

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

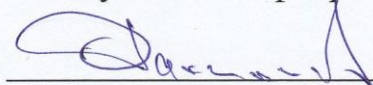
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева

Кафедра «Приборы управления»

Утверждено на заседании кафедры
«Приборы управления»
« 19 » января 2022 г., протокол № 1

Заведующий кафедрой



В.Я. Распопов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по проведению практических (семинарских) занятий
по дисциплине (модулю)
«Электронно-электротехническая база оптических приборов»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки
12.03.02 – Опотехника

с направленностью (профилем)
Оптико-электронные приборы и системы


Форма(ы) обучения: *очная*

Идентификационный номер образовательной программы: 120302-01-22

Тула 2022 год

Разработчик(и) методических указаний

Иванов Ю.В., профессор кафедры ПУ, д. т.н.
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)


(подпись)

Содержание

	С.
Практическое занятие № 1 Расчет основных параметров схем преобразователей ток-напряжение	4
Практическое занятие № 2 Расчет элементов схемы включения четырехплощадочного ФПУ, работающего с модулированным потоком излучения.	8
Практическое занятие № 3 Расчет теплового шума фотоприёмников	10
Практическое занятие № 4 Изучение схем согласующих усилителей для функциональных фоторезисторов	14
Практическое занятие № 5 ФПУ с противозумовой и частотной коррекциями.	17
Практическое занятие № 6 Расчет основных параметров ФПУ	22
Практическое занятие № 7 Расчет схем для автоматической регулировки коэффициента усиления электронного тракта ФПУ	43
Практическое занятие № 8 Расчет схемы усилителя заряда для считывания информации из ПЗС	47

Практическое занятие № 1

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОК-НАПРЯЖЕНИЕ

1. Цель и задачи работы

Цель работы: получение практических навыков расчета основных параметров схемы преобразователя ток-напряжение.

Задачи работы: изучить схему электрическую преобразователя ток-напряжение; изучить порядок расчета схемы.

2. Общие положения (теоретические сведения)

Преобразование ток – напряжение имеет коэффициент передачи по току:

$$K_I = \frac{U_{вых}}{I_{сд}} = - \frac{R_{OC}}{1 + \frac{R_{ex} + R_{OC}}{K_0 \cdot R_{ex}}},$$

где K_0 – коэффициент усиления усилителя без ОС; R_{ex} – входное сопротивление усилителя.

Т.к. сопротивления R_{ex} , R_{OC} , K_0 составляют величины порядка Мом, следовательно,

дробь $\frac{R_{ex} + R_{OC}}{K_0 \cdot R_{ex}} \ll 1$, следовательно ей можно пренебречь. Тогда, получаем следующее

приближенное выражение для коэффициента передачи по току:

$$K_I \approx -R_{OC}.$$

Эквивалентное входное сопротивление преобразователя ток – напряжение определяется по следующей формуле:

$$R'_{ex} = \frac{R_{OC}}{K_0 + 1 + \frac{R_{OC}}{R_{ex}}}.$$

Для большинства современных операционных усилителей выполняется условие:

$$\frac{R_{OC}}{R_{ex}} \ll K_0.$$

Поэтому, получается, что $R_{OC}/R_{ex} \ll 1$, следовательно приближенное выражение для большинства входного сопротивления преобразователя запишется в следующем виде:

$$R'_{ex} \approx \frac{R_{OC}}{K_0}.$$

Если $K_0 \approx 100000$, $R_{OC} < 10^6$ Ом, то $R'_{ex} \approx 1...10$ Ом. Выходное напряжение связано с потоком излучения следующей формулой:

$$U_C = S_i R_{OC} \Phi_e = S_U \cdot \Phi_e, \quad S_U = S_I \cdot R_{OC},$$

где S_I – токовая чувствительность фотодиода; S_U – вольтовая чувствительность фотодиода; Φ_e – поток от излучения падающий на фоточувствительную площадку.

3. Задание на работу (рабочее задание)

Рассчитать параметры схемы преобразователя ток-напряжение.

