

# Лабораторная работа №15

## Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС)

Потребность в увеличении объема передаваемой информации постоянно растет. А электрические системы передачи в этом отношении достигли своего предела, поэтому в наше время широко используются волоконно-оптические линии связи.

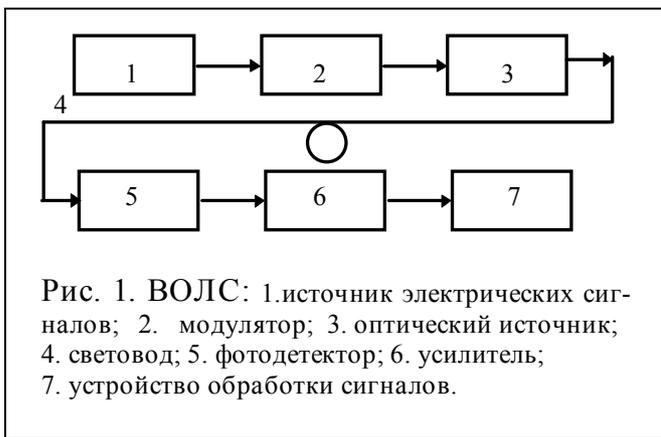
Разработка оптических способов передачи информации началась давно. В 1934 г. американец Норман Р. Френч получил патент на оптическую телефонную систему, речевые сигналы в которой передавались при помощи света по стержням чистого стекла.

Уже после изобретения лазерных источников света в 1959-1961 гг. начались интенсивные попытки применения их для передачи информации. Однако характеристики атмосферы, которая в первых системах использовалась в качестве тракта передачи, оказались неподходящими для высоконадежных систем, поскольку затухание в атмосфере лазерного излучения в дождь, туман и снегопад довольно значительно, порядка 120 дБ/км. Первые световодные линии, защищенные от влияния метеорологических условий строились на основе металлических труб с периодической коррекцией расходимости и направления луча. Новый шаг в разработке данных систем связи оптического диапазона был сделан после получения в 1972-1973 гг. стеклянных волокон с малым затуханием, послуживших основой для создания оптических кабелей, предназначение которых состоит в передаче информации, содержащейся в модулированных электромагнитных колебаниях оптического диапазона. Оптический кабель содержит от одного до сотен световодов-направляющих систем для электромагнитных волн оптического диапазона.

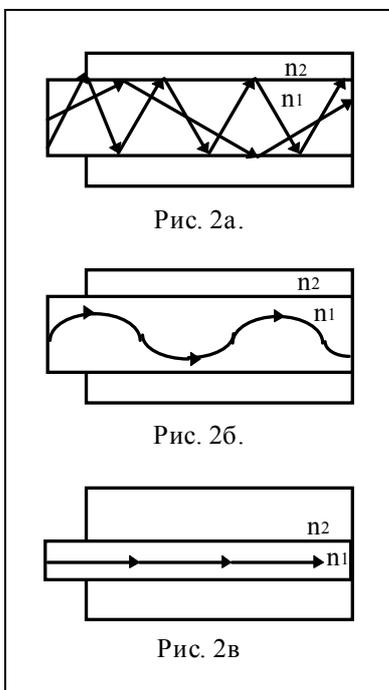
Практическое значение имеют только волоконные световоды, изготовленные из высокопрозрачного диэлектрика: стекла или полимера. Световод состоит из оптического волокна и покрытия, которое защищает волокно от атмосферных воздействий и деформаций, вызванных внешними силами. Помимо высокой информативной емкости ВОЛС обладают следующими достоинствами:

- 1) **малые потери**; это увеличивает расстояние, на котором возможна передача информации без промежуточного усиления (дальняя связь, кабельное вещание);
- 2) **нечувствительность к электромагнитным помехам**; не страшны помехи от посторонних источников (возможна связь вблизи линий электропередач или в районах с высокой магнитной активностью);
- 3) **отсутствие излучения**; обеспечивается скрытность обмена информацией и практически отсутствуют перекрестные помехи;
- 4) **малые размеры**; это очень важно в малых по объему помещениях (автомобили, самолеты, корабли, подводные лодки);
- 5) **малый вес**; снижение удельного веса является одним из основных направлений исследований в военной и авиакосмической промышленности;
- 6) **электрическая изоляция**; возможна передача информации между двумя точками с разными электрическими потенциалами без особых предосторожностей (корабли, электростанции);
- 7) **относительно низкая стоимость**.

