

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

13-86-566

**Ю.И.Романов**

**ОТКАЗОУСТОЙЧИВАЯ  
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ СВЯЗИ  
(ВОЛС)**

**1986**

Развитие техники волоконно-оптической связи создает основу для разработки и применения оптических средств передачи информации, коммуникационной средой в которых служит волоконно-оптическая кабель /ВОК/<sup>1/1/</sup>. Устройства дистанционного управления и контроля, изготовленные с использованием ВОК, обеспечивают необходимую электромагнитную совместимость радиоэлектронных средств при высоких уровнях помех, создаваемых действующим оборудованием. В системах управления высоковольтными электрофизическими установками /ЗФУ/ используется в основном параллельная организация подачи информации. Такая многоканальная организация конструктивно и логически более просто обеспечивает связь между пультом управления ЗФУ и блоками аппаратуры, расположенными на высоковольтном терминале ускорителя<sup>2/</sup>, удобна в эксплуатации.

Необходимыми элементами любой волоконно-оптической линии связи /ВОЛС/ являются источники излучения и оптоприемники. Выбор этих элементов при разработке каналов ВОЛС имеет существенное значение.

В качестве источников излучения рационально использовать инжекционные диоды /светодиоды/, с длиной волны излучения в области максимума пропускания оптических волокон и максимума чувствительности кремниевых фотоприемников, т.е. в области 800-950 нм. Светодиоды доступны, обладают высокой эффективностью излучения, достигающей 30%<sup>3/</sup>, и значительной долговечностью, превышающей 10<sup>4</sup> ч.

В качестве приемников излучения для ВОЛС среднего быстродействия используются дешевые кремниевые (р-п)-фотодиоды. Все ступени оптоприемников могут иметь связь по постоянному току, что позволяет использовать их для приема сигналов со спектром от нулевой частоты до нескольких сотен килогерц. Гальванические связи существенно упрощают схемотехнику построения информационного канала, позволяют системе ВОЛС работать с разнообразными форматами данных, не прибегая к использованию специальных самосинхронизирующихся кодов, например кода "Манчестер"<sup>4/</sup>. Таким образом, работа по созданию простых и широкополосных каналов ВОЛС не потеряла своей актуальности. Однако использование большого числа параллельных ВОЛС, работающих в тяжелых условиях на действующих ЗФУ, вызывает необходимость ужесточения требования надежности таких каналов связи. Особое внимание при этом должно уделяться проработке конструкции приемника оптического сигнала.

Для получения высокого быстродействия оптоприемника используется известная схема, в которой (р-п)-фотодиод включен со смещением. При таком включении снижается емкость и увеличивается интегральная чувствительность фотодиода, но возникает темновой

ток, величина которого сильно меняется от температуры. Рост темного тока фотодиода приводит к появлению дрейфа и различного рода шумов, вызывающих неустойчивую работу оптоприемника, а в некоторых случаях - к возбуждению и закрытию канала связи.

Для компенсации температурного приращения тока фотодиода рекомендуется использовать последовательное включение неосвещаемого компенсирующего фотодиода с основным фотодиодом оптоприемника<sup>5,6</sup>. Недостатки такого включения фотодиодов очевидны. Они заложены в необходимости подбора основного и компенсирующего фотодиодов по темновому току в диапазоне рабочих температур. При этом должно выполняться условие, чтобы темновой ток основного фотодиода не превышал темновой ток компенсирующего фотодиода. Кроме того, приходится совмещать такие противоречивые требования, как необходимость увеличивать: а/ темновой ток компенсирующего фотодиода для уменьшения сигнала помехи при неосвещенном основном фотодиоде; б/ усиление, поскольку такое увеличение темнового тока при освещенном основном фотодиоде приводит к уменьшению полезного сигнала.

Другое возможное решение задачи - использование второго освещаемого фотодиода и второго ВОК. Это позволит скомпенсировать температурные приращения токов фотодиодов, исключит необходимость их подбора по идентичности характеристик в диапазоне рабочих температур. Длительность сигнальных импульсов, передаваемых по ВОЛС, зависит от формы представления двоичных разрядов передаваемой информации. Применяя парафазное управление по двум линиям ВОК, можно осуществить раздельную передачу импульсов, представляющих логическую единицу и логический ноль, что позволит получить существенное увеличение отношения сигнал/шум в канале ВОЛС.

