеи и дано их теоретическое обоснование; разработаны методы передачи цифровой и аналоговой информации в разнородных средах: в диэлектрических световодах и атмосфере (волоконно-оптический - , радиочастотный - и атмосферный каналы), способы защиты информации в условиях интенсивных и мощных радиопомех и импульсных радиационных полей, а также схемы их практической реализации; разработаны и исследованы бесконтактные методы съема информации, позволяющие проводить экспериментальную проверку технических решений на основе изучения физических процессов в отдельных функциональных узлах ионного источника, установленного на высоковольтном терминале форинжектора линейного ускорителя; разработана методика юстировки волоконно-оптических систем в инфракрасном диапазоне; разработана методика калибровки волоконно-оптических датчиков; проведены основные ускорительные эксперименты; выполнена систематизация и обобщение результатов и сформулированы вынесенные на защиту научные положения.

#### СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВО ВВЕДЕНИИ прослежены тенденции развития каналов оптической связи, показана их историческая ретроспектива. Обоснована необходимость и актуальность разработки и создания унифицированных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для работы в системах управления и контроля ионных источников, расположенных на высоковольтном терминале в радиационной зоне линейного ускорителя. Сформулирована цель работы, отмечены ее новизна и практическая ценность, изложены главные положения диссертации.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ рассмотрен аппарат лучевой теории, пренебрегающей конечностью длины волны света и нелинейными эффектами в ступенчатом и градиентном световодах.

В ВОЛС используются две разновидности цилиндрических волоконных световодов: двухслойные ступенчатые со скачкообразным изменением показателя преломления между сердцевиной и оболочкой и градиентные: в последних показатель преломления в плоскости, перпендикулярной оси, монотонно уменьшается от центра к периферии. В двухслойном световоде излучение распространяется вдоль оси благодаря эффекту полного внутреннего отражения, при этом отдельные лучи имеют траектории, описываемые ломаными линиями, изменяющими направление на границе "сердцевина - оболочка".

В градиентном световоде рефракция приводит к самофокусировке отдельных лучей на осевой линии, при этом их траектории представляют собой синусоиды, а для немеридиональных лучей - винтовые линии.

Удержание излучения внутри оптически более плотной центральной части световода обеспечивается только для тех лучей, которые падают на торец не слишком косо. Имеется некоторый критический угол  $\varphi_0$ , определяющий угловую апертуру световода: лишь лучи с углами  $\varphi \leq \varphi_0$  распространяются по волокну. Параметр  $NA = \sin \varphi_0$  - числовая апертура - является важной характеристикой световода. Излучение, заключенное внутри конуса с углом при вершине  $\varphi = \varphi_0$ , представляет собой направляемые или каналируемые лучи (моды). При  $\varphi > \varphi_0$  вся энергия такого луча постепенно перейдет в оболочку и удержится в ней, если выполняется условие полного внутреннего отражения на внешней границе оболочки. Эта часть излучения представляет собой вытекающие или оболочечные лучи (моды). Наконец, при еще больших углах лучи выходят и из оболочки - это излучаемые моды. При больших длинах распространения вытекающие лучи поглощаются в оболочке и в процессе светопередачи участвуют только внутриапертурные направляемые лучи.

Описанным механизмом светопередачи обусловлена и дисперсия волокна, заключающаяся в различии групповых скоростей отдельных составляющих оптического излучения. Физически этот эффект вызывается двумя обстоятельствами: во-первых, тем, что разные по углу падения лучи (моды) проходят в световоде различные расстояния и, во-вторых, тем, что свойства материала зависят от длины волны излучения  $\lambda$ , а любой реальный источник не монохроматичен. Иными

словами, дисперсия волокна, трактуемая более широко, чем это принято в традиционной оптике, зависит не только от степени когерентности излучения, но и от геометрических характеристик волокна.

Дисперсия, подобно инерционным процессам в электрических цепях и электронных приборах, проявляется в "завале" частотной характеристики световода (зависимость интенсивности излучения на выходе от частоты модуляции) и в искажении передаваемых импульсов света (расплывание, уширение).

Качественное сравнение двух типов волокон позволяет заключить, что градиентные световоды должны иметь лучшие дисперсионные свойства. В этих световодах свет, распространяющийся по искривленной траектории, значительную часть проходит в областях с уменьшенным значением "n", т.е. с большей скоростью, чем, например, осевой луч света; поэтому при различии длин двух световых лучей время их прохождения может оказаться практически одинаковым. В световоде со ступенчатым изменением показателя преломления эффект выравнивания времени распространения не имеет места. Именно стремление ослабить дисперсионные эффекты и явилось основным стимулом развития градиентных световодов.

Ряд полезных соотношений может быть получен при использовании аппарата лучевой теории, пренебрегающего конечностью длины волны света и нелинейными эффектами.

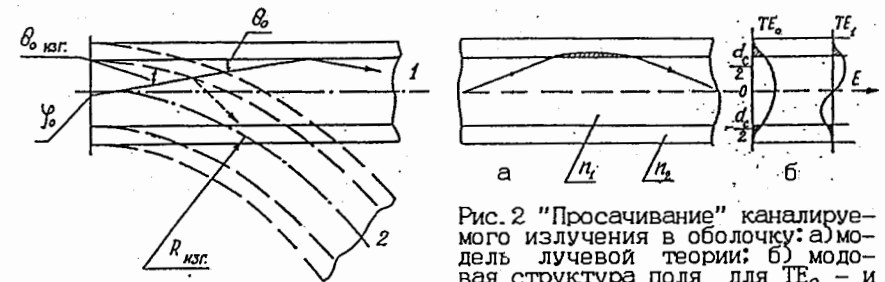


Рис. 1 Ход световых лучей в ступенчатом световоде до (1) и после (2) изгиба.

Рис. 2 "Просачивание" каналируемого излучения в оболочку: а) модель лучевой теории; б) модовая структура поля для  $TE_0$  - и  $TE_1$  - мод.

Если на торец ступенчатого волокна (Рис. 1) из среды с показателем преломления "n" поступает поток излучения, то согласно закону отражения-преломления для поверхностей торца и границы "сердцевина-оболочка":

$$NA = \sin \varphi_0 = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \quad (1)$$

Это прямо следует из того, что  $\sin \varphi_c / \sin \theta_0 = n_1 / n_0$ , а  $\sin(\pi/2 - \theta_0) / \sin(\pi/2) = n_2 / n_1$ . Обычно излучение падает из воздуха ( $n_0 = 1$ ), а значения  $n_1$  и  $n_2$  близки друг к другу, тогда из числовой апертуры получаем:

$$NA = \sin \varphi_c \approx \sqrt{2n_1 \Delta n} = n \sqrt{2\Delta n}, \quad (2)$$

где  $\Delta n = (n_1 - n_2)$ , а  $\Delta = \Delta n / n_1$  — разность и относительная разность показателей преломления сердцевин и оболочки. Изгиб световода приводит к тому, что угол встречи луча с границей раздела "сердечник-оболочка" возрастает ( $\theta_{сизг} > \theta_0$  на рис. 1) и угловая апертура уменьшается. Используя ту же схему расчета с учетом  $r_{изг} \gg d_c$ , не трудно заметить, что снижение числовой апертуры до 90 % от своего первоначального значения произойдет при радиусе изгиба:

$$r_{изг. мин.} = 2.5 \cdot d \frac{n_1}{\Delta n} = 5 \cdot d_c \frac{n_1^2}{NA^2} \approx 10 \frac{d_c}{NA^2}. \quad (3)$$

Приближенное соотношение в (3) получено при  $n_1 \approx 1.5$ . При типичных  $d_c = 50$  мкм и  $NA \approx 0.23$  получаем  $r_{изг. мин.} \approx 1$  см.

Определение  $r_{изг. мин.}$  условно: за критерий принято  $NA_{изг.} \approx 0.9 NA$ . Отметим также, что (3) определяет  $r_{изг. мин.}$  только исходя из условия изменения апертуры; практически более чувствительными к изгибу могут оказаться дисперсионные эффекты.

Применительно к градиентному световоду расчеты по лучевой теории для малых углов падения дают траекторию луча в виде периодической функции (в простейшем случае синусоиды), причем в общем случае длина периода зависит от координаты и угла падения луча на торец световода. Если значение  $n$  достаточно мало, то практически при любом конкретном законе изменения  $n = f(r)$  периоды для всех лучей оказываются одинаковыми, т.е. осуществляется условие самофокусировки.