Основными элементами каждой световодной системы связи являются (рис. 1): **блок оптического передатчика**, в котором электрические сигналы, поступающие на вход системы, преобразуются в оптические импульсы, передаваемые затем в световодную линию связи; **волоконно-оптическая линия**; **блок оптического приемника**, принимающего оптические сигналы и преобразующего их в электрические импульсы, поступающие на выход системы связи после усиления.



В одномодовых оптических волокнах диаметр сердцевины соизмерим с длиной волны, и по нему передается лишь один луч— тип волны (мода). В многомодовых оптических волокнах диаметр сердцевины больше, чем длина волны, и по нему распространяется большое число лучей (мод). Практически сердцевина оптического волокна составляет 8-10 мкм у одномодовых и порядка 50 мкм у многомодовых волокон.



Ход лучей в различных оптических волокнах различен. В ступенчатом многомодовом волокне (рис. 2а) лучи резко отражаются от границы сердцевина-оболочка. Причем пути следования различных лучей различны, и поэтому они приходят к концу линии со сдвигом по времени. Это приводит к искажению передаваемого сигнала (дисперсии). Градиентные оптические волокна также являются многомодовыми. Однако здесь лучи распространяются по волнообразным траекториям (рис. 2б), и поэтому они с меньшим разбросом по времени приходят к концу линии. одномодовые оптические волокна обладают наилучшими характеристиками, так как здесь распространяется только один луч (рис. 2в).

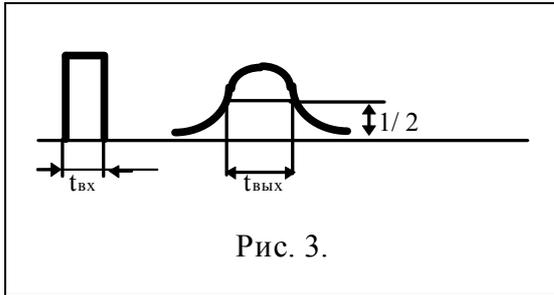
Оптическое волокно можно характеризовать следующими параметрами: **затуханием**, **полосой пропускания** и **числовой апертурой**.

**Затухание** сигнала в кабеле существенно зависит от длины волны излучения и обусловлено наличием примесей в используемом материале, рассеянием из-за его неоднородности, а также разбросом геометрических размеров. Основными производителями оптических волокон за рубежом являются фирмы AT&T (США) и NEC (Япония). Американцы вышли на уровень минимального затухания 0.18 дБ/км на длине волны 1.55 мкм, а японцы—0.2 дБ/км. Лучшие отечественные образцы оптических волокон для работы в диапазоне 1.55 мкм имеют потери 0.25 дБ/км, а в диапазоне 1.3 мкм— 0.4 дБ/км, что мало уступает мировому уровню. В скором будущем предполагается использовать оптический кабель с волокном из тетрафторида циркония, имеющего при длине волны 2.5 мкм затухание 0.01 дБ/км, или из фторида бериллия с затуханием при длине волны 2.1 мкм всего 0.005 дБ/км.

Оптическое волокно, как правило, имеет двухслойную конструкцию и состоит из сердцевины и оболочки с разными показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ , причем  $n_1 > n_2$ .

Оптические волокна делятся на две группы: **одномодовые** и **многомодовые**, причем последние подразделяются на **ступенчатые** ( $n_1, n_2$  не зависят от расстояния до оптической оси) и **градиентные** ( $n_1, n_2$  зависят от расстояния до оптической оси).

