

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Р 693

13-88-723

Ю.И.Романов

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
ПРИЕМНЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

1988

ВВЕДЕНИЕ

Развитие техники волоконно-оптической связи создает основу для разработки и применения оптических средств передачи информации, коммуникационной средой которых служит волоконно-оптический кабель (ВОК)^{1/}. Устройства дистанционного управления и контроля, изготовленные с использованием ВОК (см. табл. 1), обеспечивают необходимую электромагнитную совместимость радиоэлектронных средств при высоких уровнях помех, создаваемых действующим оборудованием^{2,3/}.

Таблица 1

Технические характеристики волоконно-оптического кабеля

№ п.п.	Основные представители	Среда для передачи информации	Диаметр световодящей жилы мкм	Строительная длина м	Затухание дБ/км	Апертурный угол угл. град	качество световода мГц·км
1	ТУ 16 705 211-81	Одномодовый, одножильный (кварц-кварц)	40-60	до 1000	1-20	10	500-3000
2	-	Многомодовый одножильный (кварц-кварц; кварц-полиим)	100-400	50-500	10-40	10-20	80-1000
3	О-ИК-2-10000; 9821.30В (фирма Зунер, Австрия)	Многомодовый многожильный (поликомпонентное стекло)	2000 - -3000	3-30	100-1000	40	30-300

В системах управления высоковольтными физическими установками (ЭФУ) используется, как правило, до десятка и более одноканальных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Такая многолинейная структура каналов ВОЛС позволяет проще обеспечивать связь между пультом управления ЭФУ и блоками аппаратуры, расположенными на высоковольтном терминале уско-



рителя. Кроме того, она удобна в эксплуатации, позволяет создавать волоконно-оптические шины коллективного пользования.

Важнейшими элементами цифровых каналов ВОЛС являются передающие (ПОМ) и приемные (ПРОМ) оптоэлектронные модули. Начальными условиями, которые необходимо учитывать при разработке ПОМ, являются оптическая мощность, необходимая для ввода в ВОК, спектральная характеристика излучателя, необходимое быстродействие канала ВОЛС. При проектировании модулей ПРОМ, которые в значительной степени определяют параметры световодного тракта, одним из важнейших требований является возможность работы с цифровыми сигналами как произвольного формата, так и в определенных кодах, например в коде NRZ (коде без возврата к нулю).

Гальванические связи, используемые при создании таких модулей, экономически более эффективны. Они существенно упрощают схемотехнику построения информационного канала, при этом не используются специальные самосинхронизирующиеся коды. Однако эксплуатация каналов ВОЛС в составе систем управления высоковольтных ЭФУ в сложной радиационной обстановке и при воздействии температурных градиентов убеждает в необходимости учета влияния этих факторов еще на стадии проектирования ПОМ и ПРОМ.

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИИ НА НАДЕЖНОСТЬ И СТОЙКОСТЬ КОМПОНЕНТОВ ВОЛС

Ионизирующее излучение вызывает^{/4-7/}:

- уменьшение выходной мощности оптического излучения у светодиодов (табл. 2);
- ухудшение чувствительности ПРОМ, в основном за счет роста темновых и появления ионизационных токов у фотодиодов (табл. 3);
- увеличение коэффициента затухания ВОК за счет наведенного поглощения в световодных волокнах;
- люминесцентное и черенковское свечения в световодах;
- изменение плотности, геометрических размеров и апертуры волокон;
- ухудшение механических характеристик ВОК.

Наиболее чувствительными к воздействию ионизирующих излучений оказались световодные волокна. Так, волокна из поликомпонентного стекла (жгутовые кабели) при дозах гамма-излучения 10^3 рад имеют величину наведенного поглощения, превышающую 1000 дБ^{/4/}. У волокон из кварцевого стекла с полимерной отражающей оболочкой типа "кварц-полимер" при дозе 10^5 рад имеется наведенное поглощение на длине волны 820 нм порядка 20-500 дБ/км^{/5/}. У волокон кварцевого стекла (типа кварц-кварц) величина наведенного поглощения на длине волны 820 нм находится в пределах 100-1500 дБ/км при дозе гамма-излучения 10^4 рад^{/5/}.