Передатчик оптический состоит из формирователя импульсов на микросхеме М1 и излучателей Д1, Д2. Значительные и очень резкие перепады тока, возбуждающие излучатель, могут создавать в цепях электрического питания всплески напряжения /помехи/ недопустимо

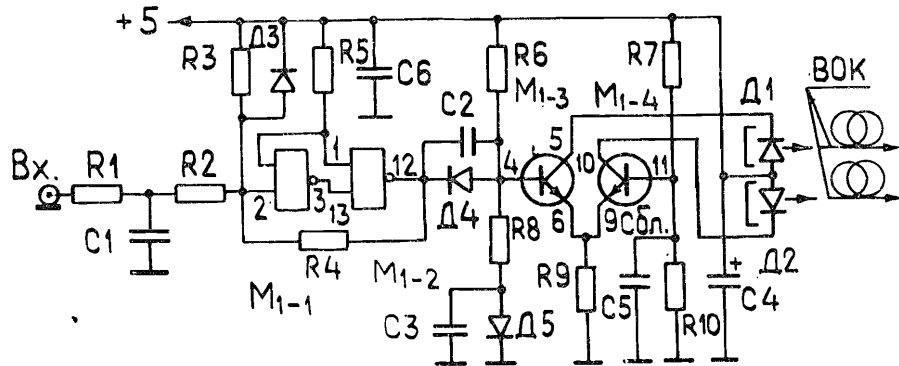


Рис. 1. Электрическая схема оптического передатчика.

большой амплитуды. В подобных случаях необходимо фиксировать суммарный ток, потребляемый модулятором. Отличительной особенностью используемого оптического передатчика является лучшая способность подавления электромагнитных помех, излучаемых шиной питания. Передатчик, собранный на микросхеме К155ЛП7 /рис.1/ включает в себя: R1C1 - фильтр для входного сигнала, триггер Шмидта на вентилях M1-1, M1-2 и дифференциальный усилитель на M1-3, M1-4, в коллекторные цепи которого включены AL107B /Д1, Д2/. Ток накачки включенного светодиода фиксирован и равен ~ 100 мА. В исходном состоянии транзистор M1-3 - открыт и светодиод Д1 дает максимальное свечение. При включении ТТЛ-элемента потенциал базы транзистора M1-3 снижается, ток переключается в эмиттерную цепь M1-4, а M1-3 и светодиод Д1 выключаются. Открывается M1-4 и Д2 дает максимальное свечение. В любом из этих состояний возбуждающий транзистор не насыщается и ток, отбираемый от источника питания, представляет собой ток, протекающий через резистор R9, изменением величины которого можно "программировать" выходную мощность излучателей. Диод Д5 служит для температурной стабилизации тока возбуждения излучателя Д1.

Использование описанной схемы модулятора сводит к минимуму временные искажения импульсов, генерируемых передатчиком, что имеет важное значение при больших скоростях передачи данных. Шина питания источника не модулируется перепадами тока, достаточно длинные проводники печатных плат, действующие как антенны, излучают более слабые поля в соответствии с меньшими амплитудами изменения тока. Таким образом, уровень электромагнитных помех, излучаемых схемой, минимизируется. Кроме того, такая сбалансированная конфигурация оптического передатчика практически не зависит от компоновки печатной платы, что позволяет передатчики и приемники ВОЛС размещать на одной плате, не прибегая к использованию сложных развязок и экранирования.

Приемник оптический. На рис.2 приведены возможные варианты включения фотодиодов в схему оптоприемника: А - в фотогальвани-

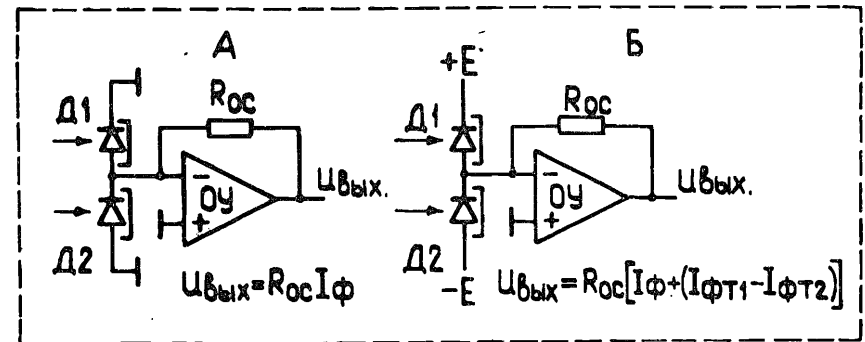


Рис. 2. Схема преобразователя "ток-напряжение".