**Полоса пропускания** определяет полосу частот, пропускаемую световодом, и соответственно объем информации, который можно передавать по оптическому кабелю. Теоретически по световоду можно организовать огромное число каналов для передачи информации на большие расстояния. Однако имеются значительные ограничения, обусловленные тем, что сигнал на вход приемного устройства приходит тем более искаженным, чем длиннее линия (рис. 3). Данное явление носит название дисперсии и обусловлено различием времени распространения различных мод в световоде и наличием частотной зависимости показателя преломления.



Дисперсия – это рассеяние во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала. Дисперсия приводит к увеличению длительности импульса при прохождении по оптическому кабелю. Уширение импульса  $\tau$  определяется как квадратичная разность длительности импульсов на выходе и входе кабеля по формуле

$$\tau = \sqrt{t_{\text{вых}}^2 - t_{\text{вх}}^2} ,$$

причем значения  $t_{\text{вых}}$  и  $t_{\text{вх}}$  берутся на уровне половины амплитуды импульсов. Связь между величиной уширения импульсов и полосой частот приблизительно выражается соотношением  $\Delta F \approx 1/\tau$ . Так, если  $\tau = 20$  нс/км, то  $\Delta F = 50$  МГц·км. Пропускная способность оптического кабеля существенно зависит от типа световодов (одномодовые, многомодовые – ступенчатые, градиентные) и излучателей (лазер, светодиод). Например, если используется некогерентный источник (светодиод), полоса пропускания ограничивается величиной примерно 80 МГц·км, а при использовании лазерного источника полоса пропускания расширяется до нескольких ГГц·км.

**Апертура** – это угол между оптической осью и одной из образующих светового конуса, попадающего в торец световода, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения.

Учитывая, что в световоде границей раздела сред сердцевина-оболочка являются прозрачные стекла, возможно не только отражение оптического луча, но и проникновение его в оболочку. Для предотвращения перехода энергии в оболочку и излучения в окружающее пространство необходимо соблюдать условие полного внутреннего отражения и апертуру.

По законам геометрической оптики в общем виде на границе сердечник-оболочка будут падающая волна (с углом  $\varphi_n$ ), отраженная и преломленная. Известно, что при переходе из среды с большей плотностью в среду с меньшей плотностью, то есть  $n_1 > n_2$ , волна при определенном угле падения полностью отражается и не переходит в другую среду. Угол падения  $\varphi_n$ , начиная с которого вся энергия отражается от границы раздела сред, называется углом полного внутреннего отражения ( $\Theta_b$ ):

$$\sin \Theta_b = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\mu_2 \epsilon_2}{\mu_1 \epsilon_1}} ,$$

где  $\mu$  и  $\epsilon$  – соответственно магнитная и диэлектрическая проницаемости сердечника ( $\mu_1, \epsilon_1$ ) и оболочки ( $\mu_2, \epsilon_2$ ). При  $\varphi_n = \Theta_b$  преломленный луч проходит вдоль границы раздела сердцевина-оболочка и не излучается в окружающее пространство. При  $\varphi_n > \Theta_b$  энергия, поступившая в сердечник, полностью отражается и распространяется по световоду. Чем больше угол падения волны, то есть  $\varphi_n > \Theta_b$  в пределах от  $\Theta_b$  до  $90^\circ$ , тем лучше условия распространения и тем быстрее волна придет к приемному концу. В этом случае вся энер-

гия концентрируется в сердечнике световода и практически не излучается в окружающую среду. При падении луча под углом, меньшим угла полного отражения, то есть  $\varphi_n < \Theta_v$ , энергия проникает в оболочку, излучается во внешнее пространство и передача по световоду неэффективна. Режим полного внутреннего отражения предопределяет условие подачи света на входной торец световода. Световод пропускает лишь свет, заключенный в пределах телесного угла  $\Theta_a$ , величина которого обусловлена углом полного внутреннего отражения  $\Theta_v$ . Этот телесный угол  $\Theta_a$  характеризуется числовой апертурой (A):

$$A = \sin \Theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

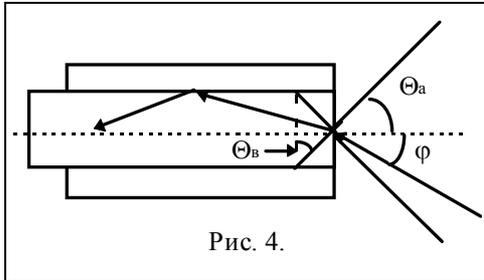


Рис. 4.