Таблица 2

Технические характеристики излучателей

NN п.п.	Основные представители	Мощность излучения Р _и , мВт	Ток накачки мА	Фронт светового импульса τ _ф , нс	Размер излуч. площад-ки, мм	Срок службы, ч	Качество излучателя, Р _и /τ _ф
1	Суперлюминесцентный диод ИЛПН-301	0,1	150-300	5-30	φ60	10 ⁴	10 ³ -10 ⁵
2	Светодиод АЛ 106 АЛ 107 АЛ 115 АЛ 118	0,1-1 1-40	50-100 100-300	10-100 200-1000	300-1000	10 ⁴ 10 ⁵	10 ² 10 ⁴

Таблица 3

Технические характеристики фотодиодов

NN п.п.	Тип прибора, материал фоточувствительного слоя	Фоточувствительная площадка мм ²	Рабочее напряжение, В	τ мкс	I _т , мкА		Интегральная чувствительность мкА/лк	Ресурс ч
					T=20°C	T=70°C		
1	ФД-21кп; Si	0,2	20	0,06	0,017	0,24	6,6 · 10 ⁻⁴	1000
2	ФД-27к; Si	2-3	20	10	1	3,5	1,5 · 10 ⁻²	5000
3	кФДМ; Si	1-2	20-22	1	1	3,5	1,6 · 10 ⁻²	—

Следует также отметить, что уровень наведенного поглощения в ВОК при импульсных воздействиях ионизирующих излучений может на несколько порядков превышать уровень, вызванный достаточно длительным облучением ВОК с малой мощностью дозы, однако она сравнительно быстро релаксирует.

Основными направлениями при решении проблемы повышения радиационной стойкости ВОК следует считать^{/6,7/}:

- использование в диапазоне длин волн 800-900 нм оптических моноволокон только типа "кварц-полимер" и "кварц-кварц";
- предварительное проведение технологической радиационной тренировки моноволокон;
- переход в рабочий диапазон длин волн 1300-1700 нм.

ФОТОУСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ ПРОМ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДРЕЙФ

Наибольшее практическое применение имеет метод приема с дифференцированием сигнала на входе решающего устройства^{/8/}, исполненного в виде чувствительного триггера, а также метод приема в согласованной полосе частот при гальванической связи между каскадами ПРОМ. Метод с дифференцированием облегчает проектирование ПРОМ, давая возможность широкого применения серийных стандартных микросхем с возможностью гальванической развязки между ними. Однако для этого метода характерен процесс размножения ошибок при случайном сбое триггера, что значительно снижает реальную помехозащищенность ПРОМ даже при использовании дифференциальных усилительных каскадов.

С точки зрения увеличения помехозащищенности низко- и среднескоростных ПРОМ более перспективен метод построения приемников с гальваническими связями операционных усилителей (ОУ). Для повышения разрешающей способности фотоприемника необходимо, чтобы сигнальный ток датчика превышал значение входного тока ОУ. Этому и другим требованиям в основном отвечают высокоскоростные ОУ с полевыми транзисторами на входе^{/9/}.

Опыт создания ПРОМ свидетельствует, что включение входного ОУ по схеме с отрицательной обратной связью (последовательной по напряжению)

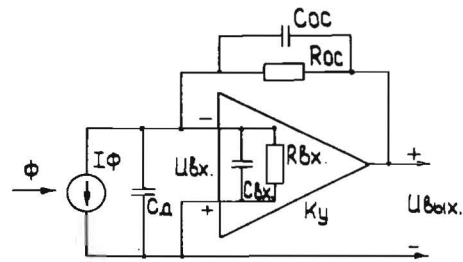


Рис. 1. Эквивалентная схема фотоприемника.

