

535
К-171

2/3

Московский государственный технический университет
им. Н.Э.Баумана

С.Б.Каледин, В.Б.Пясецкий

ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Часть 2

Расчет схем включения

Рекомендовано редакцией МГТУ
в качестве учебного пособия
по курсу

"Теория формирования, распространения
и приема оптического излучения"

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1649274

Каледин С.Б. Приемники опти

Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана
имени Н.Э.Баумана
5000
БИБЛИОТЕКА
ЧИТАЛЬНЫЙ ЗАЛ

МГТУ
им. Н.Э.Баумана
Библиот. А.

Рецензенты: С.Б.Одинокое, В.А.Соломатин, В.А.Шилин

К17 Каледин С.Б., Пясецкий В.Б. Приемники оптического излучения. Ч.2. Расчет схем включения: Учебное пособие по курсу "Теория формирования, распространения и приема оптического излучения". - М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2000. - 40 с., ил.

Рассмотрены правила построения и расчета схем включения основных типов приемников излучения с использованием схем на основе интегральных операционных усилителей. Приведены примеры таких расчетов.

Для студентов III-IV курсов.

Табл. I. Ил. 28. Библиогр. 13 назв.

ББК 22.34

© МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2000.

ВВЕДЕНИЕ

Применение приемников оптического излучения (ПИ) неразрывно связано с расчетом их рабочих параметров и характеристик в составе электронного тракта оптико-электронного прибора (ОЭП). При этом приходится решать две задачи. Во-первых, на основе справочных данных определить параметры и характеристики ПИ применительно к рабочему источнику излучения. Во-вторых, выбрать и рассчитать электрическую схему включения ПИ. Первая задача подробно рассмотрена, например, в [1, 2]. Решение второй задачи в общем виде можно найти, например, в [3]. Однако представляется целесообразным подробнее рассмотреть этот вопрос применительно к схемам включения основных типов ПИ.

Промышленность выпускает как собственно ПИ, так и приемные устройства, в которых ПИ конструктивно совмещен с первым электронным каскадом, т.е. фотоприемные устройства (ФПУ). Задача схемотехники электронного тракта ОЭП на основе ФПУ заключается в согласовании электрических выходных параметров ФПУ с последующими каскадами электронного тракта. Эта задача не выходит за рамки традиционной схемотехники электронных устройств, поскольку вопросы согласования фоточувствительного элемента (ФЧЭ) ПИ с электронным трактом для ФПУ уже решены.

Вместе с тем большое число ПИ не содержат никаких электронных элементов, кроме одного или нескольких ФЧЭ и ряда вспомогательных, относящихся только к ПИ. Примерами таких ПИ являются фотодиоды (ФД), фоторезисторы (ФР), фототранзисторы (ФТ), фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Включение таких ПИ в состав электронного тракта ОЭП связано с созданием специального согласующего каскада, параметры и характеристики которого выбираются в соответствии с выходными (электрическими) параметрами и характеристиками ПИ, а также с учетом условий применения ПИ. Другими словами, приходится решать задачу синтеза ФПУ на основе выбранного ПИ и условий его применения.

Во многих случаях электронные каскады для согласования и предварительного усиления сигналов ПИ могут быть изготовлены на основе операционных усилителей (ОУ). ОУ позволяют создать ряд электронных схем (повторителей, инвертирующих и неинвертирующих усилителей, преобразователей "ток - напряжение" и др.), соответствующих предъявляемым в данном случае требованиям, что весьма важно с точки зрения схемотехники электронных систем ОЭП. При

включении таких ПИ, как ФД, ФР, ФТ, ФЭУ, операционные усилители обладают некоторыми избыточными возможностями. Это связано с применением расщепленного (двухполярного) источника питания, который позволяет ОУ с равным успехом работать с сигналами разного знака, в то время как упомянутые ПИ дают возможность получать однополярные сигналы. Однако дифференциальное включение однотипных ПИ, например таких ПИ, как болометры, которые включаются в мостовую схему с питанием от генератора переменного напряжения, позволяют в полной мере реализовать возможности ОУ. Кроме того, сравнительная простота схемных решений на основе ОУ, в том числе возможность его применения с несимметричным (однополярным) источником питания, делает операционный усилитель одним из основных элементов для широкого спектра задач схемотехники ФПУ ОЭП.

В данном пособии буквенно-цифровые позиционные обозначения нескольких однотипных элементов, встречающихся в одной электронной схеме, выполнены на рисунках не в строку шрифтом одного размера, как рекомендуется ГОСТом, а с индексом (например, вместо R_1 , R_2 и т.п. на схемах изображено так: R_1 , R_2 и т.п.) для исключения возможных ошибок при чтении формул, в которых используются эти обозначения.

1. ЭЛЕМЕНТЫ ТИПОВЫХ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ПИ

Регистрация оптического излучения посредством ПИ производится при включении последних в электрическую цепь. Подключение различных ПИ имеет свои особенности, обусловленные отличиями типов приемников, вариантом решаемой задачи и т.д. Однако во многих случаях удается использовать готовые (типовые) схемные решения, что значительно упрощает решаемую задачу. Некоторые из таких схем включения ПИ и типовых узлов ФПУ рассматриваются в данном разделе.

1.1. Резистивный делитель

Схема простейшего резистивного делителя представлена на рис. 1. Напряжение питания приложено к крайним точкам цепи. Для расчета падения напряжения на каком-либо резисторе необходимо найти разность потенциалов на его зажимах. Предварительно необходимо найти силу тока, протекающую в цепи:

$$I_d = \frac{U_n}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Потенциал точки *b* относительно точки

$$U_{ab} = I_d \cdot R_1 \quad (I)$$

Потенциал точки *c* относительно точки *a* составит

$$U_{ac} = I_d (R_1 + R_2)$$

Падение напряжения на резисторе R_2

$$U_{cb} = U_{ac} - U_{ab} = I_d \cdot R_2$$

Очевидно, что полярность напряжения на резисторе будет определяться полярностью напряжения питания, т.е. более положительной будет точка *c* в схеме на рис. I.

Для делителя, состоящего из *n* одинаковых резисторов, падение напряжения на каждом из них составит

$$U_i = I_d \cdot R_i = U_n / n$$

Если одно из сопротивлений (например, R_1) уменьшится на величину ΔR , то ток делителя изменится:

$$I_d = U_n / (R_1 - \Delta R + R_2 + R_3)$$

Это приведет к изменению падения напряжения на резисторах.

Разность напряжений на резисторе при изменении сопротивления составит

$$U_{cb} = \frac{U_n \cdot R_2}{R_1 - \Delta R + R_2 + R_3}$$

Изменение напряжения зависит от напряжения питания резистивного делителя.

Данная схема очень часто используется как для включения приемников излучения (например, ФР), так и для подачи питающего напряжения на диодную систему ФЭУ.

1.2. Мостовая схема

Мостовая схема (рис. 2) имеет четыре плеча, в которых установлены резисторы. Напряжение питания приложено к одной диагонали моста, а с другой снимают выходное напряжение.

Данная схема относительно точек приложения напряжения пита-

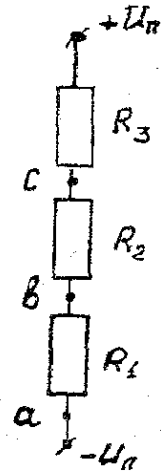


Рис. I. Резистивный делитель

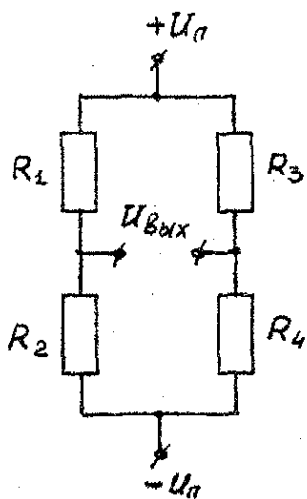


Рис. 2. Мостовая схема

ния образована двумя параллельно включенными резистивными делителями: один состоит из резисторов R_1 , R_2 , второй - из R_3 , R_4 .

Выходное напряжение равно разности потенциалов точек α и β . Используя выражение (I) для расчета потенциала точки в резистивном делителе, получаем значения потенциалов точек α и β относительно точки c :

$$U_{\alpha c} = I_{д1} \cdot R_2 = \frac{U_n R_2}{R_1 + R_2};$$

$$U_{\beta c} = I_{д2} \cdot R_4 = \frac{U_n R_4}{R_3 + R_4}.$$

Если сопротивления резисторов в плечах моста одинаковы и равны R , то потенциалы указанных точек равны между собой.

В этом случае выходное напряжение равно 0.

Условием балансировки мостовой схемы является выполнение условия $R_1 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_3 = 0$.

Очевидно, что при одновременном и одинаковом изменении сопротивлений R_1 и R_3 или R_2 и R_4 потенциалы точек α и β будут изменяться одинаково, и выходное напряжение останется равным 0.

Эта особенность мостовой схемы используется при включении некоторых приемников излучения (например, болометров).

При изменении сопротивления только в одном плече моста происходит его разбалансировка. Предположим, что сопротивление резистора R_1 уменьшилось на ΔR , тогда изменится потенциал точки α :

$$U_{\alpha c} = \frac{U_n}{R_1 - \Delta R + R_2}.$$

Потенциал точки β остался прежним, поэтому выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = U_{\alpha c} - U_{\beta c} = \frac{U_n \cdot \Delta R}{2(2R - \Delta R)}.$$

1.3. Трансформаторная схема

В ряде случаев при включении ПИ в электронный тракт целесообразно использовать индуктивную нагрузку: согласующий трансформатор или дроссель. В первую очередь такое включение имеет смысл для малощумящих ПИ, имеющих малое внутреннее сопротивление (например, ФД в фотогальваническом режиме) при сравнительно высоких частотах модуляции полезного потока излучения. Трансформатор позволяет повысить уровень сигнала ПИ над уровнем шумов первого электронного каскада, согласовать полное внутреннее сопротивление ПИ как источника сигнала с полным выходным сопротивлением функционального узла электронного тракта, а также отделить переменный полезный сигнал от постоянного или медленно меняющегося сигнала, связанного, например, с фоновым облучением ПИ. Последнее обстоятельство связано с частотной зависимостью сопротивления индуктивности: $|Z| = 2\pi fL$, что и необходимо учитывать в расчете таких схем включения.

Трансформатор характеризуется следующими электрическими параметрами:

L_1 - индуктивность первичной обмотки;

L_2 - индуктивность вторичной обмотки;

M - взаимная индуктивность.

Взаимная индуктивность трансформатора связана с индуктивностью обмоток зависимостью

$$M = K(L_1, L_2) \cdot /2,$$

где K - коэффициент связи между обмотками. Этот коэффициент не следует путать с коэффициентом трансформации $k = n_2 / n_1$, где n_1 , n_2 - число витков соответственно в первичной и вторичной обмотках. Если катушки трансформатора не имеют сердечников и отсутствуют токи утечки, то $K = K_{\max} = 1$. В трансформаторах с железными сердечниками $K \rightarrow 1$, в трансформаторах промежуточной частоты обычно $K = 0,01$.

Взаимная индуктивность M влияет на входную и выходную индуктивности трансформатора:

при согласном включении обмоток входная индуктивность $L_{\text{вх}} = L_1 + M$, выходная индуктивность $L_{\text{вых}} = L_2 + M$;

при встречном включении обмоток входная индуктивность $L_{\text{вх}} = L_1 + M$, выходная индуктивность $L_{\text{вых}} = L_2 - M$.

Отметим, что электрическая мощность выходного сигнала трансформатора примерно равна мощности входного (без учета сравнитель-

но малых потерь). Если вторичная обмотка не нагружена, то через трансформатор в первичной обмотке протекает очень небольшой переменный ток (на расчетной частоте модуляции потока излучения!).

Недостатки схем с индуктивной нагрузкой: сравнительно большие габариты и масса ПИ (особенно при низких частотах модуляции принимаемого потока излучения), их чувствительность к внешним магнитным полям, а также изменение электрических параметров цепи включения ПИ при незапланированном изменении частоты модуляции потока.

2. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

ОУ — это дифференциальный усилитель (ДУ) постоянного тока с очень большим (не менее $10^5 - 10^6$) коэффициентом усиления напряжения и несимметричным выходом. ОУ допускает изменение выходного сигнала почти в полном диапазоне питающего напряжения (обычно используют отдельные источники ± 15 В). Условное обозначение ОУ показано на рис. 3. Входы ОУ имеют обозначения: "+" — неинвертирующий и "-" — инвертирующий. Названия входов говорят о том, что выходной сигнал ОУ изменяется в положительном направлении, когда потенциал на входе "+" становится более положительным, чем потенциал на входе "-".

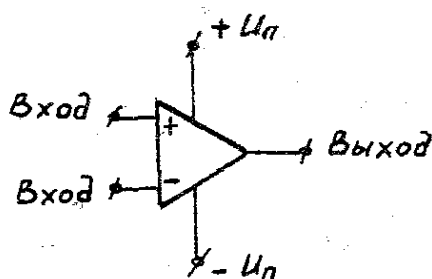


Рис. 3. Операционный усилитель

В связи с большим коэффициентом усиления ОУ применяют почти всегда с отрицательной обратной связью (ОС). Важнейшие

правила, которые определяют поведение ОУ, охваченного петлей отрицательной ОС, заключаются в следующем. Во-первых, ОУ обладает таким большим коэффициентом усиления по напряжению, что изменение напряжения между его входами на несколько долей милливольты вызывает изменение выходного напряжения в пределах $+U_n - -U_n$. Во-вторых, ОУ потребляет очень небольшой входной ток (порядка 0,1 мкА и менее). Поэтому для идеального ОУ можно сформулировать следующие правила поведения:

- 1) выход ОУ, охваченного отрицательной ОС, стремится к тому, чтобы разность напряжений между его входами была равна нулю;
- 2) входы ОУ тока не потребляют.

Правила эти справедливы для любого ОУ при условии, что он находится в активном режиме, т.е. его входы и выход не перегружены. Подробнее этот вопрос рассмотрен, например, в [4].

Инвертирующий усилитель. Схема усилителя представлена на рис. 4. Анализ этой схемы с помощью правил, сформулированных для ОУ, позволяет получить:

входное сопротивление усилителя $R_{Вх} = R_1$;

коэффициент усиления $K = -(R_2 / R_1)$.

На основе этой схемы могут быть реализованы другие, например инвертирующий сумматор входных сигналов (рис. 5). Входное сопротивление каждого из входов равно R_1 , коэффициент усиления по каждому из входов $K = -(R_2 / R_1)$, выходное напряжение усилителя представляет собой сумму независимых входных сигналов. Значение сопротивления R_1 по разным входам может быть выбрано различным в соответствии с необходимым значением коэффициента усиления для каждого из входных сигналов.

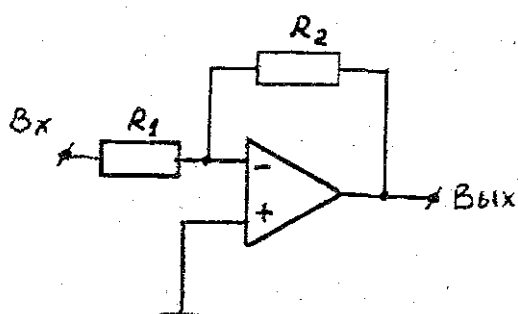


Рис. 4. Инвертирующий усилитель

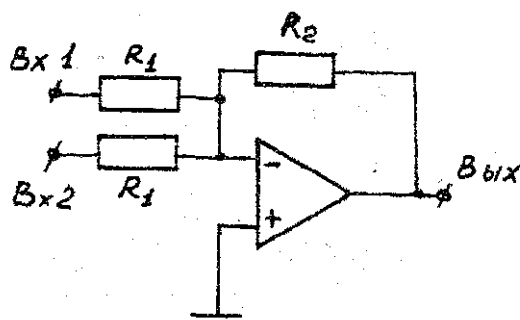


Рис. 5. Суммирующий инвертирующий усилитель

Повторитель напряжения. Схема на рис. 6 называется повторителем напряжения, или буферным усилителем. Полное входное сопротивление схемы со стороны неинвертирующего входа очень велико (не менее нескольких мегаом). Поэтому напряжение на выходе изолировано от входного напряжения. Коэффициент усиления повторителя по напряжению $K \equiv 1$.

Неинвертирующий усилитель. На рис. 7 показана схема неинвертирующего усилителя. Анализ схемы показывает, что коэффициент усиления $K = 1 + (R_2 / R_1)$, входное сопротивление схемы очень велико (не менее нескольких десятков мегаом).

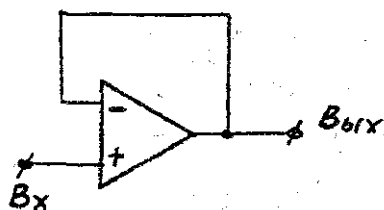


Рис. 6. Повторитель

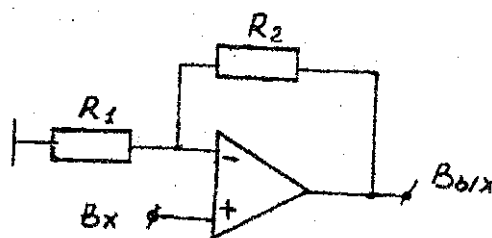


Рис. 7. Неинвертирующий усилитель

Эта схема, как и все предыдущие, представляет собой усилитель постоянного тока. Если источник сигнала и усилитель связаны между собой по переменному току (т.е. вход усилителя "закрыт" разделительным конденсатором), то для входного тока, очень небольшого по величине, следует предусмотреть "заземление" через сопротивление R_3 , как показано на рис. 8. Если это сопротивление

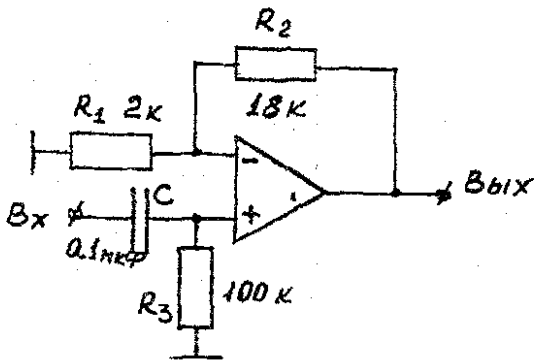


Рис. 8. Неинвертирующий усилитель переменного сигнала

отсутствует, то входная цепь такого усилителя позволяет воспринимать только сигнал на очень высоких частотах. Для представленных на схеме значений компонентов коэффициент усиления по напряжению равен 10, а точке -3 дБ соответствует частота $f = 1 / (2\pi R_3 C) = 16$ Гц.

Если необходимо усиливать только сигналы переменного тока, сохраняя в электронном тракте постоянную составляющую суммарного сигнала,

то уменьшают коэффициент усиления для постоянного тока до единицы. Для постоянного тока схема, изображенная на рис. 9, представляет собой повторитель напряжения с $K = 1$. Точке -3 дБ соответствует частота 17 Гц. На этой частоте импеданс конденсатора $X_C = 2\pi f C = 2$ кОм.

Дифференциальный усилитель. На рис. 10 представлена схема ДУ. На выходе такого усилителя устанавливается напряжение, пропорциональное разности сигналов на инвертирующем и неинвертирующем входах. Анализ схемы усилителя можно провести на основе все тех же правил, принятых для ОУ.

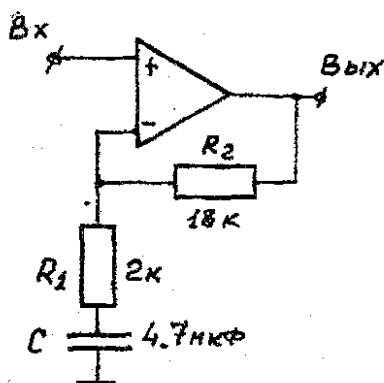


Рис. 9. Неинвертирующий усилитель с частотно-зависимым коэффициентом усиления

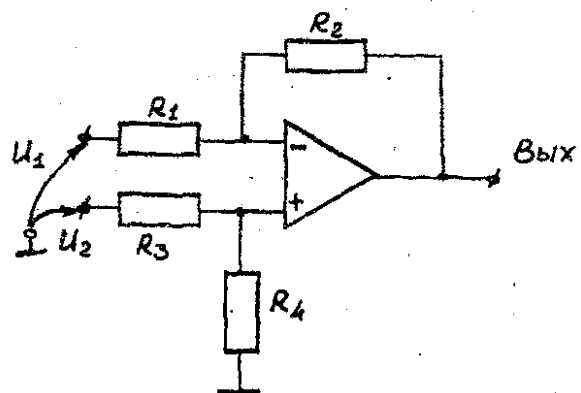


Рис. 10. Дифференциальный усилитель

В общем случае значение выходного напряжения можно рассчитать с помощью метода суперпозиции как результат индивидуальных воздействий напряжений на каждом из входов относительно "земли". Рассмотрим этот расчет подробнее.

При подаче сигнала U_1 ($U_2 = 0$) выходное напряжение усилителя, который в этом случае работает как инвертирующий, составит

$$U_{\text{Вых}1} = - (R_2 / R_1) U_1.$$

При подаче сигнала U_2 ($U_1 = 0$, вход 1 "заземлен")

$$U_{\text{Вых}2} = U_2 R_4 (1 + R_2 / R_1) / (R_3 + R_4).$$

В этом случае схема работает как неинвертирующий усилитель. Результирующее выходное напряжение представляет собой сумму напряжений:

$$U_{\text{Вых}} = U_{\text{Вых}1} + U_{\text{Вых}2} = U_2 R_4 (1 + R_2 / R_1) / (R_3 + R_4) - U_1 (R_2 / R_1).$$

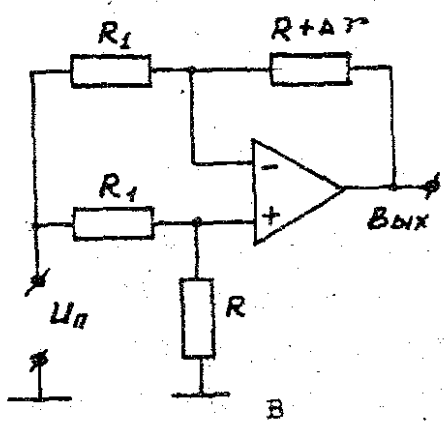
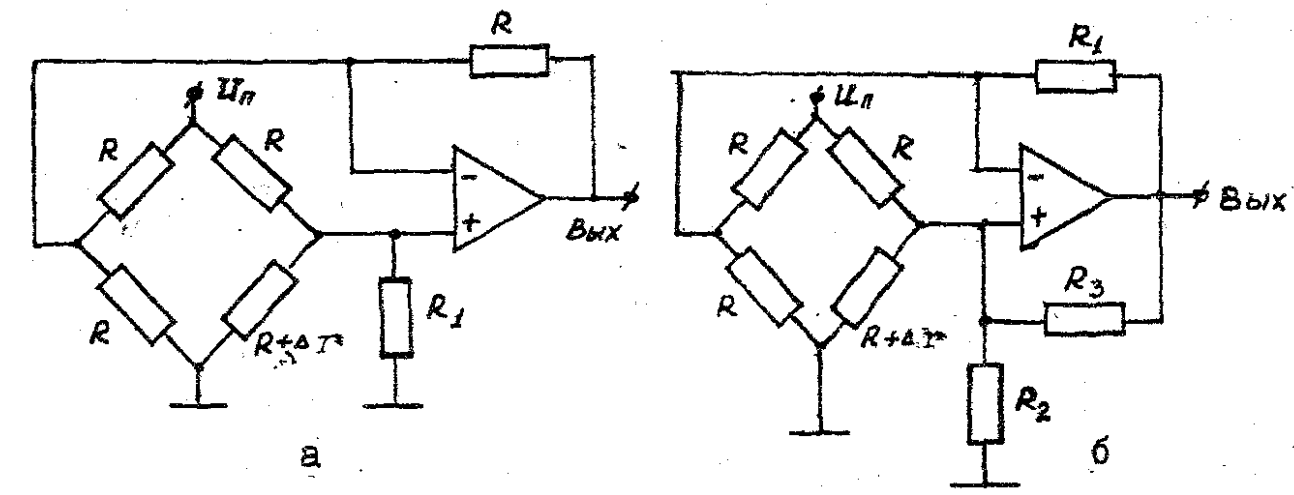
Отметим практически важный случай, когда $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$. При этом $U_{\text{Вых}} = U_2 - U_1$. Полученный результат соответствует ДУ с $K = 1$. Если же необходим усилитель с коэффициентом усиления по напряжению $K > 1$, то в этом случае удобнее всего выбрать $R_1 = R_3$, $R_2 = R_4$. Тогда $K = R_2 / R_1$, а выходное напряжение $U_{\text{Вых}} = (R_2 / R_1) (U_2 - U_1)$.