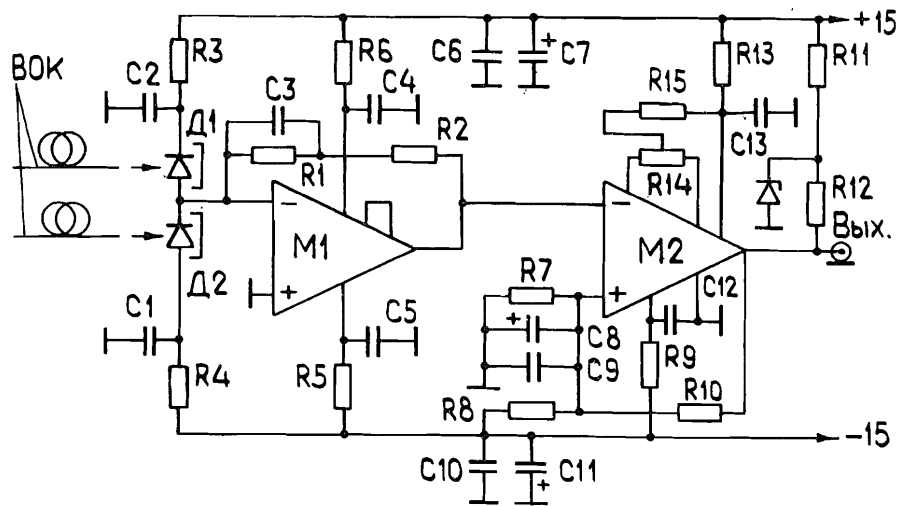


Рис. 3. Электрическая схема оптического приемника.

ческом режиме /без напряжения смещения/; Б - в режиме со смещением.

Положительное качество первого способа /рис.2А/ включения фотодиодов - отсутствие темнового тока, что особенно важно в случае гальванической связи с последующими каскадами, недостаток - низкое, измеряемое десятками килогерц быстродействие оптоприемника, из-за больших паразитных емкостей фотодиодов /емкость одного (р-п)-перехода в этом режиме достигает 1000 пФ/77/. Альтернативой этому варианту включения является рис.2Б. На схеме оба фотодиода включены встречно по отношению ко входу операционного усилителя /ОУ/ и смещены в обратном направлении путем подключения к соответствующим питающим напряжениям. Детектирование слабых быстропеременных световых сигналов, попадающих на фотодиоды, происходит с максимальным отношением сигнал/шум, определяемым частотными свойствами фотодиодов и их шумами, свойственными такому способу включения.

Электрическая схема приемника оптического сигнала /рис.3/ состоит из дифференциального фотоприемника /М1/ и компаратора /М2/. В схеме использованы кремниевые фотодиоды ФД-27К/8/, имеющие чувствительность к излучению 0,5 А/Вт в области 900 нм. Фотодиоды работают в режиме генераторов тока. Функцию преобразования "ток-напряжение" выполняет трансимпедансный усилитель. Для повышения разрешающей способности преобразователя необходимо, чтобы сигнальный ток превышал значение входного тока ОУ. Этому и другим требованиям в основном отвечает ОУ типа К544УД2 с полевыми транзисторами на входе /М1/. Данный ОУ имеет низкий входной ток /~ 0,1 нА/, малое приведенное напряжение шумов и скорость нарастания выходного напряжения 20 В/мкс. Измеренная температурная

зависимость для одного фотодиода с ОУ составила  $(2 \div 5) \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$  при  $20^\circ\text{C}$ . Для дифференциального фотоприемника эта зависимость оказалась существенно меньше  $5 \cdot 10^{-4}$  в диапазоне температур  $(5 \div 45)^\circ\text{C}$ . Дрейф выходного напряжения в интервале рабочих температур М1 не превышает  $\pm 2$  мВ. На выходе ОУ амплитуда сигнала ~ 50 мВ, что вполне достаточно для надежной работы компаратора /М2/. Пороговый уровень напряжения, получаемый с помощью делителя R7, R8, подается на неинвертирующий вход компаратора. Этот уровень подбирается с учетом амплитуды входного сигнала и уровня шумов. При работе со входными сигналами 50 мВ необходима предварительная корректировка компаратора для устранения разности напряжений между его входами подстроечным резистором R14. Уровень порога срабатывания компаратора устанавливается ~ на 25 мВ ниже потенциала на инвертирующем входе. Таким образом, сигнал амплитуды > 25 мВ переключает компаратор из состояния логического нуля в состояние логической единицы. Снижение уровня сигнала на входе ниже порогового уровня возвращает компаратор в исходное состояние логического нуля. Выход микросхемы М2 К544СА3 представляет собой открытый коллектор транзистора, что позволяет при соответствующем напряжении на нагрузке коллектора обеспечить сопряжение с ТТЛ-логикой. Для устранения многократного срабатывания компаратора от возможных паразитных импульсов с помощью резистора R10 вводится положительная обратная связь, которая переводит М2 в режим триггера Шмидта с гистерезисом 1 мВ.