Лучевая теория позволяет провести полуколичественную оценку и межмодовой дисперсии. Из рис. 1 видно, что для двухслойного световода разница времен распространения центрального осевого луча и луча с  $\varphi = \varphi_0$  составляет:

$$\Delta t_{\varphi_0} = \frac{\Delta n}{c} L = \frac{NA^2 L}{2n_1 c} \approx NA^2 L, \text{ мкс.} \quad (4)$$

где  $c$  — скорость света. Последнее равенство в (4) получено для  $n \approx 1.5$ ; таким образом, для типичного ступенчатого световода с  $NA$

$\approx 0.2$  получаем  $\Delta t_{\varphi_0} / L \approx 40$  нс/км.

Выражение (4) определяет верхнюю границу постоянной времени волноводной дисперсии  $\tau_0$  (всегда  $\tau_0 < \Delta t_{\varphi_0} / L$ ), конкретное значение которой зависит от закона углового распределения интенсивности света.

Более детальную информацию о закономерностях распространения излучения в волокне дает волновая (модовая) теория, базирующаяся на строгом решении системы уравнений Максвелла.

Анализ частных решений волнового уравнения (волноводных мод) показывает, что они описываются функциями монотонно спадающими (обычно экспоненциально) к периферии сердечника, но в то же время не обрывающимися на границе "сердечник-оболочка" (рис. 2). Иными словами, направляемые моды частично просачиваются в оболочку, или, говоря на языке лучевой теории, отражение происходит не на геометрической поверхности раздела, а в некоторой приповерхностной области (рис. 2а).

При распространении сигнала по волокну происходит его затухание. Причиной потерь оптической мощности являются различные виды поглощения, а также обусловленное рассеянием изменение углового распределения лучевого потока и вытекание возникающих внеапертурных лучей из сердцевин.

Для количественной оценки потерь пропускания используется удельное затухание оптического сигнала ( $B$ ), дБ/км, и определяемое как:

$$B = 1/L \cdot 10 \lg(P_{вх} / P_{вых}),$$

где  $P_{вх}$  и  $P_{вых}$  — мощности излучения на входе и выходе световода длиной  $L$ , км.

Описание радиационного воздействия на оптическое волокно во всех деталях сложно, наблюдаемые явления не всегда допускают однозначную интерпретацию, однако некоторые общие закономерности для кварцевых световодов все же могут быть сформулированы. Установлено, что при малых дозах, не превышающих  $10^7$  рад, различные виды радиации (электроны, протоны, нейтроны,  $\alpha$ -частицы,  $\gamma$ - и рентгеновские лучи) оказывают на световоды практически одинаковое воздействие. При слабых воздействиях дополнительное поглощение линейно зависит от дозы, а затем наблюдается выход на участок насыщения. Наведенное поглощение состоит из двух компонент: стабильной, сохраняющейся практически навсегда, и временной, исчезающей при отжиге или интенсивной засветке.

ВТОРАЯ ГЛАВА посвящена оценке эффективности использования оптоэлектронных приборов в зоне передачи информации.

Наличие оптической связи является важным свойством прибора и устройства, так как оно позволяет создать информационное поле пространственно разделенных, электрически несвязанных цепей источников и приемников сигналов. Это качество чрезвычайно важно для систем управления и контроля ионных источников, расположенных на высоковольтном терминале линейного ускорителя.

Эти системы работают в условиях комплексного воздействия электромагнитных помех различного рода:

– внутренних (например, коммутационные помехи и помехи, создаваемые эффектами высокого напряжения: тлеющий разряд, коронирование, искрение и т. д.);

– внешних (мощные генераторы токов высокой частоты, электромагнитный импульс ионизирующего излучения и т. п.).

Показано, что комплексное воздействие электромагнитных помех на микроэлектронную аппаратуру информационных систем может привести к полной потере ее работоспособности.

Разработано несколько вариантов оптоэлектронных каналов передачи (ОКПИ) цифровой и аналоговой информации на основе волоконных световодов. В зависимости от специфики применения ОКПИ может быть неразъемным (типа "волстрон"), так и разъемным, с пассивными или активными соединителями (рис. 3).

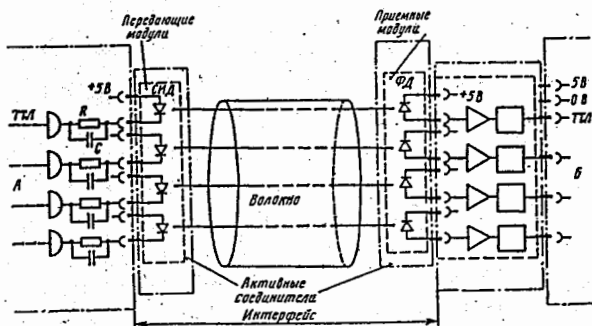


Рис. 3 Схема интерфейса для обмена данными между ПЭВМ и периферийным оборудованием.

Волстроны сохраняют все достоинства разъемного ОКПИ (высокую помехозащищенность, высокую скорость передачи), а также имеют меньшие габариты и массу и более высокую устойчивость к воздействию различных эксплуатационных факторов (влажность, пыль, виб-

рации и др.), чем разъемные ОКПИ. Это связано с тем, что оптические соединители весьма чувствительны к воздействию эксплуатационных факторов. Как показывает оценка эффективности применения волстронов, при большой протяженности линейного тракта (более 100 м) технические и экономические преимущества волстронов теряются.

Кроме того, следует учитывать, что волстрон неремонтопригоден. Отказ любого из элементов (излучателя, фотоприемника или волоконно-оптического кабеля) означает отказ всей линии связи.

Коэффициент передачи ОКПИ определяется коэффициентом передачи его составных частей:

$$K_0 = \prod_{j=1}^5 K_j,$$

где  $K_0$  – коэффициент передачи ОКПИ;  $K_j$  – коэффициент передачи составных частей оптоэлектронного канала.

Важнейшими параметрами ОКПИ на основе волоконных световодов являются длина линии  $L$ , скорость передачи информации  $V$  при допустимой вероятности появления ошибки  $P_{0w}$ , и стоимость ОКПИ с учетом изготовления и эксплуатации  $C$ . Удельная стоимость передачи информации, т.е. стоимость передачи единицы информации на единицу длины за единицу времени при допустимой вероятности появления ошибки, равна:

$$C_{уд} = C/LV.$$

По виду передаваемой информации различаются цифровые и аналоговые ОКПИ. Цифровые ОКПИ осуществляют помехоустойчивую передачу импульсных двоичных последовательностей цифровых сигналов. При разработке схем передающих оконечных устройств учитывались следующие требования:

- согласование входных уровней сигналов с ТТЛ микросхемами;
- стабильность работы излучающих диодов при воздействии эксплуатационных факторов;
- быстрое действие излучающих диодов при действии управляющих сигналов;
- повышение помехоустойчивости входных цепей передающего оконечного устройства.

Экспериментально установлено, что основной причиной сбоев при передаче сигналов лог.0 и лог.1 является уход параметров режима работы излучающего диода цифрового ОКПИ вследствие температурного разброса его вольтамперной характеристики (ВАХ) и погрешности

сопротивления резистора нагрузки, включенного последовательно в цепь излучающего диода.

Для надежной защиты входных цепей цифровых передающих оконечных устройств от внешних помех необходимо иметь передаточную характеристику с гистерезисом. Величина гистерезиса должна быть больше, чем максимальная помеха, наблюдаемая на фоне сигнала.

Показано, что одним из схемотехнических путей снижения времени задержки включения в передатчике ОКПИ является способ форсированного заряда барьерной емкости излучающего диода.

Другим способом уменьшения времени задержки включения светодиода является предварительный заряд барьерной емкости излучающего диода ИД до величины, близкой к пороговому напряжению включения ИД.

Для систем ближней и дальней оптической связи, используемой в каналах управления и контроля на высоковольтном ускорителе, необходимы фотоприемные устройства с широкой информационной полосой и малой пороговой мощностью входного оптического сигнала. Эти устройства должны быть достаточно просты и надежны. Характеристики фотоприемных устройств на основе р-і-п фотодиода (ФД) и быстродействующих операционных усилителей (ОУ) вполне отвечают этим требованиям. Известно, что для фотоприемных устройств включение ОУ по схеме с отрицательной обратной связью ( $R_{oc}$ ) превращает его в трансимпедансный широкополосный усилитель (ТИУ). Такая схема включения ОУ имеет преимущества перед другими, так как ФД нагружается на малый входной импеданс усилителя.

Показано, что использование трансимпедансного усилителя в качестве нагрузки фотодиода при одинаковой широкополосности позволяет получить выигрыш в амплитуде сигнала в  $(K_{\tau} + 1)$  раз, при этом возникает возможность существенно увеличить сопротивление, подключаемое ко входу усилителя, что способствует улучшению соотношения сигнал/шум на выходе усилителя.