Как видно из рис. 4 между углом полного внутреннего отражения  $\Theta_v$  и апертурным углом падения луча  $\Theta_a$  имеется взаимосвязь. Чем больше угол  $\Theta_v$ , тем меньше апертура волокна  $\Theta_a$ . Следует стремиться к тому, чтобы угол падения луча на границу сердечник-оболочка  $\varphi_n$  был больше угла полного внутреннего отражения  $\Theta_v$  и находился в пределах от  $\Theta_v$  до  $90^\circ$ , а

угол ввода луча в торец световода  $\varphi$  укладывался в апертурный угол  $\Theta_a$  ( $\varphi < \Theta_a$ ).

Ранее отмечалось, что оптические кабели предназначены для передачи информации, содержащейся в модулированных электромагнитных колебаниях. Таким образом, для осуществления связи необходимо уметь модулировать свет передаваемым сигналом. Под **модуляцией** понимается изменение параметров света (главным образом его амплитуды или фазы, но можно говорить также и об изменении поляризации, направления распространения, частоты, распределения мод и т.д.) в зависимости от управляющего (модулирующего) сигнала. Модулирующий сигнал помимо электрического (ток, напряжение) может быть также акустическим, механическим и даже оптическим. Для модуляции необходимо, чтобы управляющий сигнал воздействовал на свет. Стало быть, модулятор – это некая система, в которой происходит взаимодействие света с веществом (рис. 5а). Выделяют:

а) **прямую модуляцию** (использование модулируемого источника света) (рис. 5б);

б) **внешнюю модуляцию** (модуляция излучения немодулируемого источника света) (рис. 5в);

в) **внутреннюю модуляцию** (если есть соответствующий модулятор, то его можно ввести в лазерный резонатор и осуществить таким образом внутреннюю модуляцию (по существу она является разновидностью прямой)) (рис. 2г).

Методы модуляции оптического излучения в волоконном световоде можно классифицировать по физическим эффектам, лежащим в основе работы волоконно-оптических модуляторов (ВОМ) и по типу модуляции (т.е. по модулируемому параметру оптической волны).



Рис. 5а.

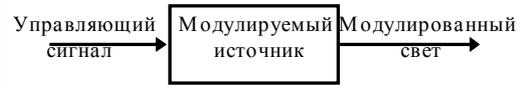


Рис. 5б.

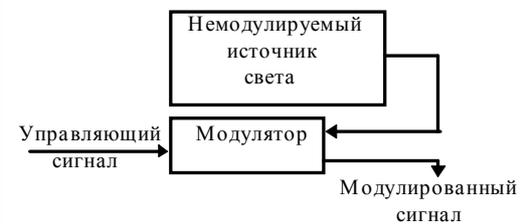


Рис. 5в.



Рис. 5г.

Разнообразные модуляционные эффекты можно разделить на два класса: эффекты традиционной оптики, когда волоконные световоды выступают лишь в качестве среды, передающей излучение, и эффекты, в которых проявляются специфические свойства волоконных световодов, не имеющие "объемных" оптических аналогов. К эффектам первого класса относят:

1) **Кинематические эффекты**, т.е. модуляцию излучения в волоконном световоде посредством движения участка световода. К таким эффектам относятся, например, торцевые эффекты (рассогласование апертур волоконного световода и источника или приемника излучения), приводящие к модуляции интенсивности или фазы излучения.