При использовании ДУ важно выбрать резисторы с малым разбросом реальных значений их сопротивлений относительно номинальных (с точностью 0,1 % или лучше 0,01 %), так как этот выбор влияет на такой параметр усилителя, как коэффициент ослабления синфазного сигнала. Другими словами, разброс значений сопротивлений ведет к тому, что при $U_1 = U_2$ на выходе усилителя установится некоторое $U_{\text{Вых}} \neq 0$, что почти всегда недопустимо. Если же по каким-то причинам точный выбор сопротивлений невозможен, следует предусмотреть в схеме ДУ подстроечные резисторы для вывода его в точку $U_{\text{Вых}} = 0$ при отсутствии входных сигналов.

Мостовой усилитель. Мостовым усилителем называют ДУ, включенный в мостовую схему. Такая схема позволяет преобразовать изменение сопротивления ФЧЭ в напряжение. Выходное напряжение схемы на рис. 11а [5]

$$U_{\text{Вых}} = U_{\text{п}} (R_1 / R) r / [R(2 + R / R_1 + r(1 + R / R_1))].$$

Зависимость $U_{\text{Вых}}$ от r нелинейна, как и для любого неравновесного моста. Поэтому такую схему целесообразно применять при относительно малых относительных приращениях r / R .



В схеме на рис. IIб нелинейность скорректирована за счет введения цепи положительной обратной связи (резистор R_3). Если принять $R_1 = R_2 \parallel R_3$ и $1 + (R/R_2) = 2R_1/R_3$, то

$$U_{\text{Вых}} = U_{\text{п}} R_1 / R_2$$

В схеме на рис. IIв выходное напряжение пропорционально относительному приращению изменяемого резистора:

$$U_{\text{Вых}} = -U_{\text{п}} r / R(R_1 + R)$$

Рис. II. Мостовой усилитель

При нулевом выходном напряжении значения сопротивления на входах ОУ должны быть равны между собой, как для обычного ДУ.

Представленные схемы позволяют синтезировать ФУ на основе практически любого ПИ. Рассмотрим примеры таких ФУ.

3. ВЫБОР СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПИ ВО ВХОДНУЮ ЦЕПЬ ФУ

3.1. Болометры

Болометр – это тепловой приемник излучения, принцип действия которого основан на изменении проводимости материала чувствительного элемента при изменении его температуры.

Конструктивно болометр представляет собой тонкую полоску металла или слоя полупроводника, нанесенного на подложку. Сверху, для лучшего и равномерного поглощения излучения, нанесен слой черни. Это позволяет выравнять спектральную чувствительность приемника, делая его неселективным в пределах рабочего спектрального диапазона. По краям чувствительного элемента нанесены контак-

ты для подключения его в электрическую цепь.

При освещении чувствительного элемента болометра энергия лучистого потока преобразуется в тепловую энергию. Изменение температуры ФЧЭ болометра приводит к изменению его проводимости, а, значит, сопротивления. Для металлов с ростом температуры сопротивление увеличивается, а для полупроводников — уменьшается [2].

Одним из основных параметров материала является температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Для большинства металлов ТКС приблизительно одинаков и составляет $1/300 \text{ K}^{-1}$. Для полупроводников данный параметр примерно на порядок больше ТКС металлов и имеет отрицательное значение: $-3000/T^2 \text{ K}^{-1}$.

Условно различают следующие типы болометров: металлические, полупроводниковые и охлаждаемые. Давая краткую характеристику болометрам, отметим следующее.

Для металлических болометров характерны: невысокая вольтовая чувствительность, низкое сопротивление ФЧЭ (единицы ом), большая инерционность. Полупроводниковые болометры обладают более высоким ТКС, а следовательно, и чувствительностью, высоким сопротивлением (сотни и тысячи ом), меньшей инерционностью.

Охлаждаемые (в том числе и глубокоохлаждаемые) болометры имеют низкое сопротивление (иногда доли ом), высокую чувствительность, невысокую инерционность.

Особенностью тепловых ПИ является то, что они реагируют на изменение температуры, вызванное как падающим оптическим излучением, так и изменением температуры окружающей среды. Это требует специальных мер для устранения влияния температурного фона.

При выборе схемы включения необходимо учитывать перечисленные выше особенности болометров.

Чувствительность болометров к изменению температуры окружающей среды не позволяет использовать для их включения схему простейшего резистивного делителя (см. рис. 1). Изменение сопротивления болометра, вызванное нестабильностью температуры окружающей среды, создаст серьезную помеху для измерения потока оптического излучения. Поэтому болометры содержат два чувствительных элемента, один из которых — рабочий, а второй — компенсационный. Для включения такого приемника применяется мостовая схема включения. Практическая схема включения болометров представлена на рис. 12. Один из болометров (Б1) является рабочим, а второй (Б2) — компенсационным. В данной схеме компоненты подбирают из следующих соображений. Болометры Б1 и Б2 должны иметь максимально оди-

наковые параметры (темновое сопротивление, вольтовую чувствительность). Сопротивления нагрузочных резисторов R_1 и R_2 равны темновым сопротивлениям болометров.

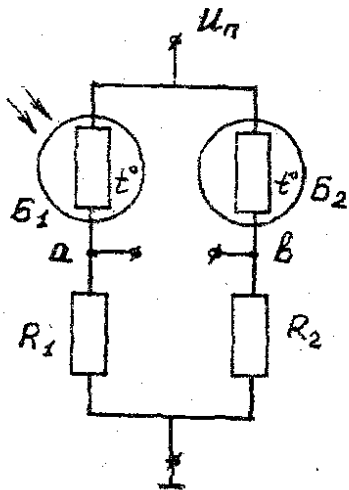


Рис. 12. Мостовая схема включения болометра

При соблюдении указанных условий в исходном (затемненном) состоянии мост сбалансирован и сигнал на выходе равен 0. При изменении температуры окружающей среды сопротивление болометров изменяется. Если их параметры идентичны, то изменения сопротивлений ΔR_{Φ} одинаковы. Потенциалы точек a и b останутся равными и выходной сигнал не изменится ($U_c = 0$).

Облучение рабочего ФЧЭ болометра вызывает дополнительное изменение его сопротивления на величину ΔR_{Φ} .
Выходной сигнал

$$U_{\text{Вых}} = \frac{U_{\text{п}} \cdot \Delta R}{2(2R - 2 \cdot \Delta R_{\Phi} - \Delta R)}$$

Видно, что выходной сигнал зависит от напряжения питания, поэтому вольтовая чувствительность тоже пропорциональна напряжению питания.

По такой схеме обычно включают полупроводниковые болометры. Для включения металлических и охлаждаемых болометров используют модифицированную мостовую схему (рис. 13). Это объясняется

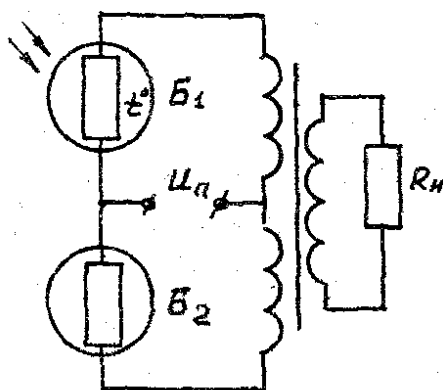


Рис. 13. Мостовая схема включения с трансформаторным выходом

малым сопротивлением таких болометров и сложностью их сопряжения с последующим усилителем.

В трансформаторной мостовой схеме (см. рис. 13) роль нагрузки играют части первичной обмотки трансформатора. Их активное сопротивление (с учетом приведенного сопротивления последующего усилительного каскада) мало, что приблизительно соответствует темновым сопротивлениям болометров B_1 и B_2 .

Питание мостовой схемы (см. рис. 12) осуществляется либо постоянным, либо переменным напряжением с час-

тотой несколько килогерц. Поток излучения модулируют на невысокой частоте (10...100 Гц), что позволяет отказаться от усилителей постоянного тока. Выбор частоты модуляции связан с постоянной времени болометров. Из-за инерционности тепловых процессов постоянная времени болометров составляет единицы миллисекунд. Это и ограничивает частоту модуляции потока излучения (как правило, в диапазоне 10...30 Гц).

При питании мостовой схемы постоянным напряжением усиление сигналов производится на частоте модуляции. При переменном питании сигнал усиливается сначала на одной частоте (питающего напряжения), а после детектирования - на частоте модуляции.

Для включения болометров в электронный тракт используют трансформаторный (для металлических болометров) или бестрансформаторный (для полупроводниковых болометров) каскад на основе дифференциального или мостового усилителей.

3.2. Пироэлектрические приемники излучения

Принцип действия пироэлектрического приемника излучения (ПЭПИ) основан на изменении вектора электрической поляризации кристалла ФЧЭ при тепловом воздействии падающего потока оптического излучения. Данный приемник относится к классу тепловых ПИ, т.е. реагирует на изменение температуры чувствительного элемента. Однако особенности процесса преобразования излучения в электрический сигнал, изложенные в [6], существенно отличают ПЭПИ от других тепловых приемников.

Отличительной особенностью ПЭПИ является их высокое быстродействие. Подбором сопротивления нагрузки можно изменять постоянную времени приемника в широком диапазоне. ПЭПИ не требуют внешнего источника питания, поскольку сами являются источниками ЭДС. Их ФЧЭ могут иметь различную форму и размеры.

Конструктивно ФЧЭ ПЭПИ представляет собой пластинку с двумя электродами, нанесенными на противоположные стороны. Один из электродов покрыт чернью для лучшего поглощения падающего излучения.

В стационарном состоянии пироэлектрический кристалл электрически нейтрален. При освещении зачерненного электрода температура кристалла меняется, и спонтанная поляризация уменьшается. На электродах освобождается часть зарядов, и во внешней цепи, состоящей из резистора нагрузки, подключенного к электродам, начинает протекать электрический ток. Через некоторое время заряды взаимно

компенсируются, и ток станет равен 0. Если поток излучения модулирован по амплитуде, то температура кристалла будет постоянно изменяться, а через сопротивление нагрузки будет протекать переменный ток. Отличительной особенностью ПЭПИ от других тепловых ПИ является то, что у них выходной сигнал зависит от скорости изменения температуры и от среднего ее изменения за период модуляции потока излучения. Эти факторы противоположны, поэтому ПЭПИ имеют равномерную амплитудно-частотную характеристику в диапазоне от 1 до 10^8 Гц, а инерционность ФПУ на основе ПЭПИ зависит от постоянной времени цепи включения

$$\tau_{эл} = R_n \cdot C_{кр}.$$

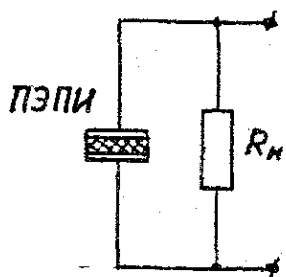
где R_n - сопротивление нагрузки;
 $C_{кр}$ - емкость кристалла пироэлектрика.

Спектральная характеристика ПЭПИ определяется не столько свойствами кристалла, сколько пропусканием входного окна и свойствами черни. Спектральная характеристика чувствительности пироэлектрического кристалла имеет неравномерность не более 7 % в диапазоне длин волн 0,5...25 мкм.