такого устройства приведена на рис. 1. ФД представлен генератором фототока I_{ϕ} , зашунтированным емкостью $C_{\text{д}}$. Выходное напряжение фотоприемника

$$V_{\text{вых}} = R_{\text{ос}} I_{\phi} + R_{\text{ос}} I_{\text{см}} + V_{\text{см}}, \quad (1)$$

полоса пропускаемых частот (по уровню 3 дБ)

$$f = \frac{K_v}{2\pi R_{\text{ос}}(C_{\text{д}} + C_{\text{вх}})} \quad \text{при } K_v > 1, \quad (2)$$

активная составляющая входного импеданса

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{ос}} / K_v, \quad (3)$$

где $R_{\text{ос}}$ — сопротивление резистора обратной связи; K_v — коэффициент усиления ОУ по напряжению; $C_{\text{д}}$ — внутренняя емкость фотодиода; $C_{\text{вх}}$ — входная емкость усилителя с учетом емкости монтажа; I_{ϕ} — фототок фотодиода; $I_{\text{см}}$ — входной ток ОУ; $V_{\text{см}}$ — напряжение смещения ОУ.

Оценим погрешности, вносимые ФД, связанные с температурной зависимостью. Вольт-амперная характеристика ФД, работающего в фотовольтаическом режиме, описывается уравнением^{/10/}

$$I_{\phi} = \Phi S - I_s \left(\exp \frac{qV_{\text{д}}}{KT} - 1 \right), \quad (4)$$

где Φ — световой поток; S — чувствительность ФД;

$$I_s = B \exp \left[-E_s / (KT) \right] \quad (5)$$

— темновой ток^{/10/}; $V_{\text{д}}$ — напряжение, приложенное к ФД; q — заряд электрона; K — постоянная Больцмана; E_s — ширина запрещенной зоны материала ФД; B — постоянная, зависящая от технологии изготовления ФД, степени легирования материала и других факторов.

Из уравнения (4) следует, что полный ток ФД, кроме полезного сигнала ΦS , содержит ток ошибки

$$I_{\text{ош}} = I_s \left(\exp \frac{qV_{\text{д}}}{KT} - 1 \right) \quad (6)$$

и

$$I_{\text{вых}} = \Phi S R_{\text{ос}} - I_s \left(\exp \frac{qV_{\text{д}}}{KT} - 1 \right) R_{\text{ос}} + V_{\text{см}} + I_{\text{см}} R_{\text{ос}}. \quad (7)$$

Последние три члена в уравнении (7) определяют ошибку измерения светового потока. Эту ошибку можно было бы учесть в виде аддитивной поправки, измеренной при $\Phi = 0$. Однако дело осложняется тем, что ошибка существенно зависит от температуры. Дифференцируя (1) с учетом (4) и (6), получаем

$$\frac{dV_{\text{Вых}}}{dT} = \frac{dV_{\text{СМ}}}{dT} + \frac{dI_{\text{СМ}}}{dT} R_{\text{ОС}} + \frac{dR_{\text{ОС}}}{dT} I_{\text{СМ}} - \frac{dI_{\text{ОШ}}}{dT} R_{\text{ОС}} - I_{\text{ОШ}} \frac{dR_{\text{ОС}}}{dT}. \quad (8)$$

Три первых члена в уравнении (8) определяют составляющие температурного дрейфа фотоприемного устройства, вносимые ОУ и резистором обратной связи. Оценка их вклада по паспортным данным ОУ и величине резистора обратной связи дает относительную погрешность 0,15%/К.

Что касается вклада фотодиода в температурный дрейф, то он определяется двумя последними членами в правой части уравнения (8), причем предпоследний член примерно на порядок превышает последний. Расчеты и измерения показывают, что для $T = 300$ К и среднего паспортного значения $V_{\text{СМ}} = 20$ мВ значение $dI_{\text{ОШ}}/dT \approx 10$ пА/К и экспоненциально возрастает с увеличением T и $V_{\text{СМ}}$. При номинальном значении светового потока на выходе ВОК ток фотодиода составляет примерно 500 пА. Относительная ошибка измерения этого тока, связанная с температурной зависимостью характеристик ФД, достигает 2% К.