2) **Фотоупругие эффекты**, которые связаны с изменением эллипсоида показателей преломления вещества при механических деформациях (при этом модуляция параметров излучения зависит от характера деформационного воздействия и свойств самого материала, к которому это воздействие приложено). Они могут влиять, в частности, на интенсивность проходящего излучения, его модовый состав. Отметим, что различные воздействия на волоконные световоды, приводящие к его деформациям, могут приводить не только к фотоупругим эффектам.

3) **Электрооптические эффекты**. К этим эффектам принято относить изменение показателя преломления вещества, помещенного в электрическое поле. Изменение показателя преломления в ряде кристаллов, у которых отсутствует центр симметрии, пропорционально амплитуде электрического поля (линейный электрооптический эффект или эффект Поккельса). Изменения показателя преломления, пропорциональные второй степени амплитуды электрического поля (квадратичный электрооптический эффект или эффект Керра), наблюдаются во всех оптически прозрачных материалах. Для создания ВОМ практически важным случаем является квадратичный электрооптический эффект в изотропной среде. Электрооптические эффекты могут быть использованы для модуляции фазы и состояния поляризации излучения.

4) **Магнитооптические эффекты**. Из класса этих эффектов для создания ВОМ обычно используют только эффект Фарадея, заключающийся во вращении вектора поляризации излучения, распространяющегося в среде, помещенной в магнитное поле.

Выше были описаны основные элементы ВОЛС: излучатель, световод, фотоприемник. Далее рассмотрим области практического применения ВОЛС, а именно, цифровой и аналоговый методы передачи информации.

#### 1) Цифровой метод.

Быстрое развитие вычислительной техники, значительное снижение стоимости логических схем и преимущества цифровых систем передачи информации (высокая помехозащищенность, нечувствительность к нелинейным искажениям) – все это привело к тому, что в телефонной сети аналоговые системы вытесняются цифровыми.

Чтобы перевести аналоговый звуковой сигнал в цифровую форму, надо выполнить аналого-цифровое преобразование (кодирование). Для восстановления аналогового сигнала необходимо выполнить обратное, цифро-аналоговое преобразование (декодирование).

#### 2) Аналоговые методы.

Аналоговые методы связи на оптических волокнах представляют сейчас интерес практически только в области телеметрии и кабельного телевидения. Рассмотрим работу аналоговых систем связи. Остановимся на трех видах модуляции, оказывающих прямое влияние на качество передачи при данном типе связи.

##### 1) Модуляция по интенсивности или прямая модуляция.

Это самый простой в реализации способ модуляции. Передаваемый сигнал, по возможности усиленный, непосредственно управляет оптическим источником и модулирует интенсивность излучаемого им света. Хотя модуляция по интенсивности и проста в осуществлении, для этого необходим оптический излучатель с линейной характеристикой,

т.е. кривой зависимости излучаемой мощности от тока модуляции. На рис. 6 приведена типичная характеристика светодиода. Рабочую точку, относительно которой осуществляется модуляция, обозначим через  $M(p_m, i_m)$ , а ток сигнала – через  $i(t)$ . Заметим, что модуляция осуществляется в классе А и выражение для коэффициента модуляции имеет вид:

$$m = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{i_{\max} + i_{\min}} = \frac{\sqrt{2}i_e}{i_m} = \frac{p_{\max} - p_{\min}}{p_{\max} + p_{\min}},$$

где  $i_e$  – действующее значение тока сигнала модуляции. Если требуется хорошая линейность (малый уровень гармоник), то можно либо уменьшить глубину модуляции, что, однако, приводит к снижению отношения сигнала к шуму при приеме, либо осуществить

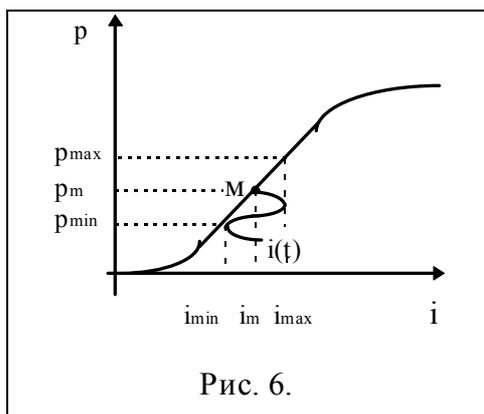


Рис. 6.