В качестве материалов чувствительного элемента ПЭПИ используются пироактивные кристаллы триглицинсульфата (ТГС), титанат бария, цирконат-титанат свинца (ЦТС), танталат и ниобат лития и т.д. Пироэлектрические параметры этих материалов приведены в [6].

Возможность создания чувствительных элементов ПЭПИ любой формы позволяет разрабатывать уникальные ПИ. Известны [6] ПЭПИ: самокалибрующиеся, полного поглощения, приемники для регистрации интенсивных потоков излучения. Если чувствительный элемент имеет форму конуса или замкнутой полости, то коэффициент поглощения может достигать 0,99. Такие приемники используют для измерения излучения в качестве эталонных ПИ.

Схема включения ПЭПИ в электрическую цепь показана на рис. 14.



Особенностью ПЭПИ является большое сопротивление, поэтому сопротивление нагрузки должно составлять сотни мегаом, а иногда десятки гигаом. Это требует применения в первых каскадах предусилителей полевых транзисторов или операционных усилителей с высоким входным сопротивлением.

Выбор сопротивления нагрузки выполняется с учетом двух противоречивых требований. Для

Рис. 14. Схема включения ПЭПИ

увеличения входного электрического сигнала выгодно выбирать сопротивление R_n максимально большим. Однако, с другой стороны, для обеспечения высокого быстродействия R_n надо уменьшать.

С точки зрения схемотехники электронных каскадов, имеющих в качестве источника сигнала пироэлектрический приемник излучения, обладающий высоким внутренним сопротивлением, следует применять схемы неинвертирующего усилителя на основе ОУ с учетом того, что полезный сигнал для такого усилителя является переменным на частоте модуляции лучистого потока.

3.3. Фотоэлектронные умножители

1649274

Принцип действия ФЭУ основан на внешнем фотоэффекте [2]. Под действием потока излучения фотокатод испускает электроны, которые под действием управляющего электрического поля поступают в систему вторичной электронной эмиссии. В этой системе происходит усиление начального фототока, обусловленного чувствительностью фотокатода к принимаемому потоку излучения, после чего электронный поток падает на анод ФЭУ, и через сопротивление нагрузки R_n , связывающее анод с "землей", протекает электрический ток. Значение этого тока пропорционально фототоку катода, но в 10^6 раз и более превышает его.

Система вторичной электронной эмиссии представляет собой усилитель тока, в котором нарастание числа электронов связано с процессом эмиссии свободных электронов из специальных электродов-эмиттеров, или динодов, под действием начального потока фотоэлектронов, падающих на эти электроды. Процесс этот носит лавинный характер за счет большого числа соударений электронов с элементами системы вторичной эмиссии (10 и более раз). Среднее значение коэффициента вторичной эмиссии (отношение числа испускаемых электронов к числу электронов, падающих на динод) около 4 [7]. Конструктивно система вторичной эмиссии может быть исполнена в нескольких вариантах, но на практике наиболее часто встречается система с электростатической фокусировкой электронных пучков [7]. Площадь фотокатода ФЭУ обычно значительно больше площади первого эмиттера. Поэтому для сбора фотоэлектронов на первый эмиттер применяют специальный фокусирующий электрод. Коэффициент сбора электронов на первый эмиттер в современных ФЭУ близок к 1, для динодов этот коэффициент лежит в пределах 0,7...0,95. В зависимости от числа динодов, значения ускоряющего напряжения и конструктивных особенностей ФЭУ коэффициент усиления фототока в ФЭУ $M = 10^6$ и более [8].

ВИСЛИСТКА
ЧИТАТЕЛЬСКИЙ ЗАВ

17
ВИСЛИСТКА

Каждый ФЭУ имеет паспортные параметры и характеристики: спектральную характеристику чувствительности фотокатода, рабочее напряжение, темновой ток фотокатода, а также рекомендуемую схему включения ФЭУ и делителя рабочего напряжения для диодной системы и соотношение значений сопротивлений этого делителя [8]. Напряжение питания ФЭУ достигает 1 кВ и более, поэтому положительный полюс источника питания "заземляют", а отрицательный подключается к фотокатоду. Это необходимо для того, чтобы сопротивление R_H имело нулевой потенциал относительно "земли" (рис. 15).

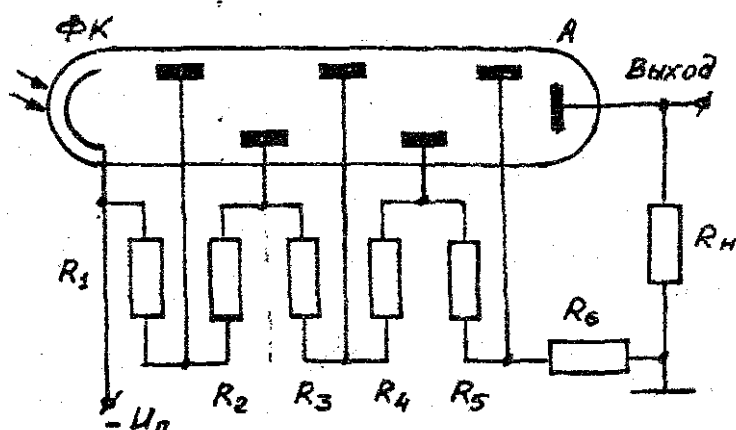


Рис. 15. Схема включения ФЭУ

Расчет схемы включения ФЭУ заключается, во-первых, в выборе значений сопротивлений R_i делителя напряжения питания U_n для диодов и, во-вторых, в определении сопротивления нагрузки R_H в цепи анода. Для нахождения конкретных значений R_i пользуются следующим правилом: общее сопротивление делителя $R = R_i$ должно быть таким, чтобы постоянный ток делителя $I_d = U_n / R$ превышал максимальное расчетное значение фототока ФЭУ $I_{\Phi \max} = S_{i a} \Phi_{\max}$ в анодной цепи не менее чем в 100 раз. Здесь $S_{i a}$ - интегральная анодная токовая чувствительность ФЭУ, рассчитанная применительно к рабочим условиям [1], Φ_{\max} - максимальное расчетное значение потока излучения, падающего на ФЭУ. Условие $I_d > I_{\Phi \max}$ необходимо выполнять всегда, поскольку оно влияет на точность соблюдения линейности энергетической характеристики ФЭУ: чем выше требования к линейности энергетической характеристики, тем больше должен быть ток I_d по сравнению с $I_{\Phi \max}$. Практическая оценка возможного относительного отклонения энергетической характеристики от расчетной - это величина $I_{\Phi \max} / I_d$.

После нахождения R_i и I_d необходимо определить значение рассеиваемой электрической мощности для резисторов делителя $P_i = I_d U_i$, где U_i - падение напряжения на i -м резисторе. Ошиб-

ка в выборе R_z приводит к перегреву резисторов делителя, увеличению их сопротивлений из-за положительного температурного коэффициента сопротивления (ТКС) и, как следствие, к неучтенному уменьшению I_d и изменению основных расчетных параметров схемы включения ФЭУ.

Сопротивление нагрузки R_n включается параллельно делителю напряжения, а ток в этом сопротивлении целиком зависит от чувствительности ФЭУ и потока излучения. Полный ток в сопротивлении нагрузки $I = I_{та} + I_{\phi}$, где $I_{та}$ - темновой анодный ток ФЭУ. Величина R_n выбирается такой, чтобы диапазон изменения напряжения фотосигнала ФЭУ $U_{\phi} = I_{\phi} R_n$ удовлетворял требованиям, предъявляемым согласующим каскадом электронного тракта. Схема включения может быть создана на основе инвертирующего усилителя, где $R_1 = R_n$, как и для ФД.

Примечание. Применительно к вакуумным фотоэлементам порядок выбора R_n сохраняется, а расчет схемы делителя напряжения не нужен.

3.4. Фоторезисторы

Фоторезистором (ФР) называется ПИ, принцип действия которого основан на эффекте фотопроводимости. Под действием потока излучения вследствие внутреннего фотоэффекта у ФР меняется сопротивление.

В отличие от болометров в фоторезисторах поглощение излучения приводит к увеличению числа свободных носителей заряда - фотоносителей. Это приводит к уменьшению сопротивления. Более подробно механизм изменения фотопроводимости изложен в [2].

Конструктивно фоторезисторы представляют собой пленку или пластинку фоточувствительного полупроводникового материала, нанесенного на диэлектрическую подложку. Для подключения ФР в электрическую цепь по краям нанесены два невыпрямляющихся контакта. ФР неполярны, т.е. они проводят ток в любом направлении, поэтому их можно питать как постоянным, так и переменным напряжением.

Тип полупроводникового материала определяет спектральную характеристику чувствительности фоторезистора. В настоящее время ФР обеспечивают детектирование излучения в диапазоне от 0,3 до 50 мкм. Спектральные характеристики чувствительности разных материалов приведены в справочной литературе [1,8].

ФР характеризуются значением темнового сопротивления R_T , а также совокупностью параметров, определяющих поведение приемника при оговоренных (паспортных) условиях его применения. К этим

параметрам относятся [8]:

общий ток при заданных освещенности от эталонного излучателя и рабочем напряжении питания;

отношение R_T / R_{CB} , где R_{CB} - сопротивление ФР при заданном уровне освещенности от эталонного излучателя;

вольтовая чувствительность ФР к излучению эталонного излучателя.

Первые два параметра совместно с R_T позволяют рассчитать интегральную вольтовую чувствительность ФР в паспортных условиях, а затем - рабочую интегральную чувствительность ФР [1, 2]. Стандартным условием для измерения паспортных параметров и характеристик ФР является его включение в цепь, состоящую из (кроме ФР) сопротивления нагрузки R_H , причем $R_T = R_H$. Отметим, что в большинстве встречающихся на практике схем включения ФР сопротивление нагрузки выбирается близким к R_T . Это связано с тем, что ФР обычно работает на линейном участке своей люкс-омической характеристики, где его световое сопротивление близко к R_T [2, 9]. Поэтому рекомендации по выбору R_H можно сформулировать так:

1) если в рабочих условиях поток фонового излучения пренебрежимо мал по сравнению с полезным потоком излучения, следует выбирать $R_H = R_T$;

2) если фоновым излучением пренебречь нельзя, R_H можно выбрать равным значению сопротивления фоторезистора при средней по расчетам фоновой освещенности.

Наиболее распространенной схемой включения ФР является схема делителя напряжения (рис. 16). Выходной сигнал в такой схеме

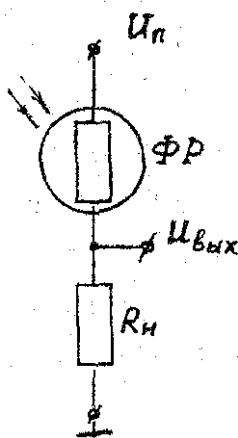


Рис. 16. Схема включения фоторезистора

зависит от приложенного напряжения питания. Интегральная вольтовая чувствительность является функцией напряжения питания и сопротивления нагрузки.

При измерении потоков излучения, изменяющихся в широких пределах, удобно использовать мостовую схему (см. рис. 2). Предварительно мост балансируют так, чтобы ток, протекающий через R_H , был равен 0. При освещении ФР полезным потоком излучения мост разбалансируется. Изменяя сопротивление одного из плеч моста, добиваются нового состояния равновесия. О величине потока излучения судят по изменению регулировочного сопротив-

ления. Такой компенсационный способ позволяет проводить более точные фотометрические измерения, чем при контроле изменения электрического тока непосредственно в R_{Φ} .

При необходимости регистрации малых полезных потоков в условиях больших фоновых засветок используют дифференциальную схему (рис. 17) с двумя фоторезисторами. Один из них облучается суммарным потоком полезного и фонового излучения, а второй — только фоновым. На сопротивлении нагрузки фоновые составляющие сигнала взаимно компенсируются и останется только полезный сигнал.