Возможны следующие пути уменьшения этой погрешности:

- уменьшение $V_{\text{Д}}$ за счет уменьшения $V_{\text{СМ}}$;
- выбор типа ФД с минимальными значениями $I_{\text{С}}$ (см. табл. 3);
- параметрическая компенсация $I_{\text{С}}$ встречно включенным ФД, затемненным относительно сигнального ФД, имеющим близкое значение $I_{\text{С}}$ и находящимся при той же температуре (рис. 2);
- применение импульсной стабилизации $V_{\text{СМ}}$;
- уменьшение величины начального смещения $V_{\text{СМ}}$ путем введения стабилизирующего МДМ-канала (модуляция – демодуляция) (рис. 3).

Снижение $V_{\text{Д}}$ является эффективным способом уменьшения погрешности и может использоваться совместно с другими перечисленными способами. При этом напряжение на р-п переходе фотодиода можно определить по формуле^{/11/}

$$V_{\text{Д}} = IR_{\text{Д}} + IR_{\text{ОС}}/K_{\text{V}} + V_{\text{СМ}}, \quad (9)$$

где K_{V} – коэффициент усиления по напряжению при разомкнутой цепи обратной связи, $R_{\text{ОС}}$ – сопротивление цепи обратной связи, $R_{\text{Д}}$ – последовательное сопротивление фотодиода (сопротивление подложки и токоисточника), I – ток фотодиода, $V_{\text{СМ}}$ – напряжение смещения входа усилителя.

Прямая пропорциональность $V_{\text{Д}}$ световому потоку при $V_{\text{СМ}} = 0$ была подтверждена экспериментально. При увеличении Φ от нуля до максимума значение $V_{\text{Д}}$ линейно возрастает, достигая 300 мкВ, т.е. примерно половины значения $V_{\text{Д}}$, обусловленного $V_{\text{СМ}}$.

При $\Phi \neq 0$ температурный дрейф, к сожалению, не удается полностью компенсировать вычитанием сигнала с помощью затемненного ФД^{/12,13/}, а также использованием дифференциального фотоприемника (рис. 4)^{/14/}. Однако с ростом Φ относительная погрешность, связанная с температурным дрейфом, практически не увеличивается, поскольку возрастает и полезный сигнал. Уменьшения $V_{\text{Д}}$ можно достигнуть путем выбора ОУ с малым $V_{\text{СМ}}$ и большим K_{V} . Однако этот выбор ограничен номенклатурой ОУ с входными полевыми транзисторами, выпускаемыми промышленностью^{/9/}. Использование серийных ФД и интегральных усилителей позволяет получить величину первых двух членов, входящих в выражение (9), < 20 мкВ, тогда как напряжение смещения $V_{\text{СМ}}$ распространенных усилителей с дифференциальным входом, как правило, > 1 мВ. Снижение $V_{\text{СМ}}$ путем балансировки ОУ не достигает цели, так как для ОУ с полевыми транзисторами на входе при этом значительно (на 500-100 мкВ/К) увеличивается температурный дрейф смещения^{/15/}.

Другим схемотехническим способом уменьшения $V_{\text{СМ}}$, который заключается в периодической коррекции $V_{\text{СМ}}$, является применение импульсной стабилизации напряжения смещения нуля. Дифференциальные усилители с импульсной стабилизацией могут быть изготовлены на обычных ОУ, интегральных коммутаторах и отдельных МОП-транзисторах^{/16/}. Однако в большинстве эти схемы довольно громоздки и сложны в управлении. Кроме того, их проектирование и эксплуатация существенно усложняются проблемами получения необходимой устойчивости из-за использования последовательного соединения нескольких быстродействующих усилительных каскадов на ОУ.

Радикально уменьшить величину начального смещения можно путем применения стабилизирующего МДМ-канала^{/17/}. Он состоит из модулятора входного

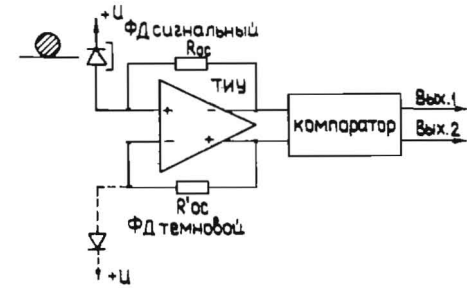


Рис. 2. Структурная схема ПРОМ с параметрической компенсацией темнового тока.