В цифровых оптоэлектронных каналах (рис. 3) на вход воздействуют сигналы цифровых уровней, а на выходе формируются цифровые уровни выходных сигналов. Допустимый уровень бессбойной работы  $P_{зд}$  или вероятность ошибки (удовлетворительным считается значение  $10^{-9}$ ) зависит от соотношения  $I_{\phi}^1 / I_{шэ}$ , где  $I_{\phi}^1$  – ток фотосигнала на выходе ПРОМ, соответствующий уровню лог. 1. Вероятность ошибки при передаче цифровой информации при  $P_{зд} = 10^{-9}$ , зафиксированная экспериментально, при соотношении  $(I_{\phi}^1 / I_{шэ})_{min} = 12$ .

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ описаны технология изготовления неразъемных и разъемных оптических соединителей, обеспечивающих достижение заданных выходных параметров соединения и их характеристики.

Назначение разъемных оптических соединителей – обеспечивать многократные соединения волоконно-оптических кабелей (ВОК) друг с другом и с оптоэлектронными и оптическими устройствами ВОЛС.

Для аппаратуры, работающей на ЭФУ были спроектированы и изготовлены следующие классы ОС: одноволоконные и многоволоконные: "кабель – кабель" и "кабель – прибор".

Диаметр соединяемых световодов определяет как размеры, так и конструкцию ОС. Способ ввода и вывода излучения также определяет многие конструктивно-технологические параметры ОС. Особенно сложным является ввод максимального количества световой энергии в оптическую линию. Некогерентность излучения и широкий угол пучка света современных светодиодов позволяют вводить в ОБ всего 1–2 % общей мощности.

Соединение ОБ – детектор излучения, напротив, оказывается простым, так как размеры чувствительной площадки фотодиодов либо равны, либо значительно превышают диаметр сердцевины волокна, а диаграмма приема фотодиодов шире, чем диаграмма излучения ОБ. При соединении компонентов любым методом большое значение имеет качество торцевых поверхностей ОБ. Подготовка их к монтажу составляет еще одну серьезную проблему.

Для заделки ВОК использовались наконечники цилиндрической формы двух типоразмеров, диаметром 2,5 мм и 3,6 мм. Изгибы в канале при обработке скругляются, делаются плавными, в них не должно быть выступов во избежание повреждения ОБ при монтаже. Наконечники выполнялись из износостойких коррозоустойчивых материалов (в основном из нейзильбера), а также из хромосодержащих нержавеющей сталей. Опробована технология изготовления наконечников из пластмассы.

Прецизионные детали наиболее трудоемки в изготовлении, поэтому конструкция и технологический процесс изготовления ОС должны разрабатываться таким образом, чтобы количество прецизионных деталей было наименьшим. Требования к точности соединения определяются, в основном, величиной допустимых потерь сигнала и диаметром сердцевин соединяемых ОБ. В настоящее время наиболее используются ОБ с диаметром сердцевины 50 мкм (КК125/50).

Для большинства систем передачи информации допустимые потери в



ОС не должны превышать 1,5–2,0 дБ/км (рис. 4), что соответствует допустимому эксцентриситету сердцевин соединяемых ОВ 5 – 10 мкм.

Использование центрирующих направляющих втулок для ОС с круглыми наконечниками позволяет 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. Использование стеклянных микрокапилляров улучшает условия шлифовки и полировки торцов наконечников после сборки и упрощает процесс сборки кабельной части ОС. В ряде случаев можно имитировать прецизионное отверстие необходимого диаметра для ОВ, состыковав ролики определенного диаметра. Ниже приведены основные конструктивно-технологические решения нестандартных ОС, в которых ОВ согласуются механически.

Разработан простой и надежный "активный" разъемный соединитель с постоянным оптическим контактом, выполненный на базе субминиатюрного электрического коаксиального разъема типа "LEMO". Стыкуемые с ОВ оптические компоненты юстируются в процессе монтажа ВОЛС по минимуму потерь в линии и, затем, фиксируются. При этом потери, вносимые оптическим контактом, не превышают 2 дБ, разъемное соединение с электронным обрамлением ВОЛС обеспечивается электрическими выводами разъема.

Разработаны универсальные юстируемые соединители "кабель – прибор". Стыкующиеся части соединителя юстируются в процессе монтажа ВОЛС по минимуму потерь в линии связи. При этом методе стыковки потери, вносимые соединителем, могут быть уменьшены до уровня менее 1 дБ.

Разработаны многоконтактные оптические соединители "кабель – прибор", изготовленные по принципу матриц. Механическая основа прибора состоит из двух матриц – пластин с точно выполненными отверстиями для ОВ и оптических компонентов. Оптические компоненты совмещаются с помощью штифтов и специальных гребенок. Оптические потери не превышают (0,8 – 1,8) дБ на контакт.

Для повышения эффективности ввода-вывода оптического излучения в волоконно-оптический световод предложено использовать микролинзы, сформированные на торце участка световода с уменьшенным диаметром оболочки. Согласующие элементы увеличили эффективность ввода-вывода: от лазера – до 70 % и до 20 % от светодиода (рис. 5).

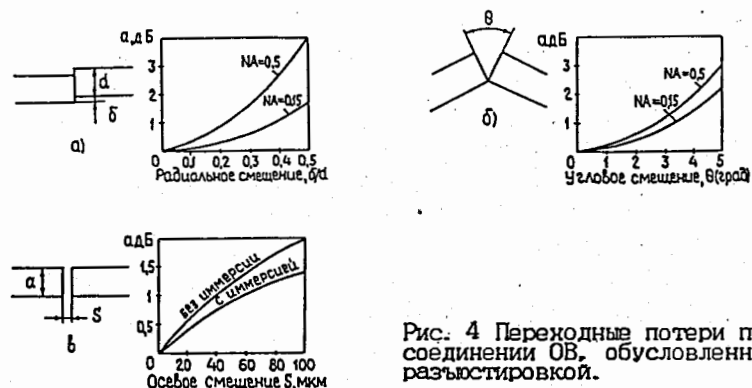


Рис. 4 Переходные потери при соединении ОВ, обусловленные разъюстировкой.

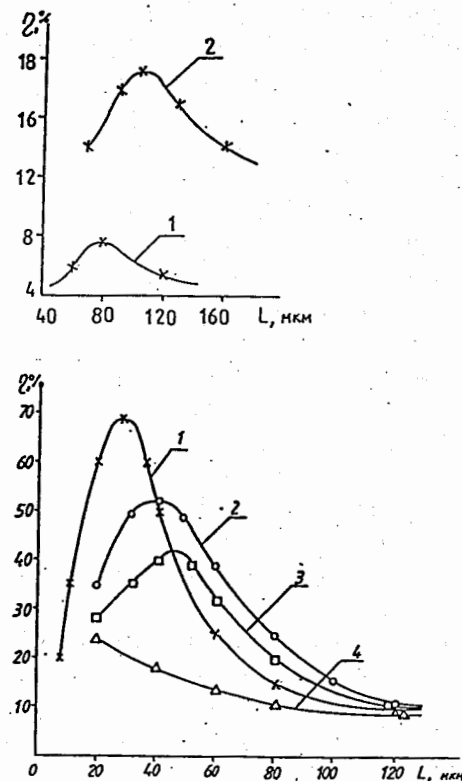


Рис. 5 Графики зависимости эффективности ввода излучения светодиода а) и лазерного диода б) от диаметра микролинзы и осевого смещения световода: а) – светодиод: 1 – 150 мкм; 2 – 40 мкм; 3 – 75 мкм; 4 – 100 мкм; б) – лазерный диод: 1 – 55 мкм; 2 – 75 мкм; 3 – 100 мкм; 4 – 150 мкм (плоский торец световода)

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ приведен расчет энергетического баланса ВОЛС. Даны характеристики приемо-передающих модулей и телеметрических систем контроля и управления ионными источниками.

Модуль приемо-передающий, используемый в составе аппаратуры ВОЛС, работающей на ЭФУ, обеспечивает передачу сигналов управления ионным источником или сигналов телеметрии с помощью волоконно-оптического кабеля (ВОК). Основные технические характеристики типовых модулей ВОЛС, приведены в таблице 1.

При проектировании оптоэлектронного модуля обычно приходится параллельно решать две задачи. Первая заключается в разработке схем комбинационной логики передатчика и приемника, необходимых либо для перекодировки информации, либо — для взаимодействия с сигналами от внешних устройств. Другая задача заключается в энергетическом расчете линейного тракта ВОЛС и связана с преобразованиями "ток — фотоны" в передатчике и "фотоны — ток" в приемнике. При этом необходимо выбрать параметры компонентов ВОЛС таким образом, чтобы потери в оптическом тракте не превышали энергетического ресурса линии и сохранялась требуемая достоверность передачи информации.