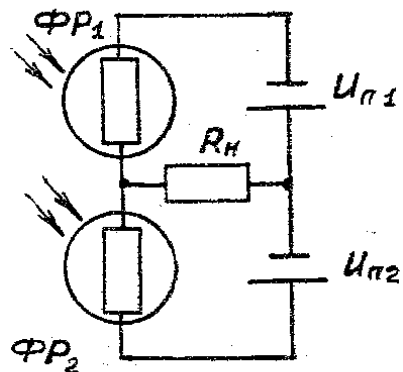


Рис. 17. Дифференциальная схема

Трансформаторная схема включения ФР позволяет получить выигрыш в чувствительности по напряжению за счет того, что к ПИ подводится почти все напряжение питания. Падением напряжения на первичной обмотке трансформатора можно пренебречь. Сопротивление нагрузки разобщено с цепью питания ФР, и его изменение не сказывается на режиме работы ФР. Кроме того, постоянный ток от фона не влияет на напряжение сигнала, снимаемое с нагрузки.

Схемы включения с ФР могут работать как с постоянным, так и с переменным напряжением питания. Во втором случае частота питающего напряжения намного превышает частоту модуляции потока излучения. Выходной сигнал сначала усиливают на частоте питающего напряжения, а после детектирования — на частоте модуляции.

Расчет статического выходного напряжения сигнала, снимаемого с сопротивления нагрузки в схеме делителя напряжения (см. рис. 16), можно провести по формуле

$$U_{\text{Вых}} = S_U \cdot \Phi \quad (2)$$

Если интегральная вольтовая чувствительность не задана, а известна кратность K , то необходимо получить зависимость между K и S_U .

Пусть при падении на фоторезистор потока Φ его темновое сопротивление меняется на величину ΔR . Кратность K составит:

$$K = \frac{R_T}{R_T - \Delta R} \quad \text{Запишем выражение для напряжения фотосигнала}$$

$$U_c = U_n \cdot R_n \left(\frac{1}{2R_T - \Delta R} - \frac{1}{2R_T} \right) = \frac{U_n}{2} \cdot \frac{\Delta R}{2R_T - \Delta R}$$

Выражение для интегральной вольтовой чувствительности имеет вид

$$S_U = \frac{U_c}{\Phi} = \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \cdot \frac{U_n}{2\Phi}$$

Для расчета напряжения фотосигнала далее может использоваться формула (2).

Для включения ФР в электронный тракт можно применять схемы инвертирующего усилителя, в которых резистор R_1 включен последовательно ФР или R_n (в зависимости от последовательности их включения от источника питающего напряжения). Таким образом, в расчете цепи включения ФР участвуют три резистора: ФР, R_n и R_1 .

Примечание. Наряду с универсальными ОУ промышленностью выпускаются специализированные интегральные усилители, предназначенные для работы с низкоомными (до 1 кОм) датчиками, в том числе и фоторезисторами. Например, малозумящий интегральный предварительный усилитель К538УНЗ.

3.5. Фотодиоды

Фотодиод - это приемник излучения, принцип действия которого основан на явлении внутреннего фотоэффекта - фотогальваническом эффекте. Сущность данного эффекта заключается в возникновении фотоЭДС вследствие разделения пар носителей заряда противоположного знака, появляющихся в веществе при поглощении света. Разделение происходит в зоне действия контактного электрического поля. Такое поле возникает в неоднородном полупроводнике ($p-n$ -переход, контактный переход - "металл - полупроводник" и т.д.).

При подключении к фотодиоду резистора в цепи начинает протекать электрический ток. Этот ток состоит из двух составляющих: темнового и фототока. Первый возникает даже при отсутствии облучения, второй - только при освещении излучением определенного спектрального состава. Фототок обусловлен потоком неосновных носителей в полупроводнике.

Фотодиоды являются селективными приемниками излучения, т.е. избирательно реагируют на излучение разного спектрального состава. Как и для ФР, им свойственна граничная длина волны. ФД реагируют на излучение с длиной волны меньше граничной. Спектральная чувствительность фотодиодов определяется типом полупроводникового материала (шириной запрещенной зоны полупроводника).

Более подробно описание принципа действия ФД приведено, например, в [2].

Различают два режима работы ФД: фотогальванический и фотодиодный. Первый характеризуется отсутствием внешнего источника питания; ФД сам является источником фотоЭДС. Во втором режиме ФД включается в цепь, состоящую из последовательно включенных внешнего источника питания, смещающего $p-n$ -переход ФД в обратном направлении, фотодиода и сопротивления нагрузки. Рассмотрим основные свойства ФД в этих режимах работы.

Фотогальванический режим. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) ФД в этом случае представляется в виде

$$I = I_{\Phi} - I_{\text{нас}} \left[\exp(eU/bkT) - 1 \right],$$

где $I_{\Phi} = S \cdot \Phi$ - фототок (S - интегральная токовая чувствительность ФД, Φ - интегральный поток излучения, падающий на ФД);

k - постоянная Больцмана;

U - фотоЭДС;

e - заряд электрона;

T - абсолютная температура;

$b = 1 \dots 2$; коэффициент $b = 1$ для идеального $p-n$ -перехода и барьера Шоттки, в которых ток определяется только диффузией основных носителей; если в фототок вносят вклад также генерация и рекомбинация носителей в области пространственного заряда $p-n$ -перехода, то $1 < b < 2$.

Темновое сопротивление $p-n$ -перехода при нулевом смещении $R_d = bkT/eI_{\text{нас}}$. Типовое значение $R_d = 2,5 \dots 50$ кОм. При освещении ФД сопротивление R_d уменьшается и может быть определено с помощью ВАХ для конкретного значения потока излучения, падающего на ФД. При облучении ФД значение R_d достигает сотен и десятков Ом. Это обстоятельство позволяет назвать ФД в фотогальваническом режиме приемником излучения с малым внутренним сопротивлением.

Известное достоинство ФД в таком режиме включения - отсутствие темнового тока и, как следствие, более низкий уровень собственного шума, чем в фотодиодном режиме, для которого характерно наличие заметного темнового тока. Недостатком же является нелинейность энергетической характеристики - зависимости напряжения сигнала на сопротивлении нагрузки от освещенности ФЧЭ приемника, причем тем большая, чем больше сопротивление нагрузки ФД. Идеальной схемой включения ФД в фотогальваническом режиме по этой причине является схема с очень малым значением входного сопротивления, например преобразователь "ток - напряжение" на ос-

нове ОУ при $R_1 = 0$. Именно такая схема обеспечивает линейную энергетическую характеристику ФПУ на основе ФД в фотогальваническом режиме. Можно использовать схему инвертирующего усилителя с $R_1 = 0$ либо дифференциальный усилитель с $R_1 = R_3 = 0$, которые реализуют функцию преобразования "ток - напряжение" с высокой точностью. Если же интерес представляет зависимость фотоЭДС ФД от освещенности, то можно применить неинвертирующий усилитель, обладающий высоким значением входного сопротивления. Необходимо помнить, что в этом случае выходной сигнал от освещенности зависит нелинейно (логарифмическая зависимость).

Фотодиодный режим. ВАХ ФД в этом случае описывают уравнением

$$I = I_{\Phi} - I_{нас} \{ \exp [e(U - U_D) / kT] - 1 \},$$

где U_D - напряжение внешнего источника питания, падающее на ФД; U - фотоЭДС. Достоинство этого режима заключается в том, что с сопротивления нагрузки ФД можно снимать напряжение сигнала, значение которого может быть любым (вплоть до значения напряжения питания цепи включения ФД) без дополнительного усиления. В таком режиме включения ФД по сути является элементом, определяющим общий ток в нагрузке в зависимости только от уровня освещенности и практически независимо от питающего напряжения. Это обстоятельство позволяет считать ФД, во-первых, некритичным к напряжению питания и, во-вторых, источником сигнала с очень большим внутренним сопротивлением (теоретически его можно считать бесконечно большим). Эти выводы справедливы начиная с такого напряжения питания, при котором ФД переходит в область насыщения своей ВАХ. Практически это напряжение не превышает 0,5 В.

Выбор сопротивления R_n производят таким образом, чтобы при известном (заданном или рассчитанном) максимальном значении суммарного (фонового и полезного) потока излучения в рабочих условиях напряжение сигнала, снимаемого с R_n , было близко к напряжению питания цепи "ФД - R_n ". Максимальное значение R_n определяется формулой

$$R_{n \max} = U_n / (I_T + S \Phi_{\max}),$$

где I_T - темновой ток ФД (справочный параметр); S - интегральная токовая чувствительность ФД в рабочих условиях (расчетный параметр); Φ_{\max} - максимальное значение суммарного потока излу-

чения, падающего на ФЧЭ ФД (параметр задается в техническом задании либо определяется в ходе энергетического расчета проектируемого ОЭП). Значение I_T обычно приводится в справочных данных [8], однако можно использовать и уравнение ВАХ для его оценки с учетом того, что при $U_d > 50$ мВ $I_T = I_{нас}$.

Практически удобным и наглядным методом расчета сопротивления нагрузки $R_{нmax}$ является графоаналитический метод с использованием ВАХ ФД. ВАХ может быть построена после нахождения интегральной токовой чувствительности ФД применительно к рабочему источнику излучения [1]. Для определения $R_{нmax}$ на ВАХ строится нагрузочная прямая, которая проходит через две характерные точки, соответствующие холостому ходу и короткому замыканию в цепи "ФД - R_n "; в первом случае $R_n \rightarrow \infty$, во втором $R_n = 0$.

Первая точка находится на оси "Напряжение" и соответствует выбранному рабочему напряжению питания U_n , подаваемому на цепь "ФД - R_n ". Это напряжение выбирают исходя из того, что при максимальном значении потока излучения, принимаемого ФД, напряжение фотосигнала, снимаемого с R_n , будет примерно равно U_n . Это максимальный входной сигнал для электронного тракта, работающего с данным ПИ, что и следует иметь в виду в дальнейшем расчете первого каскада этого тракта. Наименьшее значение напряжения фотосигнала, снимаемого с R_n , равно $U_T = R_n I_T$. Напряжение питания U_n не должно превышать предельного значения для данного ФД, указанного в справочнике [8].

Вторая характерная точка может быть найдена на оси "Фототок", но обычно ее находят на ветви $I_\Phi(\Phi_{max})$ ВАХ как точку вблизи начала области насыщения фототока ФД. Она соответствует напряжению на диоде порядка 50 мВ.

Полученная таким образом нагрузочная прямая (рис. 18) позволяет довольно точно оценить напряжение фотосигнала, снимаемого с R_n , при любом значении потока излучения в диапазоне от $\Phi = 0$ до $\Phi = \Phi_{max}$. Например, потоку Φ_2 на R_n соответствует напряжение $U_n = U_c + U_T$, где $U_c = I_\Phi R_n = S_{раб} \Phi_2 R_n$, а U_d (см. рис. 18) - остаточное падение напряжения на ФД.

После определения R_n можно перейти к выбору схемы электронного каскада, работающего с данным ФД, причем следует иметь в виду, что максимальный входной сигнал для этого каскада примерно равен U_n ФД. Во многих случаях этого достаточно для рассчитываемого ФПУ и речь может идти о расчете не согласующего или усилительного каскада, а о других функциональных каскадах (например, уже

можно осуществлять аналого-цифровое преобразование выходного сигнала). Вместе с тем сопротивление R_H ФД может соответствовать сопротивлению R_1 инвертирующего усилителя на основе ОУ.