4. Ход работы (порядок выполнения работы)

Расчет максимально и минимально допустимого сопротивления ОС

При работе с малыми потоками излучения приходится выбирать $R_{OC} \approx 1$ МОм и более. В этом случае при расчетах необходимо учитывать влияние конечного значения K_0 и R_{ex} . Следовательно, приходится использовать *полные формулы* для коэффициента передачи и входного сопротивления:

$$U_c = \frac{S_i \Phi_e R_{OC}}{1 + \frac{R_{OC}}{K_0 R_{ex}} + \frac{1}{K_0}}. \quad (13)$$
$$R'_{ex} = \frac{R_{OC}}{K_0 + 1 + \frac{R_{OC}}{R_{ex}}}.$$

Для определения зависимости относительного изменения сигнала на выходе от величины нестабильности коэффициента усиления ΔK_0 , продифференцируем формулу (13) по K_0 :

$$\frac{\partial U_c}{\partial K_0} = \frac{-S_i \hat{O}_e R_{OC} \left(1 + \frac{R_{OC}}{K_0 R_{\hat{a}\hat{o}}} + \frac{1}{K_0}\right)'}{\left(1 + \frac{R_{OC}}{K_0 R_{\hat{a}\hat{o}}} + \frac{1}{K_0}\right)^2} = -S_i \hat{O}_e R_{OC} \frac{\left(-\frac{R_{OC}}{R_{\hat{a}\hat{o}}} \cdot \frac{1}{K_0^2} - \frac{1}{K_0^2}\right)}{\left(1 + \frac{R_{OC}}{K_0 R_{\hat{a}\hat{o}}} + \frac{1}{K_0}\right)^2}.$$
$$\frac{\partial U_c}{\partial K_0} = S_i \hat{O}_e R_{OC} \frac{\frac{R_{OC}}{R_{\hat{a}\hat{o}}} + 1}{\left(1 + \frac{R_{OC}}{K_0 R_{\hat{a}\hat{o}}} + \frac{1}{K_0}\right)^2} = S_i \hat{O}_e R_{OC} \frac{\frac{R_{OC}}{R_{\hat{a}\hat{o}}} + 1}{\left(1 + \frac{R_{OC}}{K_0 R_{\hat{a}\hat{o}}} + \frac{1}{K_0}\right)^2}.$$

Теперь найдем отношение $\Delta U_c / U_c$:

$$\frac{\Delta U_c}{U_c} = S_i \hat{O}_e R_{OC} \frac{\frac{R_{OC}}{R_{\hat{a}\hat{o}}} + 1}{\left(1 + \frac{R_{OC}}{K_0 R_{\hat{a}\hat{o}}} + \frac{1}{K_0}\right)^2} : \frac{S_i \hat{O}_e R_{I\bar{N}}}{1 + \frac{R_{OC}}{K_0 R_{\hat{a}\hat{o}}} + \frac{1}{K_0}} = \frac{\frac{R_{OC}}{R_{\hat{a}\hat{o}}} + 1}{1 + \frac{R_{OC}}{K_0 R_{\hat{a}\hat{o}}} + \frac{1}{K_0}} = \left(\frac{R_{OC}}{R_{\hat{a}\hat{o}}} - 1\right) \frac{\Delta K_0}{K_0^2}.$$

Из графика (рис. 1) можно найти значение $R_{OC \max}$, если заданы $K_0, R_{ex}, \delta_{don}$.

Минимальное сопротивление обратной связи R_{OC} ограничивается температурным шумом резистора ОС и определяется по следующей формуле:

$$\frac{1}{R_{OC(\min)}} \leq \frac{8eI_T}{kT} + \frac{T}{R_{\hat{a}} T_R},$$

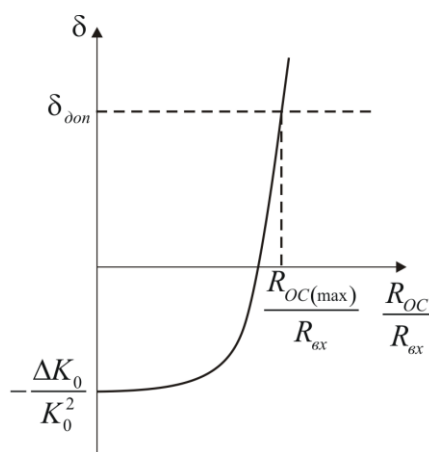


Рис. 1.

где e — заряд электрона; I_T — темновой ток фотодиода; T — температура окружающей среды; k — постоянная Больцмана; R_o — динамическое сопротивление фотодиода в рабочей точке ВАХ; T_R — температура резистора в цепи обратной связи.