Подключение ВОЛС к передатчикам и приемникам оптических сигналов производится с помощью разъемных многоканальных оптических соединителей /МОС/, установленных на лицевых панелях блоков.

Большинство зарубежных конструкций аналогичного назначения разрабатывались применительно к волокнам со строгой геометрией/9,10/. При изготовлении описываемых каналов ВОЛС использовались волокна с разбросом диаметров ~ 10 мкм и некоаксиальностью сердечников и оболочек 7÷8 мкм.

При разработке МОС учитывались требования к соединителям, изложенные в/11/. Кроме того, в конструкции МОС предусмотрена возможность быстрой замены оптического кабеля /ОК/ в случае его неисправности или изменения требований к строительной длине. Механическая конструкция разъемного МОС /рис.4/ состоит из розеточной части с установленными в ней свето- или фотодиодами и вилочной - с ОК для подключения к передающему и приемному модулю. Для обеспечения безлюфтового соединения розеточная часть МОС имеет штифты, служащие в качестве направляющих, и устройство жесткой фиксации вилочной и розеточной частей МОС. Разделка ОК производилась по стандартной методике. Поверхность торца каждого из 6 световодов КК150/60/11/, вкленных в стеклянные капилляры с внутренним диаметром 160 мкм, предварительно формировалась путем скола скрайбером с последующей фиксацией в металлических

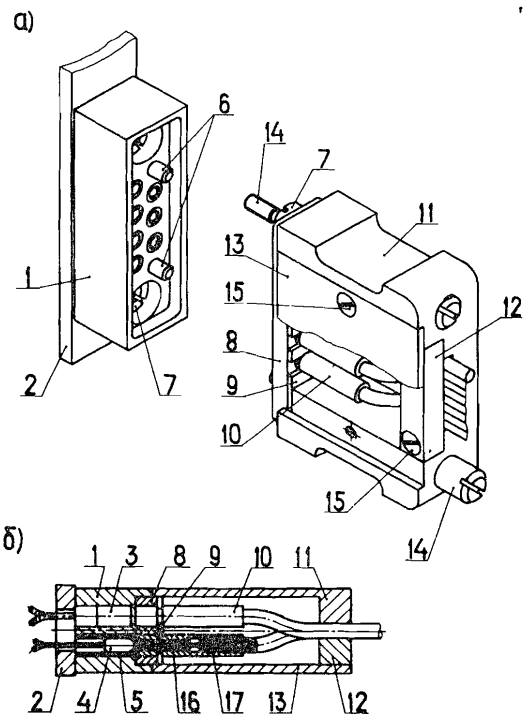


Рис.4. Конструкция разъемного МОС для ВОЛС: а/ механическая конструкция МОС; 1 - корпус /розеточная часть МОС/; 2 - передняя панель блока; 6 - штифты; 7 - узел крепления; 8 - юстировочная пластина; 9 - гребенка; 10 - наконечник; 11 - корпус /вилочная часть МОС/; 12 - фиксатор ОК; 13 - крышка; 14 - болт-фиксатор; 15 - винт; б/ взаимодействие оптико-механических частей МОС: 1 - корпус /розеточная часть МОС/; 2 - передняя панель блока; 3 - фотодиод; 4 - светодиод; 5 - втулка; 8 - юстировочная пластина; 9 - гребенка; 10 - наконечник; 11 - корпус /вилочная часть МОС/; 12 - фиксатор ОК; 13 - крышка; 16 - капилляр стеклянный; 17 - световод.