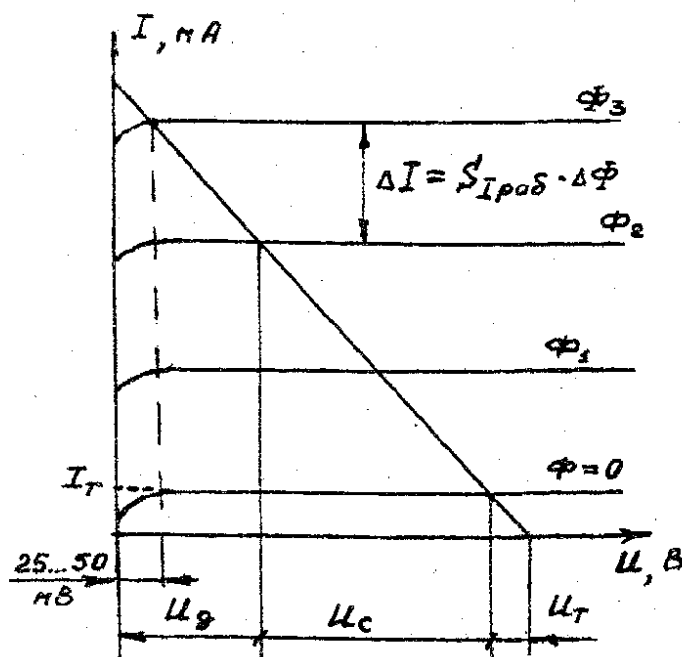


Рис. 18. Графоаналитический расчет режима включения ФД

Примечание. Если по каким-либо причинам поток излучения превысит Φ_{max} , то это не приведет к изменению напряжения на R_H , которое при любых $\Phi > \Phi_{max}$ останется примерно равным U_n , т.е. данное ФПУ, в котором установлено R_{Hmax} , не позволяет измерять потоки излучения свыше Φ_{max} .

Особенности включения лавинных ФД. Принцип действия лавинного ФД (ЛФД) требует очень точно поддерживать рабочее напряжение питания на диоде. Это требование связано с высокой крутизной ВАХ ЛФД в рабочей области. Ограничиться стабилизацией внешнего источника питания нельзя, поскольку сам ЛФД чувствителен к температуре окружающей среды. По этой причине цепь включения ЛФД обычно содержит термокомпенсационные элементы (термисторы), которые автоматически меняют параметры цепи включения ЛФД в зависимости от температуры. На рис. 19 приведен пример включения приемника ЛФД-2 в состав фотоприемного устройства ЛФДП-3. Рассмотрим особенности этой схемы.

Напряжение питания +30 В подается на приемник излучения через термостабилизированную цепь. Два последовательно включенных стабилитрона Д814Д обеспечивают в своей цепи ток 5 мА и первично стабилизированное напряжение 24 В. Температурный коэффициент напряжения стабилизации для Д814Д составляет не более чем 0,095 %/К. Напряжение 24 В поддерживается на резисторном делителе. Резисторный делитель напряжения содержит два термочувствительных элемен-

та, обеспечивающих дополнительную термостабилизацию цепи питания фотодиода. Напряжение, которое снимается с потенциометра и подается на ЛФД, поддерживается с точностью не менее чем 0,01 %/К. С учетом значений сопротивлений делителя значение этого напряжения составляет 17 В. Отметим, что ЛФД-2 допускает установку рабочего напряжения от 16 до 25 В при сопротивлении нагрузки 1 кОм [8]. Фотодиод нагружен на две параллельно соединенные цепи: сопротивление 2,2 кОм и цепь "330 Ом - ДЗ11 - 75 Ом".

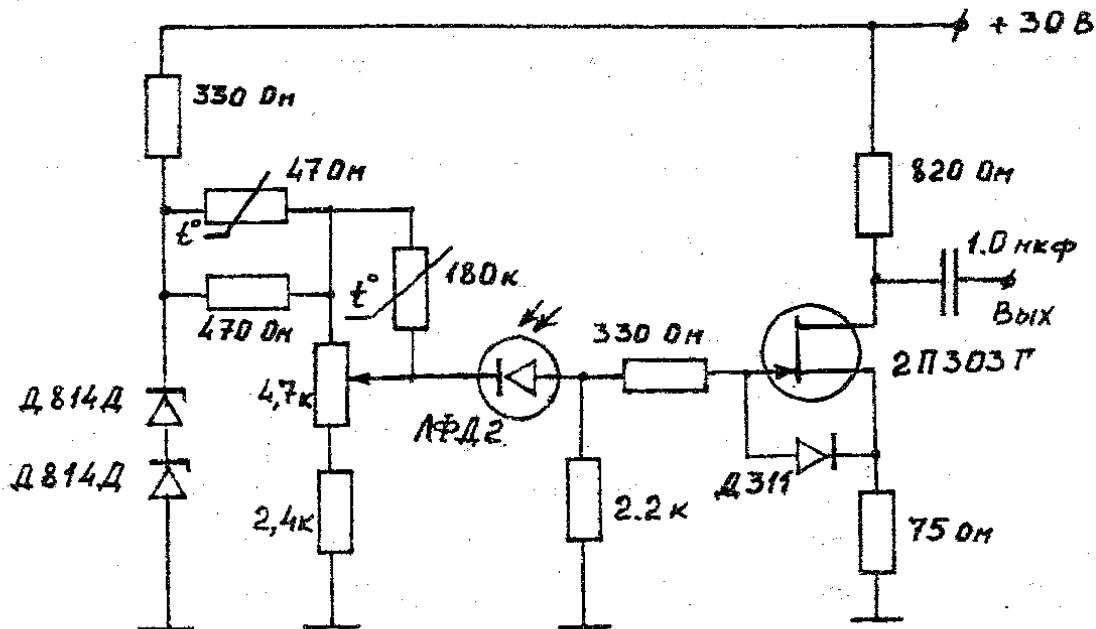


Рис. 19. Схема включения лавинного ФД

Сопротивление импульсного диода ДЗ11 при отсутствии напряжения смещения составляет 2,5 кОм, как и для $p-n$ -перехода фотодиодов. Таким образом, общее сопротивление нагрузки фотодиода ЛФД-2 составляет, как это и требуется, примерно 1 кОм. Полевой транзистор имеет высокое входное сопротивление, которое не влияет на параметры нагрузки фотодиода.

4. ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ПЕРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

4.1. Периодически модулированные потоки излучения

В подавляющем большинстве случаев ФПУ работают с переменным во времени потоком излучения. Это позволяет использовать усилители переменного тока, свободные от многих известных недостатков электронных трактов постоянного тока.

Рассмотрим структурную схему фотоэлектрического устройства (рис. 20) для регистрации падающего потока излучения. Падающий поток прерывается модулятором

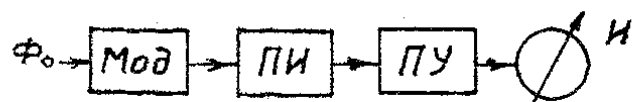


Рис. 20. Схема тракта ОЭП

и воспринимается приемником излучения ПИ. После преобразования в электронном тракте (ЭТ) отображается на стрелочном индикаторе И.

Для прерывания потока излучения используются различные модуляторы: механические, электромеханические и т.д. Наиболее простыми являются модуляторы в виде диска с отверстиями, при вращении которого возникает непрерывная модуляция потока. Закон модуляции во многом зависит от размеров и формы отверстий и сечения пучка лучей в плоскости модулятора.

Оптимальным законом модуляции для регистрации и расчета сигнала можно считать синусоидальную зависимость потока во времени, так как паспортные данные ПИ приводятся для этих условий.

Точно воспроизвести синусоидальный закон механическим модулятором практически невозможно. Наибольшее соответствие наблюдается при ширине прорези модулятора, равной диаметру сечения пучка лучей (рис. 21). При иных соотношениях форма сигнала меняется от треугольной до прямоугольной.

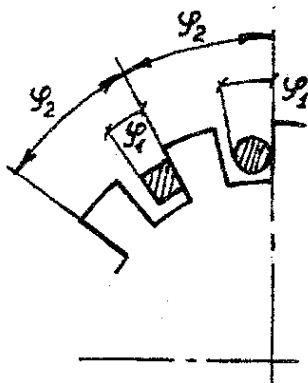


Рис. 21. Сечение пучка лучей модулятором

Электронный тракт выполнен в виде резонансного усилителя, настроенного на частоту модуляции. Из периодического сигнала, поступающего с приемника, на выходе усилителя выделяется первая гармоника.

Регистрация переменного гармонического сигнала выполняется индикатором. Как правило, индикатор является квадратичным детектором, т.е. он показывает эффективное (среднеквадратическое) значение периодического сигнала. Для синусоиды взаимосвязь амплитудного значения и эффективного определяется зависи-

мостью $U_{эф} = U_{\alpha} / \sqrt{2}$.

Из изложенного следует, что для правильного расчета сигнала необходимо знать среднеквадратическое значение первой гармоники переменного потока излучения. Взаимосвязь немодулированного потока Φ_0 с эффективным значением первой гармоники Φ_1 определяется через коэффициент, называемый коэффициентом формы модуляции β . Он показывает, какую долю составляет среднеквадратическое значение первой гармоники Φ_1 от Φ_0 : $\Phi_1 = \beta \Phi_0$.

При синусоидальной модуляции коэффициент $\beta = 0,3535$, а при прямоугольной $\beta = 0,45$. Если известен аналитический закон модуляции излучения, то для определения β нужно разложить его в

ряд Фурье и найти коэффициент первой гармоники.

При сложной форме модулирующих импульсов расчет затруднен. Существуют методики непосредственного измерения этого коэффициента [10]. В том случае, если известно соотношение размеров модулятора и сечения пучка (см. рис. 21), то коэффициент формы модуляции можно найти по табл. I. Определив коэффициент формы модуляции, расчет среднеквадратического значения сигнала выполняют по формуле

$$U_c = \beta U_0 = \beta \Phi_0 S_U^{np},$$

где S_U^{np} - интегральная приборная чувствительность.

Таблица I

φ_1 / φ_2	β	
	○	□
0	0,45	0,45
0,05	0,449	0,448
0,08	0,446	0,445
0,1	0,444	0,442
0,15	0,438	0,433
0,2	0,428	0,421
0,25	0,416	0,405
0,3	0,402	0,386
0,35	0,385	0,365
0,4	0,367	0,341
0,45	0,347	0,314
0,5	0,325	0,286

Примечание: ○, □ - форма отверстий на диске модулятора.

Изложенное выше верно в том случае, если частота модуляции не высока, т.е. когда можно не учитывать инерционные свойства приемника излучения. Если частота модуляции большая (выше граничной частоты $f_{гр}$ для данного ПИ), то начинает сказываться инерционность приемника. Это выражается в снижении реальной чувствительности приемника, в затягивании переходных процессов и т.д.

При гармонической модуляции потока излучения зависимость чувствительности ПИ от частоты (частотную характеристику) принято описывать зависимостью

$$S(f) = S(0) \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi \cdot f_0 \cdot \tau)^2}}$$

где $S(0)$ - чувствительность ПИ на частоте $f = 0$ Гц;

f_0 - предельная частота; τ - постоянная времени ПИ.

Для расширения полосы пропускания фотоприемных устройств с фоторезисторами используется специальная частотная коррекция. На рис. 22а дана схема дифференцирующей цепи.

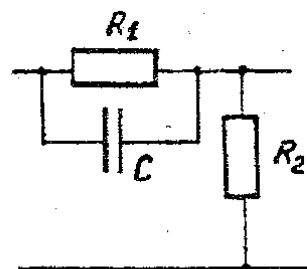
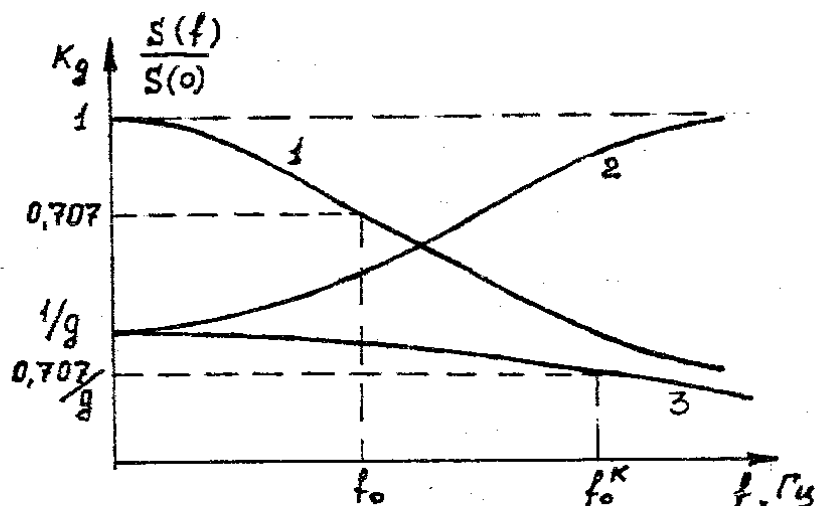


Рис. 22. Частотная коррекция ФР

Постоянная времени верхнего плеча корректирующей цепи частотной характеристики $\tau_k = C \cdot R$. На рис. 22б представлены относительная частотная характеристика ФР и коэффициент передачи K_d цепи коррекции. Результирующая характеристика системы ФР - усилитель - кривая 3. Видно, что спад результирующей кривой до уровня 0,707 наблюдается на частоте $f_k > f_{пр}$. Верхняя граничная частота устройства составит

$$f_0^k = f(R_1 + R_2) / R_2 = q \cdot f_0,$$

а постоянная времени $\tau^k = \tau / q$; $q = (R_1 + R_2) / R_2$.