Необходимое быстродействие ВОЛС зависит от требуемого объема передаваемой информации (требуемая скорость передачи бит/с) и кода в линии. Качество приема цифровых сигналов характеризуется вероятностью ошибки. На основании заданной вероятности ошибки вычисляется отношение сигнал-шум. График этой зависимости представлен на рис. 6. Если отношение сигнал-шум превышает 10, то вероятность ошибки можно вычислить по приближенной формуле :

$$P_{ош} \approx 0,4 (c/\omega)^{-1/2} e^{-1/2(c/\omega)}$$

На рис. 7 приведена зависимость необходимой величины оптической мощности от заданной скорости передачи для фотоприемных устройств на фотодиодах и лавинных фотодиодах при вероятности ошибки  $10^{-9}$ .

Схема обработки в приемном устройстве цифровой ВОЛС представляет собой пороговое устройство с оптимально выбранным порогом, а шум в линейном тракте ВОЛС определяется качеством предусилителя.

Показано, что для создания многоканальных цифровых помехозащищенных световодных систем со строительной длиной  $100 \div 1000$  м и более, целесообразно использование кода "Манчестер". На рис. 8 приведена диаграмма для определения возможного расстояния и объема

Технические характеристики приемо-передающего модуля

Излучатель	АЛ17А	АЛ107В	ИМН-301
Длина волны излучения, мкм	0,95	0,95	0,85
Мощность изл. введ. в ВОК, Вт	$6 \cdot 10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
Фотодиод	ФД256	ФД272	ФД272
Чувствит. фотоприемника, Вт	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Скорость обмена, Мбит/с, не более	2	2	10 (20)
Строительная длина ВОК, м, не более	250	500	1000
Коэффициент затух. ВОК, дБ, не более	20	20	10
Напряж. источников пит. модулей, В	$\pm 5$	$\pm 6; +5$	$\pm 10; +5$
Соединение модулей с ВОК	разъемное		
Размещение в кассетах КАМАК	2 М		
Конструкция	встраиваемая		
Потребляемая мощность, Вт	0,6		
Диапазон рабочих температур, °С	-10... +50		
Габаритные размеры, мм	2 (80x55x22)		
Масса, кг	0,3		

Таблица 1. Характеристики приемо-передающих модулей ВОЛС.

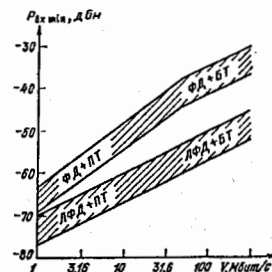


Рис. 7 Зависимость необходимой величины оптической мощности от скорости передачи информации. (Компоненты, используемые в предусилителе фотоприемников ВОЛС: ПТ и БТ — полевой и биполярный транзисторы соответственно; ФД и ЛФД — фотодиод и лавинный фотодиод соответственно.)

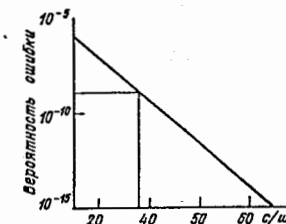


Рис. 6 Связь вероятности ошибки с отношением сигнал-шум

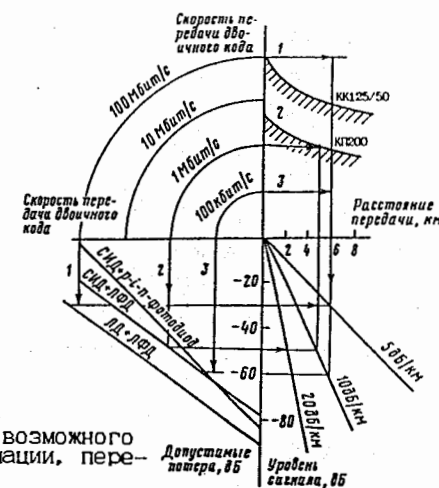


Рис. 8 Диаграмма для определения возможного расстояния и объема передаваемой информации по кабелям ВОЛС.

информации, передаваемой по кабелям ВОЛС.

Приводится описание 19-ти канальной системы ВОЛС со строительной длиной 630 м, основанной на временном уплотнении цифровых сигналов с применением Манчестерского кода. Система используется для передачи сигналов управления ионным источником. В предложенной системе ВОЛС с целью повышения помехозащищенности реализован метод повторной передачи информации, который компенсирует как возможные сбои в работе электронных блоков системы, так и помехи, наводимые в ВОК в импульсных радиационных полях.

Световодный последовательный асинхронный канал связи (СПАКС) предназначен для обмена 16-ти разрядными словами, преобразуемыми из параллельного кода в последовательный, и наоборот (в зависимости от направления обмена). СПАКС выполнен в виде "пассивного" и "активного", выполняющего команды с магистрали КАМАК, модулей. Система из двух модулей служит для организации связи "удаленный крейт - ЭВМ", а также "ЭВМ - ЭВМ". СПАКС разработан для передачи сигналов телеметрии ионного источника.

Автоматизированная система управления и контроля ионного источника "Крион - С" реализована на базе ПЭВМ, совместимой IBM PC/XT и двух - "активного" и "пассивного" крейтов КАМАК, расположенных соответственно на пульте ЛУ-20 и на высоковольтном терминале (~700 кВ) инжектора ускорителя (рис. 9а). Программное обеспечение компьютера, взаимодействующего с "активным" крейтом на ЛУ-20, написано на языке ПАСКАЛЬ.

Основная особенность функционирования системы контроля ионизатора состоит в том, что опрос датчиков, расположенных под высоковольтным потенциалом производится регистрирующей аппаратурой КАМАК, работающей по жестко заданному алгоритму и без участия ПЭВМ. Ввиду не критичности системы контроля к быстрдействию и в целях упрощения функционирования работа с аппаратурой КАМАК ведется в программном режиме. Задержанные импульсы передаются на "потенциал" с помощью 19-ти канальной ВОЛС, описанной выше. Одним из задержанных импульсов инициируется цикл опроса 15-ти гальванически развязанных датчиков системы контроля ионизатора. Цикл включает в себя оцифровку каждого из параметров и передачу их системой СПАКС на пульт управления ЛУ-20. ПЭВМ считывает 15 слов от датчиков контроля, затем 5 слов, содержащих информацию о временах задержки таймеров. Считанная информация приводится к физическим размерностям и отображается на экране цветного дисплея (рис. 9б).

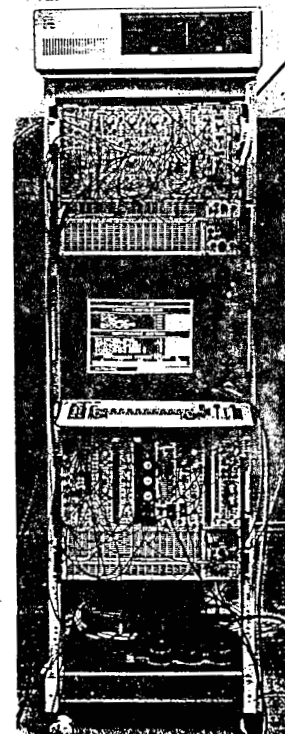
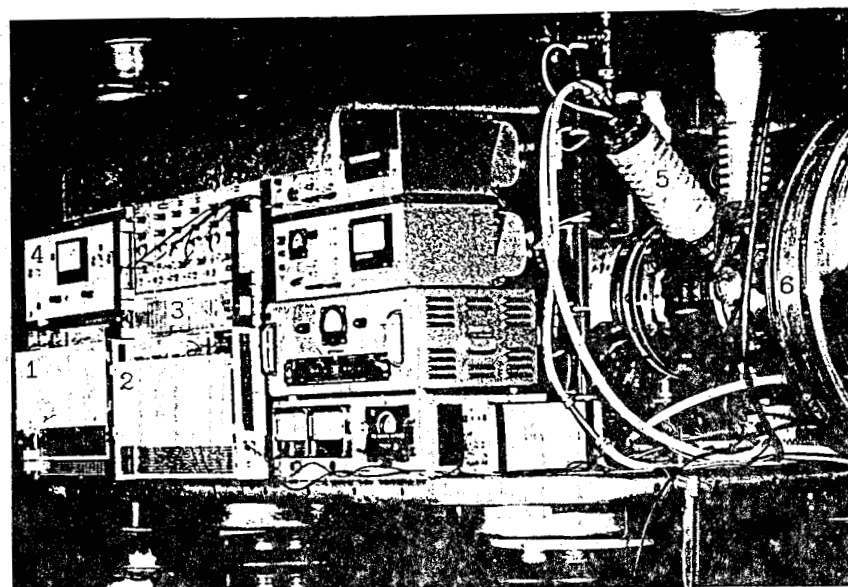