наконечниках с помощью клея. При этом дополнительную юстировку световодов в МОС нет необходимости производить из-за большой разницы в диаметрах излучателя /приемника/ оптических сигналов и световода. В процессе монтажа ОК производился контроль затухания до и после разделки с помощью оптического тестера "Электроника ОТ-7". На основании этих измерений ОК группировались по величинам потерь.

#### Краткие технические характеристики модулей

1. Скорость передачи, Кбит/с, не более	100
2. Длина волны излучателя, нм	910
3. Чувствительность приемника, Вт	$10^{-5}$
4. Диапазон рабочих температур, °С	+5...+45
5. Напряжение питания, В	+6; ±15
6. Количество входов/выходов ТТЛ	3
7. Количество ВОК	6
8. Длина ВОК, м, не более	50
9. Соединение блоков с ВОК	разъемное
10. Стандарт модулей	КАМАК, 1М.

**Заключение.** Одна из основных составляющих погрешности схемы описанного дифференциального фотодетектора возникает вследствие протекания токов смещения входного каскада операционного усилителя. В действительности из-за неравенства темновых токов имеет место остаточная погрешность:  $\Delta V_{\text{вых}}(\Delta I_{\text{см}}) = \Delta I_{\text{см}} R_{\text{ос}}$ ,  $\Delta I_{\text{см}}$  - разность токов смещения, которая обычно на порядок меньше каждого из них в отдельности, имеет во столько же раз меньший коэффициент температурной зависимости и является сугубо технологическим параметром, зависящим от конкретного экземпляра используемого фотодиода. Добиться полной компенсации погрешности, вызванной темновыми токами ФД1 и ФД2, очевидно, возможно. Однако такая задача в данной работе не ставилась.

Экспериментальная проверка описанной ВОЛС в составе аппаратуры управления высоковольтной ЭФУ показала, что предложенный способ построения отказоустойчивых ВОЛС дает возможность существенно повысить чувствительность и стабильность работы оптических каналов передачи информации в особо тяжелых условиях эксплуатации /перепады температуры, мощные радиопомехи, сложная радиационная обстановка и т.д./.

Автор благодарит П.К.Маньякова за обсуждение результатов эксперимента, Ю.В.Гусакова за разработку многоканального оптического соединителя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коршунов В.Н. и др. Оптические кабели связи. "Связь", М., 1980.
2. Романов Ю.И. ОИЯИ, 13-86-533, Дубна, 1986.
3. Алферов Ж.И. и др. ЖТФ, 1977, т.47, вып.8, с.1772.
4. Электроника /пер.с англ./, 1982, № 6, с.51.
5. Горохов В.А. Схема включения фотодиодов. Авт.свид. № 134490, БИ, 1960, № 24.
6. Electronic Design, November 12, 1981, p.83.
7. Аксененко М.Д. и др. Микроэлектронные фотоприемные устройства. Энергоатомиздат, М., 1984.
8. Загороднюк В.Т. и др. Лазерная оперативная связь с промышленными объектами. "Связь", М., 1979, с.54.
9. Патент № 4418983 /США/. Изобретения в СССР и за рубежом, 1984, № 8, вып.107, с.45.
10. Патент № 2119954 /Великобритания/. Изобретения в СССР и за рубежом, 1984, № 8, вып.107, с.94.
11. Плошай Л.Л. и др. Электросвязь, 1980, № 12.

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 августа 1986 года.

## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
D1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
D17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к.
D10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
D11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.
D13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна 1985.	4 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпонтamt, п/я 79  
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Романов Ю.И.

13-86-566

Отказоустойчивая волоконно-оптическая линия связи /ВОЛС/

Описана 3-канальная отказоустойчивая аппаратура передачи цифровой информации по волоконно-оптическим линиям связи /ВОЛС/. Каналы ВОЛС построены по схеме: оптический передатчик с парафазным выходом, двухпроводная линия связи, дифференциальный оптический приемник. Они рассчитаны для передачи данных без применения кодирования в диапазоне от нулевой частоты до 100 кГц. Строительная длина ВОЛС 10 м. Диапазон рабочих температур (5±45)°C.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Romanov Yu. I.

13-86-566

Failure Apparatus for Fibre-Optical Line (FOL)

A 3-channel failure apparatus for digital information transfer via fibre-optical lines (FOL) is described. The FOL channels are constructed according to the following circuit: an optical transmitter with paraphase output - a double-optical line - a differential optical receiver. They are used for data transfer without applying coding over a range of frequencies from 0 to 300. The FOL length is 10 m. The range of operating temperatures is +5... +45°C.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986