Расширение полосы пропускания в q раз уменьшает коэффициент передачи во столько же раз. Однако это легко скомпенсировать дополнительным усилением.

Введение корректирующей цепочки увеличивает уровень шума системы из-за расширения полосы пропускания тракта, поэтому ее целесообразно ставить в конечных каскадах усилителя.

4.2. Импульсное излучение

Облучение приемника может производиться отдельными импульсами или их последовательностью.

При воздействии одиночного импульса с длительностью меньше времени установления (рис. 23) на выходе ПИ формируется фотосигнал в виде импульса. Для описания закона изменения фототоклика часто используют зависимость типа

$$I_{\Phi} = S_I (1 + e^{-t'/\tau}) \Phi, \quad (3)$$

где S_I - токовая чувствительность ПИ;

t' - время, отсчитанное от переднего фронта импульса.

За время действия импульса фотосигнал не достигает своего максимального значения. Он нарастает до значения I_{Φ_0} , которое зависит от соотношения между постоянной времени и длительности импульса.

После прекращения облучения фотосигнал убывает от достигнутого значения до нуля:

$$I_{\Phi} = I_{\Phi_0} e^{-t''/\tau}, \quad (4)$$

где t'' - время, отсчитанное от заднего фронта импульса потока.

Видно, что в данном случае искажается форма импульса и уменьшается амплитуда.

Если последовательность импульсов имеет большую скважность (отношение периода повторения к длительности импульса), то сигнал на выходе ПИ практически теряется (рис. 24). Не регистрируется ни форма, ни среднее значение. Инерционный приемник не пригоден для регистрации одиночных импульсов или их последовательностей с большой скважностью.

В том случае, если постоянная времени приемника меньше длительности импульса, то фотосигнал успевает достигнуть максимума (рис. 25). Информация, заключенная в длительности импульсов потока или в периоде повторения, сохраняется в импульсах фотосигнала.

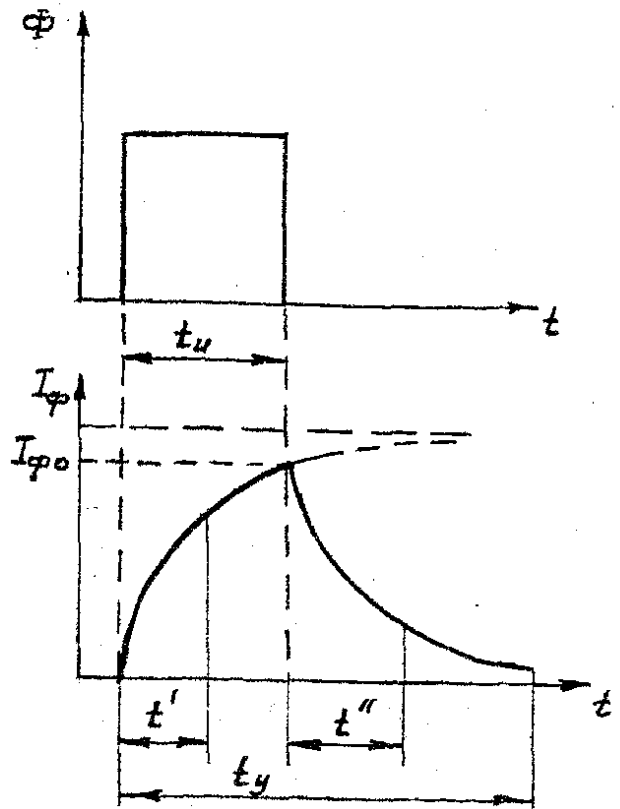


Рис. 23. Импульсный сигнал при $t_u < t_y$

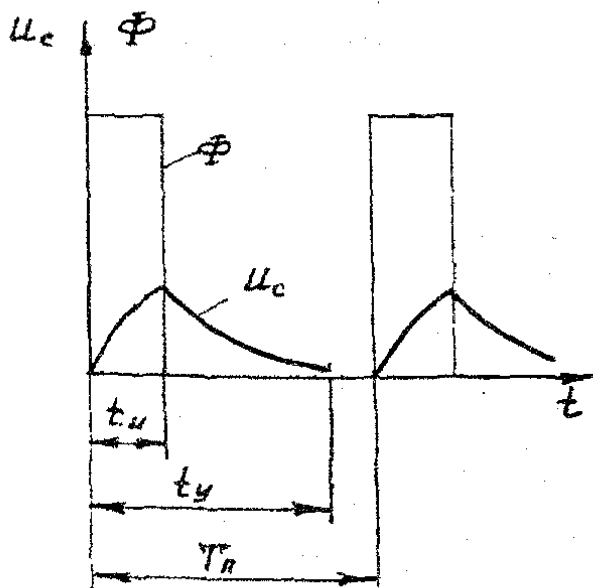


Рис. 24. Импульсный сигнал при $t_y \gg t_u$, $t_y \ll T_n$

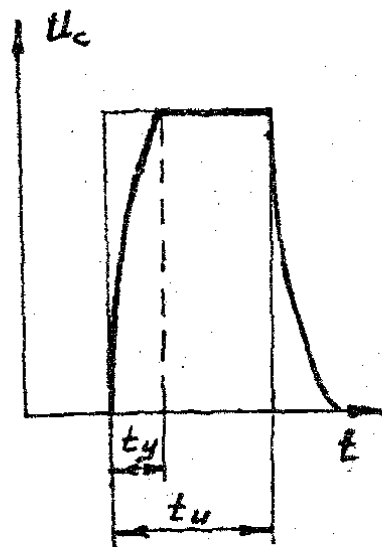


Рис. 25. Импульсный сигнал при $t_y < t_u$

Рассмотрим воздействие на приемник последовательности коротких импульсов потока с длительностью и периодом меньше постоянной времени ПИ: $\tau \gg \tau_n$, $\tau \gg T_n$ (рис. 26).

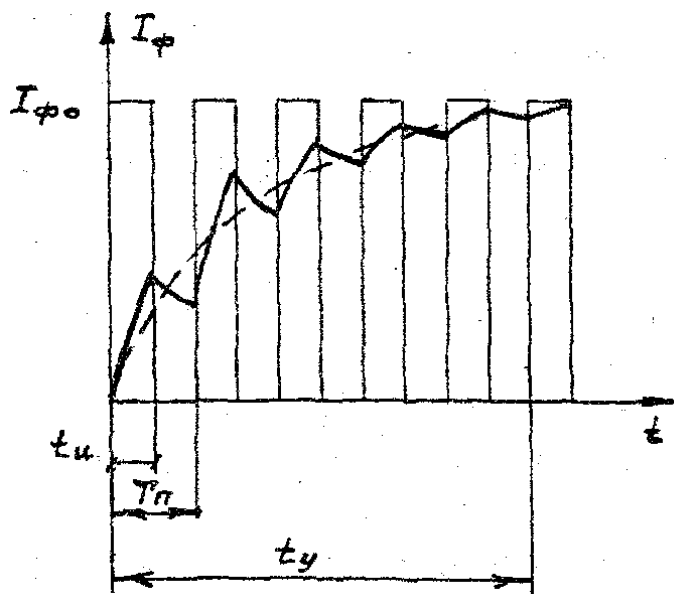


Рис. 26. Регистрация пачки импульсов

Согласно формуле (3), скорость нарастания

$$\frac{dI'_\varphi}{dt} = - \frac{S_I \cdot \Phi}{\tau} e^{-t'/\tau}, \quad (5)$$

а по формуле (4) скорость спада фотосигнала

$$\frac{dI''_\varphi}{dt} = - \frac{I_{\varphi 0}}{\tau} e^{-t''/\tau} \quad (6)$$

Учитывая, что при постоянной времени $\tau \gg t_n$ и $\tau \gg T_n$ значения

$$e^{-t_n/\tau} \approx 1, \quad e^{-T_n/\tau} \approx 1,$$

из (5) и (6) получим приближенные значения скоростей нарастания и спада фотосигнала

$$v_1 = \frac{dI'}{dt} \approx S \cdot \frac{\Phi}{\tau},$$

$$v_2 = \frac{dI''}{dt} \approx -\frac{I_{\Phi_0}}{\tau}.$$

Возрастание фотосигнала в пределах длительности импульса

$$I' \approx v_1 \cdot t \approx S \cdot \Phi \cdot t_n / \tau,$$

уменьшение тока в интервале времени между импульсами

$$\Delta I'' \approx v_2 \cdot (T_n - t) \approx -I_{\Phi_0} \cdot (T_n - t_n) / \tau.$$

В начале действия последовательности импульсов приращение фотосигнала больше, чем его уменьшение. Однако по мере возрастания I_{Φ_0} спад $\Delta I''$ фотосигнала увеличивается. Через некоторое время ($2,2\tau$) возрастание и спад тока окажутся одинаковыми. После этого устанавливается среднее значение фотосигнала.

Колебания фотосигнала относительно среднего значения при большом значении τ оказываются очень малыми, а фотосигнал — практически постоянным и равным среднему значению.

Форма потока, падающего на приемник, не воспроизводится в изменении фотосигнала. Если в параметрах импульсов потока t_n и T_n , а также в его форме была отображена какая-то информация, то она окажется утерянной. Однако если информация содержалась в среднем значении последовательности импульсов потока, то регистрация с помощью инерционного приемника возможна.

4.3. Применение ОУ в частотно-зависимых цепях ФПУ

Схемы электронных устройств на основе ОУ, приведенные выше, рассчитаны для условий статического режима их работы. Такой режим соответствует постоянным, медленно меняющимся входным сигналам или работе ФПУ при постоянной частоте модуляции принимаемого потока. Строго говоря, последний случай не является статическим, но коэффициент передачи электронного тракта может быть определен

только для рабочей частоты. Если же частота модуляции сигнала велика или изменяется в широких пределах, либо техническое задание на проектируемое ФПУ предусматривает специальные требования к его амплитудно-частотной характеристике (АЧХ), то требуется коррекция АЧХ в соответствии с предъявляемыми к ней требованиями.

Многие типы ОУ общего и специального назначения имеют внутреннюю (встроенную) коррекцию. Такая коррекция предотвращает генерацию ОУ на высоких частотах. Это происходит за счет уменьшения усиления ОУ с ростом частоты. Изготовители ОУ представляют частотную зависимость усиления ОУ без обратной связи в виде кривой, называемой АЧХ без ОС. Эта АЧХ называется также малосигнальной. Типичная АЧХ ОУ со встроенной коррекцией имеет максимальное значение коэффициента усиления напряжения на нулевой частоте. Именно это значение коэффициента усиления приводится в паспорте ОУ. Вторая характерная точка АЧХ ОУ — это частота, на которой коэффициент усиления снижается в 1,41 раза (0,707 от максимального значения на очень низких частотах). На более высоких частотах в логарифмическом масштабе АЧХ имеет спад -20 дБ/декада. Декада — интервал частот с изменением в 10 раз. Другое обозначение этого же факта: спад в 6 дБ/октава. Октава — диапазон частот с изменением в 2 раза. Наиболее высокая частота, которой характеризуется ОУ, называется частотой единичного усиления. Она соответствует частоте, на которой коэффициент усиления по напряжению без ОС равен 1.