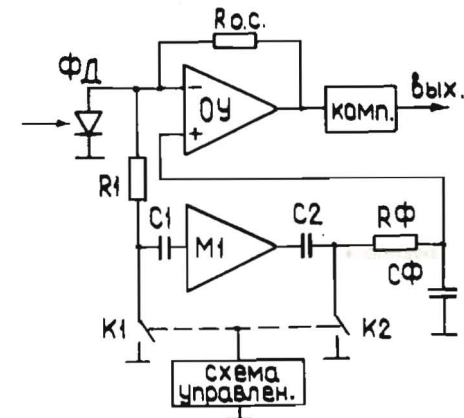


Рис. 3. Структурная схема ПРОМ со стабилизирующим МДМ-каналом.

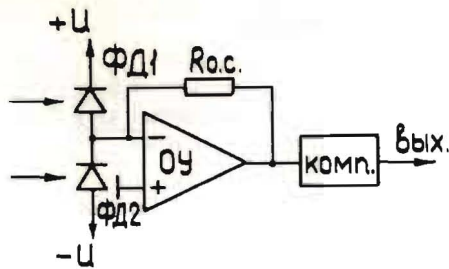


Рис. 4. Структурная схема дифференциального фотоприемника.

Монтажная ВОЛС. На рис. 5 приведена электрическая схема передающего оптического модуля (ПОМ). Он состоит из формирователя импульсов, выходного токового ключа и светодиода (СИД), вмонтированного в юстируемый оптический соединитель. Формирователь необходим для согласования передатчика с уровнем ТТЛ и выработки управляющего импульса для выходного ключа. В передатчике используется микросхема К155ЛП7.

Выходной ключ (M1-2) по управляющему импульсу формирователя (вентиль M1-1) вырабатывает токовый импульс накачки светодиода, являющегося его нагрузкой. В качестве источника излучения ПОМ служит серийный СИД типа АЛ107Б. Для получения световых импульсов с необходимой длительностью фронта и спада в выходном ключе использован форсированный режим. Такой режим получен путем подключения "ускоряющего" конденсатора C1 параллельно токоограничивающему резистору R1. В выходном ключе C1 действует как шунт, повышая при этом токи включения и выключения СИД. Полученная таким образом R1 C1-цепь формирует на фронте сигнала импульса короткий всплеск тока положительной полярности, длительностью примерно 10 нс и амплитудой вдвое больше рабочего уровня, а затем восстанавливается рабочее значение тока через СИД. На спаде импульса также за счет этой цепи формируется короткий отрицательный импульс отсечки. Применение форсированного режима работы выходного ключа позволяет существенно уменьшить фронты нарастания и спада световых импульсов, при этом обеспечивается полное разрешение передаваемых импульсов данных с низкоскоростным светодиодом типа АЛ107Б при скорости передачи $1 \text{ Мбит} \cdot \text{с}^{-1}$.

Для изготовления линии связи использовано многомодовое типа "кварц-полимер" оптическое волокно с диаметром сердцевины 200 мкм, числовой апертурой $NA > 0,2$ и затуханием 40 дБ/км. С целью стабилизации параметров среды передачи информации световой кабель был подвергнут технологической радиационной тренировке (старению) в условиях, приближенных к рабочим. Для этого 300-метровая бухта ВОК в течение 4 месяцев при температуре $+ (5 \dots 15)^\circ \text{C}$ находилась в радиационной зоне линейного ускорителя.

сигнала (рис. 3), схемы управления и демодулятора. Модулятор (M1) преобразует низкочастотную составляющую входного напряжения в переменное напряжение с амплитудой, пропорциональной входному сигналу. Модулированный сигнал затем усиливается усилителем переменного тока. Демодулятор восстанавливает усиленную низкочастотную составляющую входного сигнала. Последняя после фильтрации подается на второй полюс ОУ.