Рис. 9 а 1993 год.  
Размещение оборудования и крейтов КАМАК с системами управления и контроля ионного источника "Крион - С" на в/в терминале линейного ускорителя ЛУ-20:  
1 - крейт КАМАК с системами ВОЛС контроля и управления; 2 - крейт КАМАК с системами электронного облучения источника (лицевые стороны закрыты противостримерными крышками); 3 - крейт с в/в блоками питания; 4 - вакуумметр; 5 - криогенный ионизатор "Крион - С"; 6 - форинжектор ЛУ-20.  
СЛЕВА - автоматизированная система



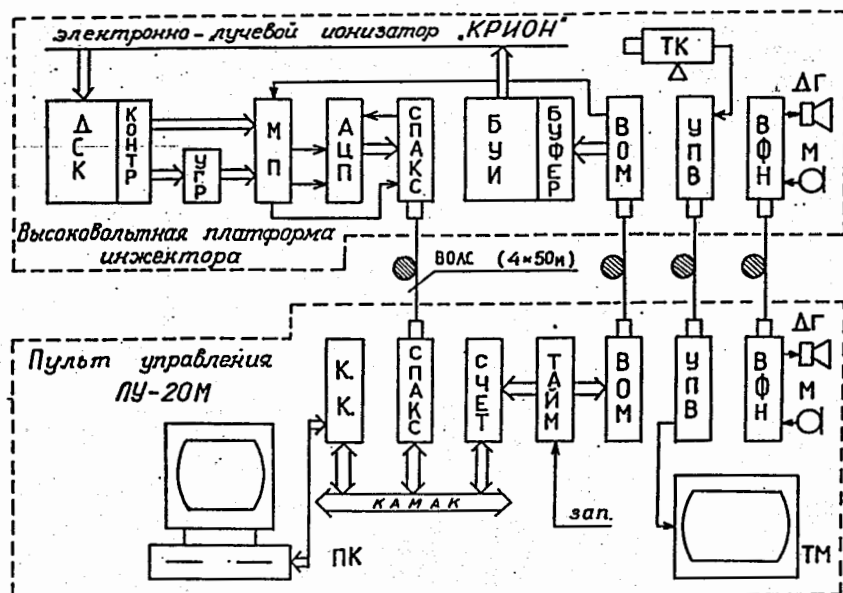


Рис. 9б Автоматизированная модульная система управления и контроля ионного источника Крион - С.

#### Высоковольтный терминал.

##### Система управления:

ВОМ - волоконно-оптический мультиплексор;

БУИ - блоки управления инжектором;

БУФЕР - устройство контроля прохождения сигналов;

##### Система контроля:

ДСК - датчики системы контроля;

КОНТР - устройство контроля сигналов датчиков;

УТР - устройства гальванической развязки;

МП - мультиплексор;

АЦП - аналого-цифровой преобразователь;

СПАКС - световодный последовательный асинхронный канал связи;

##### Сервисные системы:

ТК - телекамера "Матрица";

УПВ - устройство передачи видеосигналов;

ВФН - система связи "ВОЛСофон";

ДГ - динамическая головка; М - микрофон;

Пульт управления и контроля ионного источника;

ВОМ - волоконно-оптический мультиплексор;

УПВ - устройство приема видеосигналов на телемонитор (ТМ);

ТАЙМ - многоканальный таймер;

СЧЕТ - двоичные счетчики;

СПАКС - световодный последовательный асинхронный канал связи;

КК - контроллер крейта КАМАК;

ПК - персональный компьютер.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ описаны сервисные оптоэлектронные системы и устройства: - световодные системы телевизионной телеметрии, основанные на использовании модуляции по интенсивности; - дуплексные и симплексные световодные системы для передачи речевой информации; - световодный акустический датчик - оптофон; - дискретный волоконно-оптический датчик измеритель уровня криогенной жидкости. Отдельную область некогерентной оптоэлектроники представляют знаковосинтезирующие индикаторы и панели коллективного пользования, обеспечивающие новые функциональные и сервисные возможности на ускорителе заряженных частиц.

Световодные системы связи для передачи телевизионной информации на высоковольтных электрофизических установках (ЭФУ) используются для дистанционного наблюдения на экране телевизионного монитора черно-белого или цветного изображения при проведении научно-технических экспериментов и неконтактных измерений телевизионными методами.

Существенно ускорить и удешевить разработку световодного канала связи для передачи видеосигналов возможно, если пойти по пути создания аналоговой ВОЛС с использованием модуляции по интенсивности (МИ). Такие системы дешевле, чем цифровые, проще сопрягаются с обычными трактами передачи аналоговых электрических сигналов, так как не требуют включения в канал связи АЦП и ЦАП - преобразователей.

Приводится описание систем телевизионной телеметрии, изготовленных на базе использования промышленной телевизионной установки (ПТВ) и блоков ВОЛС, осуществляющих передачу видеосигналов в аналоговом виде с высоковольтного терминала на пульт управления ускорителем. Использование телевизионной телеметрии для регистрации импульсных процессов, происходящих в подсистемах ионного источника на высоковольтном терминале имеет ряд преимуществ:

1) реализуется передача сигналов в широком частотном диапазоне, т.к. используемый осциллограф имеет полосу пропускания 5 МГц;

2) повышается точность измерения, т.к. на телемониторе оператора измерение производится по видимой масштабной сетке осциллографа;

3) повышается помехоустойчивость канала связи, т.к. съем информации, благодаря использованию осциллографа с "памятью", происходит в паузе между мощными рабочими импульсами ионного источника;

4) обеспечивается необходимая аппаратная гибкость. Простая замена осциллографа С8-17 на интерфейс стрелочных приборов, подключенных к соответствующим датчикам, позволяет осуществить телевизионный контроль основных медленно изменяющихся параметров ионного источника.

В ряде случаев удобно совмещать с помощью электронного коммутатора на экране монитора изображения, полученные от двух разных телекамер, установленных на высоковольтном терминале ускорителя (рис. 10) и передавать видеосигнал на пульт ЛУ-20 (рис. 11).

На рис. 12 приводится структурная схема устройства формирования телевизионного изображения на экране осциллографа ОСА.

Таким образом, разработанные системы на основе ВОЛС, можно успешно применять для решения различных научных задач и, в первую очередь, для создания систем телевизионной телеметрии на высоковольтных ЭФУ, работающих в радиационных условиях. Разрешающая способность системы с использованием телекамеры "Матрица" соответствует 150 - 200 телевизионным линиям по горизонтали и вертикали при освещенности 4 лк.

Большое внимание в технике средств отображения информации уделяется созданию перспективных информационных систем, в том числе - на основе многострочных световых табло коллективного пользования, обеспечивающих отображение текстовой информации, где световой текст движется плавно и непрерывно, а наличие встроенной клавиатуры или отдельного пульта позволяют упростить управление.

Информационная система "Строка - 640" предназначена для выдачи оперативной информации на индикационную панель коллективного пользования (рис. 13). Она содержит блок управления, панель индикации (ИП) с устройством температурного режима (ДТ) и вентиляции (В), блок питания (БП). Блок управления (рис. 14) имеет два режима работы: а) загрузки; б) индикации информации. В режиме загрузки информации работают: пульт оператора (ПО), шифратор (ШФ), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), схема управления (СУ) и адресный регистр ОЗУ (АР ОЗУ). С ПО информация через ШФ поступает в порядке ее получения. В режиме индикации информации кроме ОЗУ, СУ и АР ОЗУ работают: постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), его адресный регистр (АР ПЗУ), регистры сдвига (РС), генератор тактовых импульсов (ГТИ) и панель индикации (ИП). ПЗУ работает как генератор знаков: входная информация поступает из ОЗУ и АР ПЗУ, выходящая - переписывается в РС и сдвигается (рис. 15).

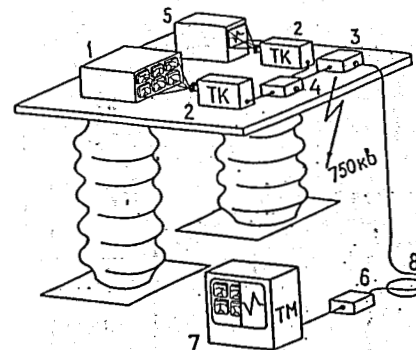


Рис. 10 Структурная схема размещения оборудования на высоковольтном терминале (по второму варианту) с использованием двух телекамер.

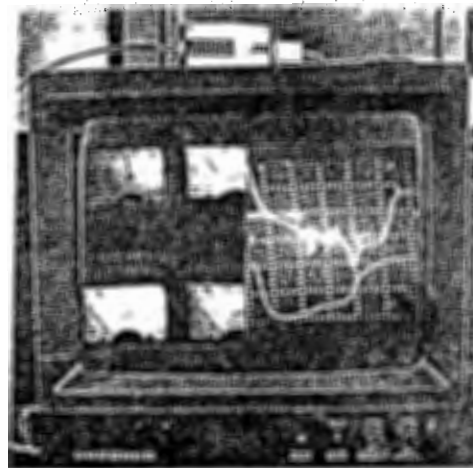


Рис. 11 Регистрация показаний стрелочных приборов и параметров импульсных сигналов одновременно - результат работы коммутатора видеосигналов.