5. Контрольные вопросы

1. По какой формуле находится напряжение на выходе фотоприемника?
2. Какие особенности схемы обеспечивают линейность световой характеристики преобразователя ток-напряжение в широком динамическом диапазоне?
3. Сформулируйте условие выбора максимального значения R_{oc} в преобразователе ток-напряжение.
4. Определить фототок диода, если на него падает световой поток $\Phi = 0,02$ лм, а интегральная токовая чувствительность $S_I = 15\,000$ мкА/лм.
5. Определить входное сопротивление преобразователя ток-напряжение, если сопротивление обратной связи 100 кОм, коэффициент усиления ОУ 50000.

Список использованных источников

1. Лаврентьев, Б. Ф. Схемотехника электронных средств : учебное пособие для вузов / Б. Ф. Лаврентьев .— Москва : Академия, 2010 .— 335 с. : ил. — (Высшее профессиональное образование. Радиоэлектроника) .— Библиогр. в конце кн. — ISBN 978-5-7695-5898-6 (в пер.) . 14 экз.
2. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. Учебник для вузов. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Логос, 2004. — 472 с.
3. Парвулюсов Ю.Б. Проектирование оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для вузов / Ю.Б.Парвулюсов, В.П.Солдатов, Ю.Г.Якушенков; Под ред. Ю.Г.Якушенкова . — М. : Машиностроение, 1990 . — 431 с.
4. Быстров Ю.А. Электронные приборы и устройства на их основе : справ.кн. / Ю.А.Быстров, С.А.Гамкрелидзе, Е.Б.Иссерлин, В.П.Черепанов; Под ред.Ю.А. Быстрова . — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : РадиоСофт, 2002 .— 656 с.

Практическое занятие № 2

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ЧЕТЫРЕХПЛОЩАДОЧНОГО ФПУ, РАБОТАЮЩЕГО С МОДУЛИРОВАННЫМ ПОТОКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

1. Цель и задачи работы

Цель работы: получение практических навыков расчета четырехплощадочного ФПУ.

Задачи работы: изучение схемы включения четырехплощадочного фотодиода; изучение порядка расчета элементов схемы.

2. Общие положения (теоретические сведения)

На рис. 3 приведена принципиальная схема включения четырехплощадочного фотодиода в оптико-электронной измерительной системе, работающий с модулированным потоком оптического излучения.

Аноды фотодиода $V1(A, B, C$ и $D)$ подключены ко входам преобразователей: «ток - напряжение», реализованных на операционных усилителях $A1-1, A1-2, A1-3, A1-4$.

Операционные усилители $A2-1$ и $A2-2$ выполняют функции аналоговых сумматоров сигналов, снимаемых со смежных каналов $(B + D)$ и $(A + C)$, в соответствии с алгоритмом, показанном на рис. 4.

В качестве схемы вычитателя, формирующий разностный сигнал $(B + D) - (A + C)$, пропорциональный смещению вдоль оси X , используется операционный усилитель $A3$. С выхода $A3$ сигнал поступает на вход синхронного детектора (на рис. не показан).

Разностный сигнал $(A + B) - (C + D)$, пропорциональный смещению вдоль оси X , можно получить с помощью аналогичной схемы. При этом целесообразно использовать один и тот же ОУ $A1-1, A1-2, A1-3$ и $A1-4$, но сигналы на вход первого сумматора следует подавать с выходов ОУ $A1-2$ и $A1-4$ (точки d), а на вход второго сумматора – соответственно с выходов $A1-1$ и $A1-3$.

Выбор ОУ, выполняющих роль преобразователей «ток-напряжение», следует производить с учетом указанных рекомендаций. Кроме того, *желательно реализовать всю схему на элементах одной серии*, что позволит свести к минимуму число питающих напряжений и упростить конструкцию прибора в целом. На приведенной схеме использованы ОУ серии 153УД1.

Конденсаторы $C2-1 (2,3,4)$ (так же как и конденсаторы $C4-1$ и $C6$) служат для коррекции частотной характеристики ОУ с целью предотвращения их от самовозбуждения. Величина емкостей этих конденсаторов обычно составляет несколько пикофарад и подбирается при настройке.

Резисторы $R1-1 (2,3,4)$ используются для увеличения динамического диапазона преобразователей «ток-напряжение» за счет компенсации постоянных составляющих темновых токов фотодиодов и фототока от возможной постоянной фоновой засветки.

Величины сопротивлений резисторов $R1-1 (2,3,4)$ рекомендуется выбирать равными сопротивлениям резисторов в цепи обратной связи.