На некоторые ОУ в паспортных данных не приводится частота единичного усиления или полная АЧХ; взамен их указывается другой параметр, называемый временем нарастания переходного процесса (при единичном усилении). Время нарастания определяется как время, необходимое для нарастания выходного напряжения с 10 до 90 % своего конечного значения. Полоса пропускания Δf (в герцах) вычисляется по времени нарастания t_n (в секундах) как

$$\Delta f = 0,35 / t_n.$$

Если ОУ предполагается использовать в ФПУ при постоянной и известной частоте модуляции потока излучения, то целесообразно создать усилитель с АЧХ, соответствующей резонансному режиму работы электронного устройства на частоте модуляции потока. Ширина полосы пропускаемых частот в этом случае значительно уменьшается, что приводит к уменьшению шумов в электронном тракте и, как следствие, к увеличению отношения "сигнал — шум" на выходе ФПУ. При

работе с импульсным излучением с большой скважностью ширина полосы пропускаемых частот электронного тракта должна быть не менее чем $\Delta f = 1/2\pi t_n$, где t_n - длительность импульса излучения в пределах 0,1...0,9 от максимального значения мощности излучения. Следует иметь в виду, что в этом случае АЧХ включает в себя и нулевую частоту, что не позволяет устранить в электронном тракте самые интенсивные спектральные составляющие шума. При следовании импульсов излучения с определенной частотой повторения f_T требования к форме АЧХ можно сформулировать так: полоса пропускаемых частот $\Delta f = 1/2\pi t_n$, нулевую частоту можно исключить, а обработку сигнала проводить на частоте $f = 1/2\pi t_T$, т.е. работать с первой гармоникой периодического сигнала. В этом случае достигается большее отношение "сигнал - шум", чем в первом случае.

Частотная коррекция ОУ в этих случаях проводится с помощью введения частотно-зависимых элементов в ОС. Этот вопрос подробно рассмотрен в [5, II].

5. ПРИМЕРЫ

1. Рассчитать параметры электрической схемы ФПУ на основе ФД и ОУ при следующих условиях:

1) интегральная вольтовая чувствительность ФПУ

$$S_U = 1,0 \text{ мВ/мкВт};$$

2) рабочая интегральная токовая чувствительность фотодиода

$$S_{i \text{ рад}} = 500 \text{ мА/Вт};$$

3) режим работы фотодиода - фотогальванический;

4) принимаемый поток излучения постоянный или медленно изменяющийся;

5) полярность выходного сигнала ФПУ - положительная.

Решение. Вариант А. В качестве основы схемы ФПУ выберем инвертирующий усилитель. Для работы усилителя в качестве преобразователя "ток - напряжение" необходимо выбрать входное сопротивление усилителя $R_1 = 0$ (см. подразд. 2). С учетом требуемой полярности выходного сигнала ФПУ и режима работы ФД схема включения показана на рис. 27а. Весь фототок приемника излучения протекает через сопротивление обратной связи R_2 , причем падение напряжения на нем равно выходному напряжению ФПУ

$$U_{\text{вых}} = U_2 = S_{i \text{ рад}} \Phi R_2,$$

где Φ - интегральный поток принимаемого излучения.

Вольтовая чувствительность ФПУ определяется как

$$S_U = U_{\text{Вых}} / \Phi = S_{i \text{ рад}} R_2$$

Искомое значение сопротивления $R_2 = S_U / S_{i \text{ рад}} = 2 \text{ кОм}$.

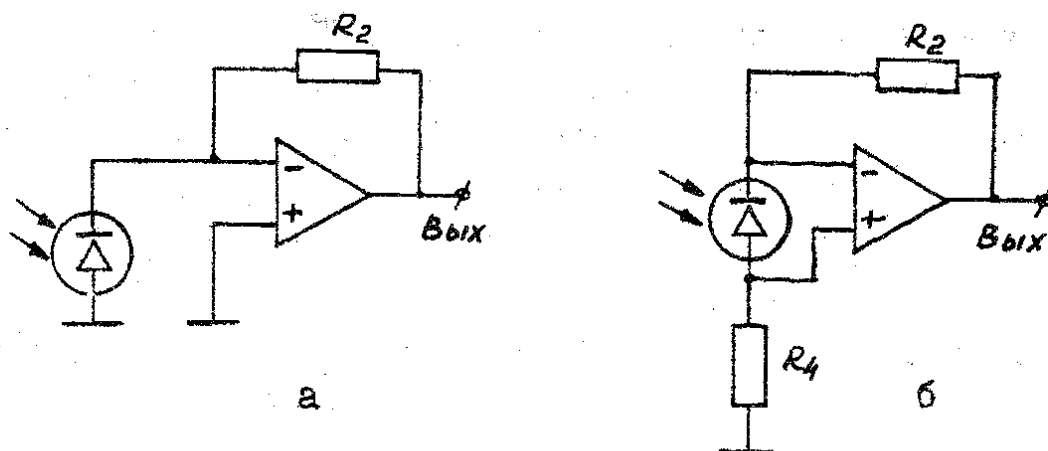


Рис. 27. К примеру I

Вариант Б. В качестве основы схемы ФПУ выберем дифференциальный усилитель. С учетом перечисленных выше требований схема ФПУ приведена на рис. 27б. Отметим, что для реализации режима работы преобразователя "ток - напряжение" в схеме ФПУ сопротивления $R_1 = R_3 = 0$ (см. рис. 10), а сопротивления $R_2 = R_4 = R$. Искомым параметром в данном случае является именно сопротивление R .

Вольтовая чувствительность такого ФПУ $S_U = 2 R S_{i \text{ рад}}$, откуда $R = S_U / 2 S_{i \text{ рад}} = 1 \text{ кОм}$.

2. Рассчитать параметры электрической схемы ФПУ на основе ФД и ОУ при следующих условиях:

1) ФПУ работает в режиме люксметра с линейной энергетической характеристикой при максимальном значении измеряемой освещенности $E_{\text{max}} = 100 \text{ 000 лк}$;

2) рабочая интегральная токовая чувствительность фотодиода $S_{i \text{ рад}} = 0,01 \text{ мкА/лк}$;

3) темновой ток фотодиода $I_T = 1 \text{ мкА}$;

4) выходное напряжение ФПУ при освещенности 100 000 лк $U_{\text{max}} = +5 \text{ В}$;

5) рекомендуемый режим работы приемника излучения - фотодиодный, с внешним источником питания.

Решение. В качестве основы для схемы ФПУ выбираем инвертирующий усилитель. С учетом требований, предъявляемых к ФПУ, схема

приведена на рис. 28. Искомыми параметрами являются сопротивления R_1 , R_2 , R_3 , а также питающее напряжение U_n для ФД.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя равно R_1 . Это же сопротивление является нагрузкой для фотодиода. Если все напряжение U_n падает на сопротивлении нагрузки при максимальной освещенности фотодиода, то соответствующее максимальное сопротивление нагрузки определяется как

$$R_{н\max} = R_1 = U_n / (I_T + S_{i\text{рад}} E_{\max}).$$

Однако практически на фотодиоде всегда есть остаточное падение напряжения, не превышающее 0,5 В. Поэтому напряжение питания фотодиода следует увеличить на 0,5 В, т.е.

$$U_n = 5,5 \text{ В.}$$

Строго говоря, к этому напряжению следует добавить и величину $I_T R_1$, но эта добавка, как правило, очень невелика из-за малого значения темнового тока.

Теперь, полагая, что на сопротивлении нагрузки падает напряжение 5 В, найдем это сопротивление:

$$R_1 = 5 \text{ В} / (1 \text{ мкА} + 0,01 \text{ мкА/лк} \cdot 100\,000 \text{ лк}) = 5 \text{ кОм.}$$

Сопротивление резистора $R_2 = R_1$, поскольку дополнительное усиление входного сигнала не нужно. Для точной подстройки чувствительности ФПУ следует предусмотреть подстроечный резистор в позиции R_1 или R_2 . Сопротивление резистора $R_3 = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 2,5 \text{ кОм.}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каледин С.В., Пясецкий В.Б. Методика расчета параметров приемников излучения при проектировании оптико-электронных приборов: Учебное пособие / Под ред. В.Н.Дикарева. М.: Изд-во МГТУ, 1994. 43 с.
2. Ишанин Г.Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1986. 216 с.
3. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л., Смолин О.В. Микро-

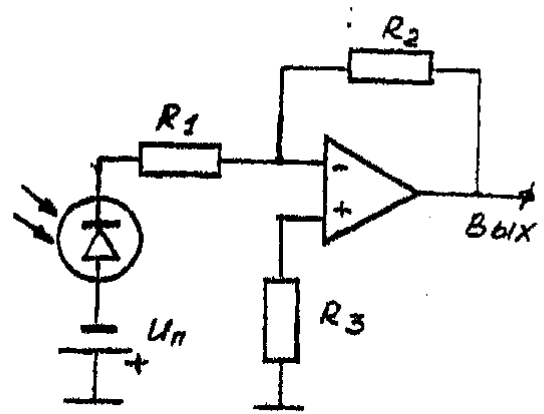


Рис. 28. К примеру 2

электронные фотоприемные устройства. М.: Энергоатомиздат, 1984. 208 с.

4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Т. I / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 598 с.

5. Нестеренко Б.К. Интегральные операционные усилители: Справочное пособие по применению. М.: Энергоиздат, 1982. 128 с.

6. Справочник по приемникам оптического излучения / В.А.Волков, В.К.Вялов, Л.Г.Гассанов и др.; Под ред. Л.З.Криксунова и Л.С.Кременчугского. Киев: Техника, 1985. 216 с.

7. Павлов А.В. Оптико-электронные приборы (Основы теории и расчета). М.: Энергия, 1974. 360 с.

8. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приемники оптического излучения: Справочник. М.: Радио и связь, 1987. 296 с.

9. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учебное пособие для приборостроительных вузов. Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.

10. Измерение параметров приемников оптического излучения / Н.В.Васильченко, В.А.Борисов, Л.С.Кременчугский, Г.Э.Левин; Под ред. Л.Н.Курбатова, Н.В.Васильченко. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.

11. Кофлин Р., Дрискол Ф. Операционные усилители и линейные интегральные схемы / Пер. с англ. М.: Мир, 1979. 360 с.

12. Николаев Ю.Н. Приемники излучения. Ч.2. Основные виды приемников излучения. М.: МВТУ им.Н.Э.Баумана, 1967. 68 с.

13. Фукс-Рабинович Л.И., Елифанов М.В. Оптико-электронные приборы: Учебное пособие для оптико-механических и приборостроительных техникумов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. 362 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
I. Элементы типовых схем включения ПИ	4
I.1. Резистивный делитель	4
I.2. Мостовая схема	5
I.3. Трансформаторная схема	7
2. Операционные усилители	8
3. Выбор схем включения различных ПИ во входную цепь ФПУ	12
3.1. Болометры	12
3.2. Пироэлектрические приемники излучения	15
3.3. Фотоэлектронные умножители	17
3.4. Фоторезисторы	19
3.5. Фотодиоды	22
4. Особенности регистрации переменных оптических сигналов	27
4.1. Периодически модулированные потоки излучения	27
4.2. Импульсное излучение	30
4.3. Применение ОУ в частотно-зависимых цепях ФПУ	33
5. Примеры	35
Список литературы	37

Редакция заказной литературы

Сергей Борисович Каледин

Вячеслав Борисович Пясецкий

Приемники оптического излучения

Часть 2

Расчет схем включения

Заведующая редакцией Н.Г.Ковалевская

Редактор О.М.Королева

Корректор Л.И.Малютина

Подписано в печать 17.09.96. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 2.
Печ.л. 2,5. Усл.печ.л. 2,33. Уч.-изд.л. 2,28. Тираж 300 экз.
Изд. № 23. Заказ № 309 С 70

Издательство МГТУ им.Н.Э.Баумана,
типография МГТУ им.Н.Э.Баумана,
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

535
К-171

Московский государственный технический
университет
им. Н.Э. Баумана

С.Б. Каледин, В.Б. Пясецкий

ПРИЁМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Часть 2

Расчет схем включения

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2000