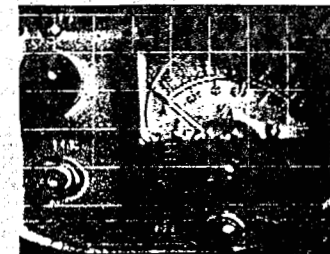
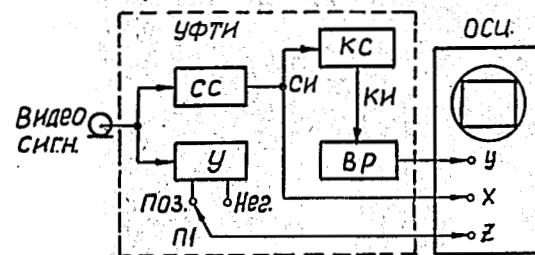


Рис. 12 Структурная схема устройства формирования телевизионного изображения (УФТИ) на экране осциллографа: СС - селектор синхромесели; У - усилитель; КС - кадровый селектор; ВР - генератор вертикальной развертки; ОСИ - осциллограф; справа - телевизионное изображение на экране осциллографа (примерно, 100 - 150 строк).

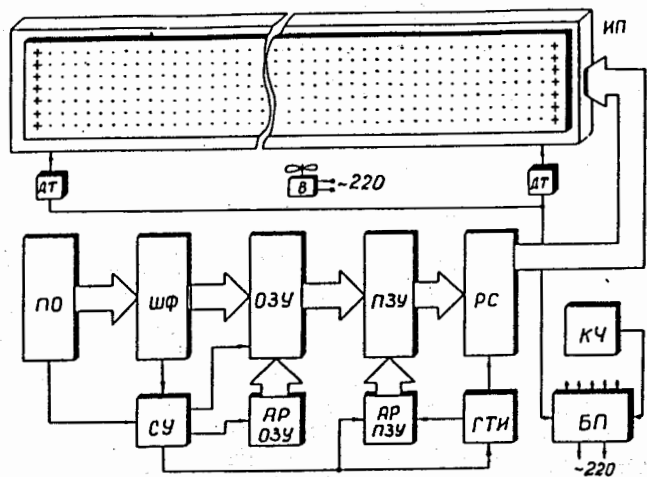


Рис. 13 Структурная схема информационной системы "Строка-640".

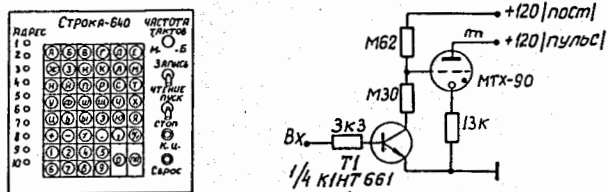


Рис. 14 Пульт управления (слева); схема включения элемента индикации на тиратроне МТХ-90 (справа).

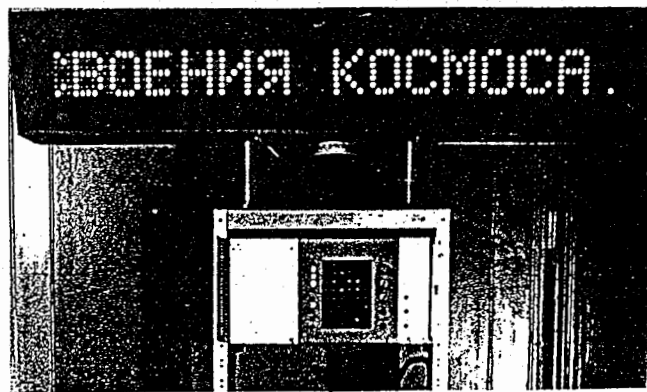


Рис. 15 Внешний вид информационной системы "Строка-640".

В ШЕСТОЙ ГЛАВЕ описаны беспроводные каналы связи на электрофизических установках: СВЧ – телеметрическая система ТС-6 для измерения 6-ти параметров форинжектора протонов линейного ускорителя ЛУ-9, а также одна из тенденций развития оптической связи на высоковольтных ускорительных установках – атмосферная связь.

В ТС-6 используется радиоканал связи в диапазоне 3 см, применение которого обусловлено рядом преимуществ: 1) диапазон расположен в области частот, находящихся выше спектра частот основных промышленных помех (кроме искровых); 2) направленное излучение дает возможность при незначительной мощности передатчика (порядка нескольких мВт) достигнуть хорошую помехоустойчивость канала связи; 3) использование в качестве передатчика отражательного клистрона диапазона 3 см дает возможность применять как амплитудные, так и частотные методы модуляции, что значительно расширяет возможности системы; 4) аппаратура диапазона 3 см компактна, проста, надежна и хорошо освоена в промышленном производстве, что дает возможность использовать стандартные узлы; 5) применение диапазона 3 см позволяет разработать широкополосную систему с передачей большого объема информации.

В системе применяется кодирование информации измерительных каналов по способу АИМ – ВИМ с последующим преобразованием в числовой десятичный код и временным разделением каналов. Для передачи информации по видеоканалу используется частотная модуляция несущей частоты радиоканала.

Опытный вариант ТС-6 был установлен для испытания в рабочих условиях на высоковольтной колонне форинжектора протонов. Передающая часть (рис.16) располагалась под кондуктором колонны, приемная (рис.17) – у ее основания. Блоки дешифрации и цифровой индикации были размещены на пульте управления ЛУ-9. Связь между приемником и блоком дешифрации осуществлялась по коаксиальному кабелю длиной 70 м. Измерялись следующие параметры форинжектора: 1) напряжение генератора автономного питания высоковольтной колонны – 220 В; 2) ток (~8 А) накала катода источника протонов; 3) напряжение фокусирующего электрода (8 ÷ 10) кВ; 4) ток 0,1 ÷ 0,2 А электромагнита источника. Для контроля погрешности, вносимой ТС-6, по пятому каналу передавалось эталонное напряжение 10 В постоянного тока. По видеоканалу производились измерение огибающей импульса тока дуги источника протонов.

Радиотехническим средствам передачи информации на высоко-

вольтных электрофизических установках (ЭФУ) присущ целый ряд недостатков. Главные из них следующие:

- низкий уровень помехозащищенности от стримеров, пробоев в ускоряющей системе и разрядной камере ионного источника;
- значительная масса оборудования и габариты антенн радиопередатчика и приемника;
- высокая стоимость радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-канала связи.

В отличие от ВОЛС атмосферные оптоэлектронные каналы передачи информации (АОЭКПИ) не требуют прокладки кабеля. По сравнению с сантиметровой радиосвязью устройства оптической связи могут иметь намного меньшие размеры излучающей и приемной апертур ("антенн"). Отсюда – существенный выигрыш в габаритных и весовых показателях. Световой луч значительно уже радиолуча, фон рассеянного излучения намного слабее фона радиоволн, отразившихся от предметов, что предопределяет большую скрытность передачи информации в оптическом диапазоне волн. В качестве генераторов оптического излучения могут быть использованы мощные некогерентные излучающие диоды.

На рис. 18 приведены варианты организации передачи информации и управляющих сигналов в системе управления и контроля ионным источником, установленном на высоковольтном терминале линейного ускорителя. При использовании АОЭКПИ оптические модули с излучателем и устройством его модуляции, а также фотоприемное устройство с демодулятором могут располагаться вне крейтов КАМАК, но в пределах прямой видимости (например, на одной из бетонных стен в помещении линейного ускорителя ЛУ-20). Конструктивно АОЭКПИ может быть выполнен в виде выносных приемо-передающих модулей, закрепленных на крейте с помощью кронштейнов, обеспечивающих необходимую направленность и фиксацию положения. Размещая передатчик, нужно помнить об очень узкой диаграмме направленности его излучения: – узел крепления должен позволять точную наводку передатчика и жесткую его фиксацию. Можно воспользоваться, например, шарнирной головкой от фотоаппарата или кинокамеры, закрепив ее на ручке крейта или другом удобном месте.

При использовании комбинированного оптического канала (КОК) – оптические головки 6, представляющие собой оптические системы с устройствами юстировки, в фокусе которых находятся торцы волоконно-оптических кабелей 4, расположенные вне крейтов КАМАК 2 и 3.