3. Задание на работу (рабочее задание)

Рассчитать элементы схемы четырехплощадочного ФПУ, работающего с модулированным потоком излучения.

4. Ход работы (порядок выполнения работы)

Величины емкостей конденсаторов $C1-1 (2,3,4)$ должны быть достаточными, чтобы для нижней граничной частоты в спектре видеосигнала сопротивления конденсаторов $X_C = 1/(2\pi fC)$ были близки к нулю и неинвертирующие входы ОУ (+) находились под нулевыми потенциалами по переменному току

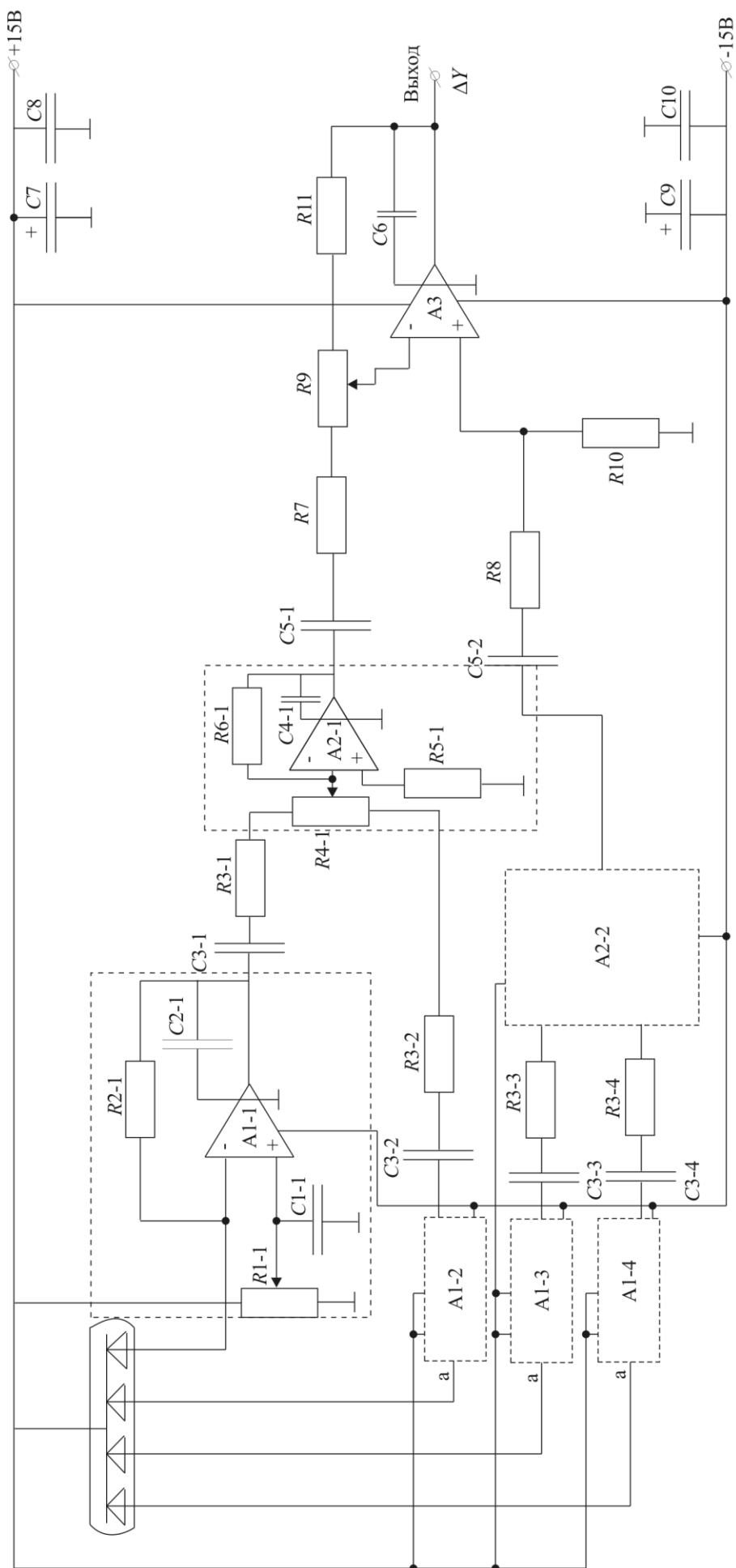


Рис. 3 Схема электрическая принципиальная

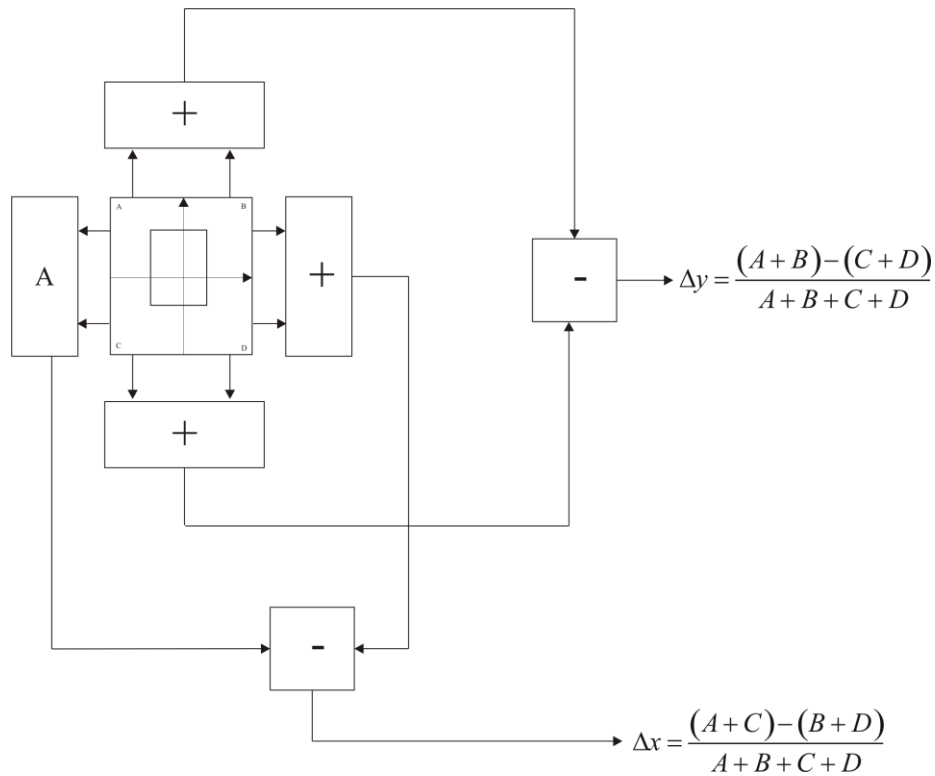


Рис. 4

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_H C_1} \leq 0,1R_1,$$

т.е.

$$C_1 \geq \frac{10}{2\pi f_H R_1},$$

где f_H — нижняя граничная частота в спектре сигнала.

При модуляции оптического излучения импульсами прямоугольной формы f_H можно найти из условия:

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_{имп}} \sigma_{дон},$$

где $\tau_{имп}$ — длительность излучаемых импульсов; $\sigma_{дон}$ — максимально допустимый относительный спад вершины импульса, возникающий при ограничении спектра в области нижних частот, $\sigma_{дон} \leq 0,1$.