компенсацию вносимых нелинейных искажений, что можно сделать различными способами (введение передыскажений, метод фазовой модуляции, метод полупредыскажений, метод отрицательной обратной связи).

## 2) Частотная модуляция (ЧМ).

Передаваемый сигнал предварительно модулирует по частоте электрическую поднесущую, а затем сформированный ЧМ– сигнал подается на оптический излучатель. Предварительная частотная модуляция поднесущей частоты передаваемым сигналом – это обычный метод повышения отношения сигнала к шуму и снижения нелинейных искажений, вносимых оптическим излучателем (разумеется, при условии обеспечения хорошей линейности характеристик ЧМ– модуляторов и демодуляторов).

## 3) Фазово-импульсная модуляция (ФИМ).

В зависимости от изменения амплитуды сигнала изменяется положение излучаемых импульсов по отношению к положению опорных тактовых импульсов. Принцип фазово-импульсной модуляции состоит в следующем: после стробирования (дискретизации) передаваемого сигнала, осуществляемого через строго одинаковые промежутки времени, каждый раз излучается один оптический импульс стандартной формы и постоянной амплитуды. При этом задержка оптического импульса относительно момента стробирования пропорциональна мгновенному значению сигнала в момент стробирования. На приемной стороне по результатам измерения временных интервалов между тактовыми импульсами дискретизации и принимаемыми импульсами производится восстановление полезного сигнала (тактовые импульсы могут либо восстанавливаться на основе принятого сообщения, либо вырабатываться в приемном оборудовании). Таким образом осуществляется преобразование фазово-импульсной модуляции в широтно-импульсную модуляцию, после чего простая низкочастотная фильтрация позволяет восстановить переданный сигнал. Неточность измерения этих временных интервалов, связанная в большей степени с искажениями формы принимаемых импульсов, проявляется в виде шума, воздействующего на восстановленный сигнал.

Проведем сравнение описанных выше видов модуляции. Если имеется возможность передавать очень короткие импульсы, то наименьшей мощности на входе оптического приемника при постоянном отношении сигнала к шуму на выходе требует фазово-импульсная модуляция. За ней идет частотная модуляция и лишь потом модуляция по интенсивности. Но на практике приходится принимать в расчет и другие технические факторы (простота реализации, вид передаваемого сигнала), а также экономические показатели (стоимость системы модулятор-демодулятор).

Модуляция по интенсивности проще всего в осуществлении (прямая модуляция, узкая требуемая полоса пропускания). Конечно, при такой модуляции существенны нели-

нейности характеристики излучателя, которые заставляют уменьшать глубину модуляции, что приводит к повышению уровня требуемой мощности, но появление в последнее время одномодовых полупроводниковых лазеров позволяет получить значительную оптическую мощность и компенсировать последний недостаток.

Частотная модуляция неудобна тем, что требует более широкой полосы пропускания, но при прочих равных условиях она обеспечивает более высокое отношение сигнала к шуму (выигрыш порядка 10 дБ) и малые искажения. Добавим, что такая модуляция целесообразна, когда оптическое волокно должно служить наземной частью системы телевизионной связи через спутники или РРЛ. В самом деле, сигналы, передаваемые по радиоканалу через атмосферу, уже модулированы по частоте и их можно передавать по оптическому волокну без существенных изменений.

Фазово-импульсная модуляция наиболее сложна в осуществлении. С одной стороны, дискретизация приводит к обрезанию верхних частот сигнала, а с другой – малая длительность импульсов требует широкой полосы пропускания приемников, что усложняет их реализацию. По-видимому, эти недостатки позволяют устранить в какой-то мере (ценой некоторого ухудшения характеристик) такие менее сложные виды модуляции как широтно-импульсная модуляция и особенно частотно-импульсная модуляция, соединяющая в себе преимущества импульсной и частотной модуляции.