Излучатели, устройства их модуляции, фотоприемники и демодуля-

торы смонтированы в кассетах крейтов. Данная функциональная схема размещения оборудования имеет ряд достоинств:

- обеспечивается высокая гальваническая развязка (так как существует воздушный промежуток с высоким пробивным напряжением);
- имеется возможность располагать оптические головки в удобном для юстировки месте на высоковольтном терминале линейного ускорителя (так как оптические головки 6 не "привязаны" к аппаратуре 2 и 3 электрическими кабелями, длина которых ограничена электрическими требованиями и степенью помехозащищенности используемой элементной базы);
- используется приемопередающая аппаратура ВОЛС в конструктиве стандарта КАМАК, имеющая типовые оптические соединители.

Структурная схема оптической головки показана на рис. 19. Оптическая головка предназначена для установки выходного торца волоконно-оптического кабеля в фокусе объектива. Механическая часть КОК состоит из юстировочного устройства, которое служит для обеспечения взаимной ориентации в пространстве (нацеливания) передающей и приемной головок с помощью микрометричного поворотного устройства, платформы для установки и крепления.

В зависимости от условий эксплуатации ионного источника, расположения крейтов с аппаратурой на высоковольтной платформе может изменяться и длина оптических кабелей как у первого, так и у второго комплекта КОК. При этом становится важным определение величины необходимого энергетического потенциала системы связи, который задается соответствующим выбором оптических элементов КОК.

Конфигурация сети АОЭКПИ внутри производственных помещений ускорительного комплекса состоит из рефлекторов и приемопередатчиков. Рефлектор устанавливается на потолке комнаты. Он может использоваться несколькими приемо-передатчиками, расположенными у своих терминалов. На рис. 20 показана возможная конфигурация сети. Рефлектор и приемопередатчик имеют ИК-излучатели и оптические приемники для обеспечения двухсторонней связи. Разнонаправленные линии связи (снизу вверх и сверху вниз) работают на разных несущих частотах для отсеивания собственного отраженного сигнала. Локальная сеть образуется путем соединения нескольких рефлекторов коаксиальным кабелем. АОЭКПИ использует схему с прямой видимостью рефлектора.

В рефлекторах и настольных приемопередатчиках используются однотипные блоки ИК-светодиодов. Светодиоды, установленные в рефлек-

торе, дают широкий пучок излучения, направленный вниз ( $\approx 120^\circ$ ). В настольном приемопередатчике светодиоды снабжены линзами, фокусирующими ИК-излучение на рефлекторе (телесный угол расхождения пучка  $\approx 10^\circ$ ). Фотоприемником излучения в рефлекторе служит фотодиод с большой светочувствительной поверхностью для приема сигналов с разных направлений. Настольные приемники ИК-излучения снабжены линзами Френеля. Последние фокусируют ИК-излучение, идущее от рефлектора, обеспечивают направленность приема, повышая эффективность работы фотодиода в приемнике информации. Такая конструкция настольного комплекта АОЭКПИ обеспечивает защиту данных от искажений, позволяет переключаться на другую информационную систему наведением на соответствующий рефлектор, из установленных в комнате. Рефлектор излучает принятое сообщение, а также передает его по коаксиальному кабелю на другие рефлекторы, которые, в свою очередь, излучают сигнал на все приемопередатчики, расположенные под ними. Скорость передачи данных может достигать  $\sim 1$  Мбит/с. Поскольку увеличение расстояния ухудшает отношение сигнал/шум, экспериментально установлено максимальное расстояние между приемопередатчиком и рефлектором, при котором вероятность ошибки не превышает  $10^{-9}$ . Оно составляет 25 м.

Конечно, описанный вариант построения АОЭКПИ не лишен недостатков. Оптическая линия связи может быть разорвана объектом, нарушившим прямую видимость между приемниками и передатчиками. Это так называемые ошибки блокирования. Процедура исправления таких ошибок может быть решена как программными, так и аппаратными средствами. Например, пакет данных передается несколько раз (с повторением каждые 10 мс).

Оптоэлектронные каналы передачи информации (ОЭКПИ) получили наибольшее развитие в распределенных информационно-вычислительных сетях и на высоковольтных ускорителях (особенно волоконно-оптические каналы передачи). Применение в оптоэлектронных каналах световодов различной физической природы (волоконных, воздушных и др.) определяет все многообразие типов ОЭКПИ для информационных систем на высоковольтных электрофизических установках, причем каждый из них имеет свои особенности применения, преимущества и недостатки. Различаясь между собой, они в тоже время имеют много общего, что позволяет найти оптимальные общие решения с точки зрения их аппаратной, схемотехнической и системотехнической реализации.

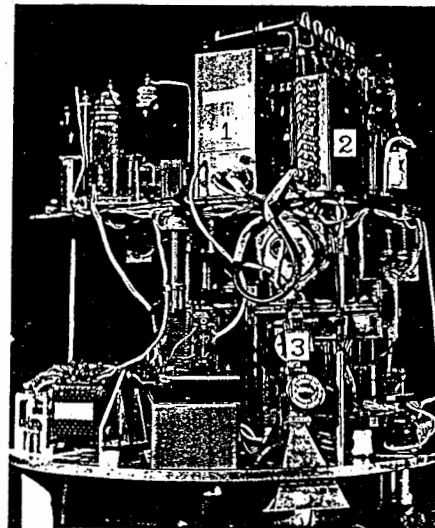
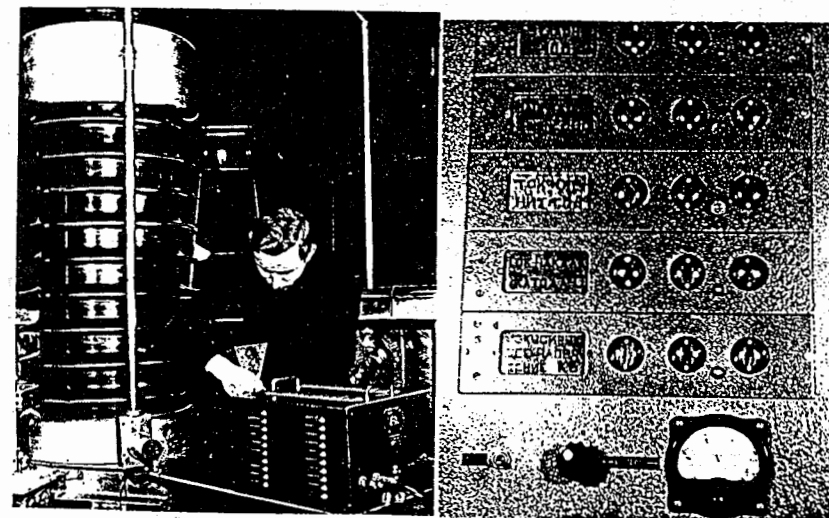


Рис. 16 1967 год.  
На в/в терминале ЛУ-9 установлены блоки телеметрической системы ТС-6: 1 – блок питания; 2 – шифратор; 3 – СВЧ-передатчик информации.

Рис. 17 Установка СВЧ – приемника телеметрической информации у основания в/в колонны. Справа – блоки цифровой индикации на пульте управления линейным ускорителем.





## ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

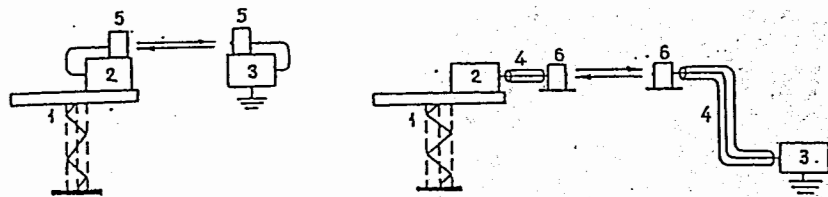


Рис.18 Структурная схема организации передачи информации на высоковольтном ускорителе: 1 - высоковольтная платформа; 2, 3 - клеммы КАМАК; 4 - волоконно-оптический кабель; 5 - приемопередатчик АОЭПИ; 6 - экспериментальная головка КОК.

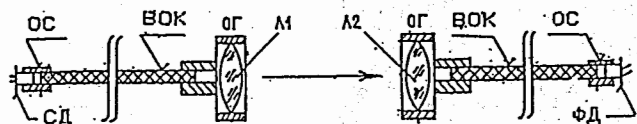


Рис.19 Структурная схема оптической головки: Л1, Л2 - линзы; ВОК - волоконно-оптический кабель; ОС - оптический соединитель; СД - светодиод; ФД - фотодиод; ОГ - оптическая головка.