Разделительные конденсаторы $C3-1(2,3,4)$ необходимы для обеспечения развязки между каскадами по постоянному току, что позволяет исключить влияние дрейфа постоянных составляющих — выходных напряжений ОУ. Резисторы $R3-1(2,3,4)$ служат для ослабления взаимного влияния сигналов, снимаемых с различных площадок фотодиода. Для этого величины сопротивлений $R3-1(2,3,4)$ должны быть значительно больше выходных сопротивлений ОУ. Например, для ОУ серии 153УД1, имеющих выходное сопротивление порядка 300 Ом, в качестве развязывающих резисторов надо брать $R_3 = 150 \text{ кОм}$. Резисторы $R4-1(2)$ необходимы для выравнивания коэффициентов передачи суммируемых сигналов при настройке сумматоров на ОУ $A2-1(2)$.

Коэффициент передачи сумматора K_{Σ} на ОУ определяется соотношением сопротивления резисторов R_3, R_4 и R_6

$$K_{\Sigma} \approx \frac{R_6}{R_3 + 0,5R_4}.$$

Для обеспечения высокой точности суммирования не следует стремиться к получению большого коэффициента передачи, рекомендуемое значение $K_{\Sigma} = 1 \dots 3$. В приведенном примере сопротивление резистора R_6 составляет величину $75 \dots 230$ кОм.