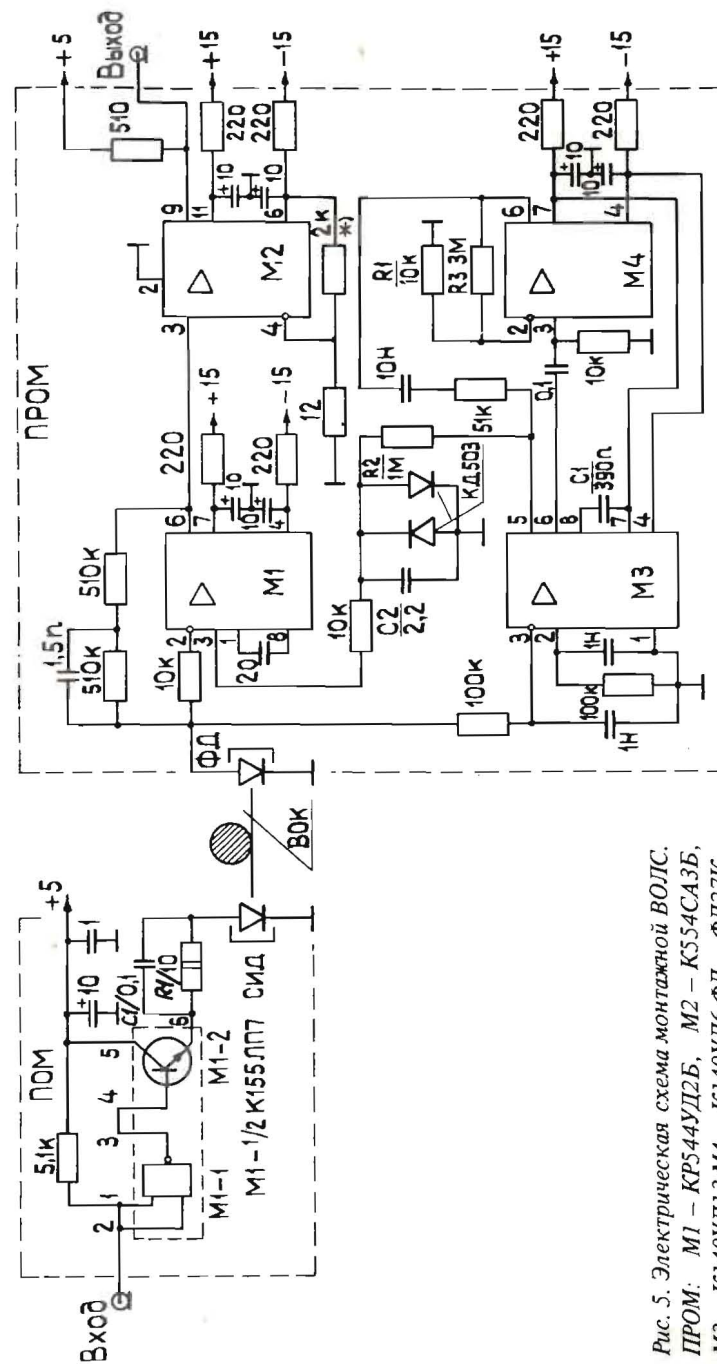


Рис. 5. Электрическая схема монтажной ВОЛС. ПОМ: M1 - КР544УД2Б, M2 - К554СА3Б, M3 - К140УД13, M4 - К140УД6, ФД - ФД27К.

Для монтажной ВОЛС со строительной длиной в 10 метров затухание в световоде составило величину < 1 дБ. В юстируемом оптическом соединителе используются цилиндрические сопрягающие поверхности. Корпусной узел соединителя состоит из двух частей: одна из них унифицированная — обеспечивает необходимое сопряжение кабельных наконечников с оптическими элементами; в другой устанавливаются излучатели или фотоприемники различных типов (для этого применяются конструкционные модификации). После выполнения юстировочной процедуры относительное положение обеих частей корпусного узла оптического соединителя фиксируется.