В настоящее время ВОЛС широко используются как у нас, так и за рубежом.

## Описание установки

Передача сигнала по оптическому волноводу (световоду) моделируется с помощью установки, принципиальная схема которой изображена на рис. 7, а схема включения установки в цепь – на рис. 8. Передатчиком сигнала является светодиод VD1, вольтамперную характеристику которого вы найдете на рис. 9. С помощью резисторов R1, R2, R3 формируется напряжение смещения, то есть задается положение рабочей точки, причем переменным резистором R3 оно может изменяться от -2В до +2В, а вольтметром V – контролироваться.

Генератором, который служит источником сигнала, осуществляется модуляция интенсивности светового потока, излучаемого светодиодом. Световой сигнал передается по оптическому волноводу в приемный блок, в котором установлен фотодиод VD2. Затем сигнал усиливается операционным усилителем, и усиленный сигнал мы можем наблюдать на экране осциллографа.

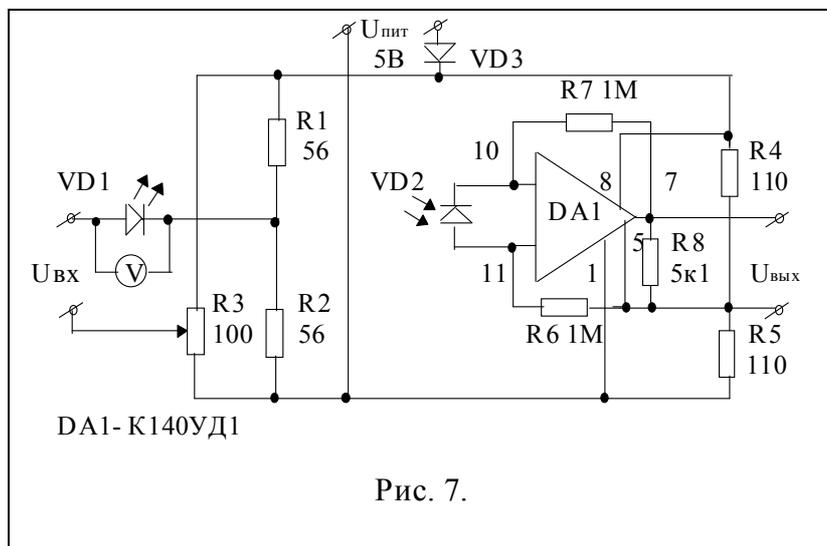


Рис. 7.

## Ход работы

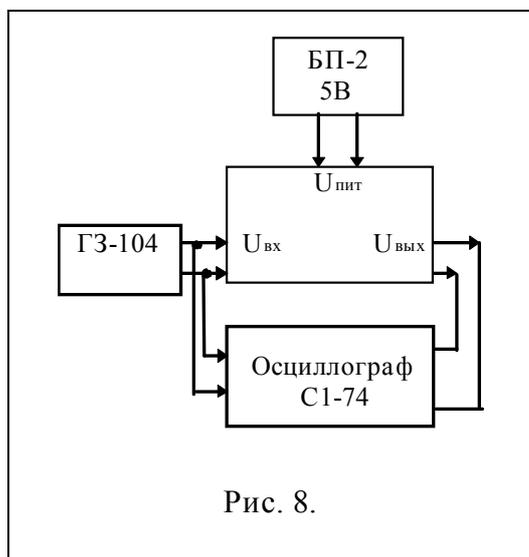


Рис. 8.

1. Собрать схему для изучения передачи сигнала по световоду (рис. 8) (В качестве источника сигнала в работе используется генератор ГЗ-104 ( $R_{\text{вых}}=5 \text{ Ом}$ ). Входной и выходной сигналы наблюдаются на осциллографе С1-74. Блок питания БП-2 (5В)).