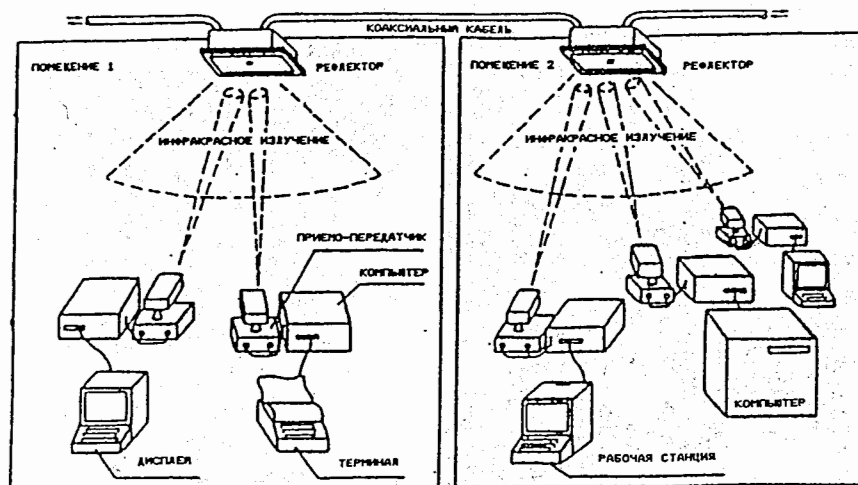


Рис. 20 Конфигурация сети АОЭПИ для рабочих помещений.

В заключении отмечается, что главным итогом диссертации является новое решение крупной научной проблемы – проблемы электромагнитной совместимости. Исключить воздействие на каналы связи мощных и интенсивных радиочастотных помех, сопровождающих работу форинжектора линейного ускорителя и систем питания ионного источника оказалось возможным только при существенном разнесении спектров сигналов носителя информации и возмущающего воздействия.

В настоящее время перспективным и, пожалуй, единственным направлением в создании скоростных и высоконадежных каналов управления и контроля ионных источников, установленных на высоковольтном терминале линейного ускорителя, является использование "электрогерметичных" волоконно-оптических линий – и каналов атмосферной связи. Это кардинальный путь решения проблемы электромагнитной совместимости. Таким образом, оптическая связь на высоковольтных ускорителях обуславливает качественный скачок в технике передачи информации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ аналитических, научно-технических и научно-методических исследований автора формулируются в виде выводов, приводимых ниже:

1. Впервые для контроля и управления инжектором линейного ускорителя ЛУ-9М разработаны и внедрены:
  - а) телеметрическая система ТС-6, с использованием 3-х сантиметрового радиоканала для контроля параметров ионного источника типа дуоплазматрон, расположенного на в/в терминале;
  - б) "закрытый оптический канал" для передачи импульсов синхронизации.
2. Впервые в ОИЯИ предложены, созданы и внедрены оптоэлектронные комплексы средств связи на базе ВОЛС для криогенных источников "КРИОН-1" (1981 г.) и "ПОЛЯРИС" (1982 г.), обеспечившие получение ускоренных пучков на выходе ЛУ-20:
  - а) "КРИОН-1" – ядер углерода ( $C^{12}$ ) и неона ( $Ne^{22}$ );
  - б) "ПОЛЯРИС" – поляризованных дейтронов.

3. Впервые на высоковольтном ускорителе для автоматизации сложных систем управления и контроля ионного источника, работающих на основе световодных каналов информационного обмена, использована ПЭВМ, совместимая с IBM PC/XT.

4. Разработана и внедрена 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.

5. С помощью многоканальных ВОЛС и автоматизированной системы управления и контроля, которая является составной частью ионного источника "Крион - С", как прототипа ионного источника для ускорительного комплекса "НУКЛОТРОН":

- а) расширен спектр ускоренных пучков ионов (от  $Ar^{14+}$  до  $Kr^{34+}$ ).
- б) ионизатор "Крион - С" обеспечил экспериментальную инжекцию многозарядных ионов в "НУКЛОТРОН", работу ускорительного комплекса синхрофазотрона при ускорении ядер  $S^{16+}$  и эксперименты на линейном ускорителе ЛУ-20 по производству политрековых мембран при ускорении ионов  $Ar^{14+}$ .

6. Разработанный и внедренный состав аппаратуры управления и контроля ионизатора "Крион - С", расположенной на высоковольтной платформе (рис. 91), в совокупности с системами питания позволил:

- а) уменьшить время, необходимое для выхода ионизатора на рабочий режим, до 24 часов;
- б) впервые довести время устойчивой и безотказной работы источника до 72 часов, а затем и превзойти его;
- в) успешно провести пять сеансов ускорения тяжелых ионов.

Таким образом, предложенные автором принципы и методики построения измерительно-управляющих оптоэлектронных систем, рассчитанные на длительную безаварийную работу ионных источников, расположенных на высоковольтном терминале, способствовали проведению большинства первоочередных экспериментов и во многом определили успешное выполнение научной программы исследований ЛВЭ ОИЯИ.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Бычков Ю. А., Романов Ю. И., Сайфулин Ш. З. Телеметрическая система для измерения параметров форинжектора протонов. ПТЭ, №5, 1968; Сообщение ОИЯИ, 93484, Дубна, 1967.
2. Романов Ю. И. Знаковый индикатор для устройств информации коллективного пользования. ПТЭ, №5, 1975; /ОИЯИ, 13-8524, Дубна, 1975/.
3. Романов Ю. И. Телеметрическая система "Квант-6" с использованием волоконно-оптической линии связи. Сообщение ОИЯИ, 10-81-295, Дубна, 1981.
4. Романов Ю. И. Многоканальные волоконно-оптические линии связи в системе управления источником "ПОЛЯРИС". Сообщение ОИЯИ, Дубна, 13-82-279, 1982.
5. Романов Ю. И. Адаптивное цифровое табло коллективного пользования. Сообщение ОИЯИ, 13-82-469, Дубна, 1982.
6. Романов Ю. И. Информационная система "Строка-640". Сообщение ОИЯИ, 13-83-346, Дубна, 1983.
7. Романов Ю. И. Применение телевизионной установки в системе управления высоковольтным ускорителем. Сообщение ОИЯИ, 13-85-580, Дубна, 1985.
8. Романов Ю. И., Турзо И. Система дистанционного измерения параметров ионного источника. Сообщение ОИЯИ, 13-86-513, Дубна, 1986.
9. 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; Сообщение ОИЯИ, 13-86-533, Дубна, 1986.
10. Романов Ю. И. и др. АС СССР N 1260888 от 1 июня 1986.
11. Романов Ю. И. "19-ти канальный волоконно-оптический мультиплексор". В кн.: "Труды 11 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц", т. 1, Дубна, с. 139-141; ОИЯИ, 13-88-636, Дубна, 1988.

12. Романов Ю. И. Цифровой волстрон для системы управления ионным источником. Сообщение ОИЯИ, 13-88-827, Дубна, 1988.
13. Романов Ю. И. Стабилизация параметров приемных оптоэлектронных модулей. Сообщение ОИЯИ, 13-88-723, Дубна, 1988.
14. Романов Ю. И. Световодный последовательный асинхронный канал связи (СПАКС). Сообщение ОИЯИ, P13-90-536, Дубна, 1990.
15. Гусаков Ю. В., Романов Ю. И. Волоконно-оптические нестандартные соединители для световодных линий связи высоковольтных электрофизических установок. Сообщение ОИЯИ, P13-91-148, Дубна, 1991.
16. Романов Ю. И. Незаземленный источник питания на суперконденсаторах. Сообщение ОИЯИ, P13-91-317, Дубна, 1991.
17. Овсянников В. П. ... Романов Ю. И. ... Царенков А. П. Автоматизированная модульная система управления и контроля ионного источника "КРИОН-С". Сообщение ОИЯИ, 13-93-219, Дубна, 1993.
18. Ангелов А. Х., Романов Ю. И. Дискретный волоконно-оптический измеритель уровня криогенной жидкости. Сообщение ОИЯИ, P8-94-15, Дубна, 1994.
19. Овсянников В. П. ... Романов Ю. И., и др. "Электронный пучок ионного источника "КРИОН-С", эксплуатируемого в ЛВЗ" в кн: Труды 6-ой Международной конференции по ионным источникам. Вистлер, Канада, 1995: /Rev. Sci. Instrum./, - т. 67, N3, 1996, стр. 1161.
20. Романов Ю. И. "Открытый оптический канал" - цифровая система связи внутри помещений ускорительного комплекса с использованием инфракрасного излучения. Сообщение ОИЯИ, P13-97-286, Дубна, 1997.
21. Романов Ю. И. Аппаратура для дистанционного считывания показаний стрелочных приборов на высоковольтном терминале. Сообщение ОИЯИ, P13-97-294, Дубна, 1997.
22. Романов Ю. И. Быстродействующий фотоприемник для атмосферного канала связи. Сообщение ОИЯИ, P13- 99-170, Дубна, 1999.

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 декабря 1999 года.