На рис. 5 дана электрическая схема приемного оптического модуля (ПРОМ). Он состоит из фотоприемного усилителя (М1), компаратора (М2) и стабилизирующего МДМ-канала (модуляция-демодуляция) (М3, М4) по схеме Гольдберга. В качестве фотодиодного датчика излучения использован кремниевый фотодиод ФД-27К, вмонтированный в юстируемый оптический соединитель. Включение фотодиода (ФД) в фотогальваническом режиме (без напряжения смещения) на низкоомную нагрузку уменьшает температурный коэффициент интегральной чувствительности. Трансимпедансный усилитель (М1) выполняет функцию преобразователя "ток — напряжение". Он собран на ОУ типа К544УД2 с полевыми транзисторами на входе. Данный ОУ имеет малый входной ток ($\sim 0,1$ нА), малое приведенное напряжение шумов и скорость нарастания выходного напряжения > 20 В/мкс. Однако его напряжение смещения (~ 30 мВ) при значительном температурном дрейфе (~ 50 мкВ/°С) не позволяет обеспечить режим короткого замыкания ФД без применения стабилизирующего канала. Этот канал построен на интегральном МДМ-усилителе (М3) и ОУ (М4). Частота модуляции выбрана равной 2 кГц. Она определяется величиной емкости С1. Цепочка R2C2 образует однозвенный фильтр демодулированного сигнала, который служит для компенсации смещения с постоянной времени $\sim 2,5$ с. Такая постоянная времени выбрана экспериментально, чтобы обеспечить эффективное подавление сигнала модуляции до уровня шумов трансимпедансного усилителя. Петлевое усиление стабилизирующего канала $\geq 5 \cdot 10^3$. В этом случае смещение входа трансимпедансного усилителя (М1) определяется практически только напряжением смещения входа МДМ-усилителя (~ 20 мкВ).

На выходе М1 амплитуда сигнала составляет ~ 200 мВ, что вполне достаточно для надежной работы компаратора (М2). Выход микросхемы М2 (К554СА3) представляет собой открытый коллектор транзистора, что позволяет при соответствующем напряжении на нагрузке коллектора обеспечить сопряжение с ТТЛ-логикой.

Экспериментальная проверка описанного световодного канала в составе аппаратуры управления высоковольтной ЭФУ показала, что предложенный способ построения отказоустойчивых ВОЛС дает возможность существенно повысить стабильность работы оптических каналов в особо тяжелых условиях эксплуатации (сложная радиационная обстановка, перепады температур, мощные радиопомехи и т.д.).

Автор благодарит П.Н.Буйлова за помощь в изготовлении и испытаниях блоков на ЭФУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мурадян А.Г. и др. *Оптические кабели многоканальных линий связи*. М.: Радио и связь, 1987.
2. Романов Ю.И. ОИЯИ, 13-86-513, Дубна, 1986.
3. Романов Ю.И. ОИЯИ, 13-86-533, Дубна, 1986.
4. Джаллорензи Т.Г. — ТИИЭР, 1978, т.66, №7, с.29.
5. Сайгел Дж.Х. (мл.) — ТИИЭР, 1980, т.68, №10, с.81.
6. Гурьянов А.Н. и др. — *Квантовая электроника*, 1978, 5, №11, с.2484.
7. *Electron. Lett.*, 1980, v.16, No.23, p.866.
8. Персоник С.Д. — ТИИЭР, 1977, т.65, №12, с.47.
9. Алексенко А.Г. и др. *Применение прецизионных аналоговых микросхем*. М.: Радио и связь, 1985.
10. Соболева Н.А. и др. *Фотоэлектронные приборы*. М.: Высшая школа, 1974.
11. Бочкарь Е.П. и др. — ПТЭ, 1986, №2, с.170.
12. Горохов В.А. *Схема включения фотодиодов*. Авт. свид. №134490, БИ, 1960, №24.
13. *Electronic Design*, November 12, 1981, p.83.
14. Романов Ю.И. ОИЯИ, 13-86-566, Дубна, 1986.
15. Достал И. *Операционные усилители* (пер. с англ. под ред. М.В.Гальперина). М.: Мир, 1982.
16. Себко С.Е. и др. — ОМП, 1979, №8, с.43.
17. *Усилители с полевыми транзисторами* (под ред. И.П.Степаненко). М.: Сов. радио, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 сентября 1988 года.