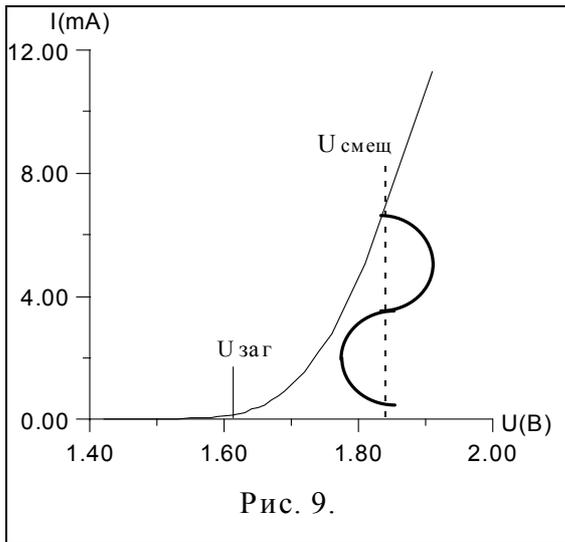
2. Включить блок питания. Установить с помощью переменного резистора R3 максимальное напряжение смещения. Включить генератор, предварительно обязательно установив нулевую амплитуду выходного сигнала. Подав с генератора сигнал порядка 0.4 В, пронаблюдайте входной и выходной сигналы на экране осциллографа. Чтобы убедиться, что передача сигнала осуществляется по волноводу, аккуратно выньте его из приемного блока и убедитесь в том, что вы-

ходной сигнал пропадет. Если у вас это не получится, то обратитесь за помощью к преподавателю.

3. Снять зависимость разности фаз между входным и выходным сигналами от частоты (частоту изменять от минимально возможной до максимально возможной).

4. Снять зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты входного для четырех значений напряжения смещения (задаются преподавателем).

5. Снять зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды входного при различных значениях частоты входного сигнала и напряжения смещения.



### Контрольные вопросы

1. Как объяснить изменение показаний вольтметра, показывающего напряжение смещения при изменении амплитуды входного напряжения?
2. Чем объяснить, что возможная полоса передаваемых без заметного искажения частот в случае одномодовых волокон лежит в диапазоне ГГц?
3. Почему в случае градиентных волокон апертура максимальна на оси сердечника и убывает до значений, близких к нулю, на границе сердцевина-оболочка? Чем объяснить постоянство апертуры в случае ступенчатых волокон?

## Литература

1. Дианов Е.М. “Основы волоконно-оптической связи” ( Сов. радио, 1980 г. ).
2. Андрушко М.М. и др. ”Волоконно-оптические линии связи” (М., Радио и связь, 1984 г.).
3. Семенов Н.А. “Оптические кабели связи” (М., Радио и связь, 1980 г.).
4. А. Козанне, Ж. Флере, Г. Метр, М. Руссо “Оптика и связь” (М., Мир, 1984 г.).
5. Мурадян А.Г., Гинсбург С.А. “Системы передачи информации по оптическому кабелю” (М., Связь, 1980 г.).
6. Скоморовский Ю.А. ”Передача сообщений по оптическим линиям связи” (М., Связь, 1974 г.).
7. Гуляев Ю.В. и др. ”Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение” (1991 г.).
8. Гроднев И.И. “ Волоконно-оптические линии связи” (1990 г.).
9. Мидвинтер Д.Э. “ Волоконные световоды для передачи информации” (1983 г.).
10. Элион Г.Р., Элион Х.А. “Волоконная оптика в системах связи” (М., Мир, 1981 г.).
11. Теумин И.И. “ Волноводы оптической связи” (М., Связь, 1978 г.).
12. Бугусов М.М.,Верник С.М. и др. “ Волоконно-оптические системы передачи” (М., Радио и связь, 1992 г.).
13. Коршунов В.Н. “Оптические кабели связи” (1980 г.).