Резисторы $R_5 - 1(2)$ служат для повышения стабильности режима работы сумматора на ОУ. Величина сопротивления R_5 должна выбираться из условия

$$R_5 \approx \frac{0,5(R_3 + 0,5R_4)R_6}{0,5(R_3 + 0,5R_4) + R_6}.$$

ОУ АЗ выполняет роль схемы вычитания (сравнения) сигналов $(B + D)$ и $(A + C)$. Точная настройка схемы вычитания осуществляется с помощью резистора R_9 , величина сопротивления которого должна составлять $(0,3 \dots 0,5)R_7$. Коэффициенты передачи, т.е. масштабные коэффициенты сравниваемых сигналов определяются соотношением сопротивлений

$$U_{\text{вых}} = U_{(A+C)} \frac{R_{10}}{R_8 + R_{10}} \cdot \left(1 + \frac{R_{11}}{R_7 + R_9} \right) - U_2 \frac{R_{11}}{R_7 + R_9},$$

$$K_{(B+D)} = \frac{R_{11} + 0,5R_9}{R_7 + 0,5R_9}; \quad K_{(A+C)} = \frac{R_{10}}{R_8}.$$

Для обеспечения стабильной работы схемы желательно, чтобы $R_7 + 0,5R_9 \approx R_8$; $R_{11} + 0,5R_9 \approx R_{10}$. При этом конкретные значения сопротивления резисторов $R_7 - R_{11}$ определяются с учетом требуемого усиления. Отметим, что для ОУ серии 153УД1 R_{10} и R_{11} не должны превышать единиц МОм.

При выборе разделительных конденсаторов $C_3 - 1(2,3,4)$ необходимо соблюдение условий:

$$\begin{cases} X_{C_3} = \frac{1}{2\pi f_i C_3} \leq 0,1R_3, \\ X_{C_5} = \frac{1}{2\pi f_i C_5} \leq 0,1R_7. \end{cases}$$

Конденсаторы $C_8 \dots C_{11}$ выполняют роль фильтров в цепях питания. Причем в приведенной схеме C_8 и C_{10} - электролитические конденсаторы большей емкости, чем конденсаторы C_9 и C_{11} . Керамические конденсаторы C_9 и C_{11} , в отличие от электролитических, являются практически безиндуктивными и более эффективно работают на высоких частотах, в то время как электролитические конденсаторы C_8 и C_{10} - на более низких. Величины емкостей следует выбирать максимально большими с учетом рабочих напряжений и допустимых габаритов конденсаторов.

5. Контрольные вопросы

1. По какой схеме включен операционный усилитель А1-1?
2. Какую функцию выполняет операционный усилитель АЗ?
3. Из какого условия выбираются емкости конденсаторов C_3 и C_5 ?

4. Найти f_f сигнала фотоприемника при модуляции оптического излучения импульсами прямоугольной формы, если длительность излучаемого импульса составляет 20 нс, а допустимый относительный скол вершины импульса 10%.

Список использованных источников

1. Лаврентьев, Б. Ф. Схемотехника электронных средств : учебное пособие для вузов / Б. Ф. Лаврентьев .— Москва : Академия, 2010 .— 335 с. : ил. — (Высшее профессиональное образование. Радиоэлектроника) .— Библиогр. в конце кн. — ISBN 978-5-7695-5898-6 (в пер.) . 14 экз.

2. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. Учебник для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2004. – 472 с.

3. Парвулюсов Ю.Б. Проектирование оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для втузов / Ю.Б.Парвулюсов, В.П.Солдатов, Ю.Г.Якушенков; Под ред. Ю.Г.Якушенкова . – М. : Машиностроение, 1990 . – 431 с.

4. Быстров Ю.А. Электронные приборы и устройства на их основе : справ.кн. / Ю.А.Быстров, С.А.Гамкрелидзе, Е.Б.Иссерлин, В.П.Черепанов; Под ред.Ю.А. Быстрова . – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : РадиоСофт, 2002 .– 656 с.

Практическое занятие № 3

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО ШУМА ФОТОПРИЁМНИКОВ

1. Цель и задачи работы

Цель работы: получение практических навыков расчета теплового шума фотоприёмников на фотодиодах и операционных усилителях.

Задачи работы: расчет спектральной плотности шума фототока фотодиода; расчет спектральной плотности шума тока операционного усилителя; расчет спектральной плотности напряжения шума на выходе фотоприемника; расчет отношения сигнал/шум.

2. Общие положения (теоретические сведения)

Расчет теплового шума на выходе фотоприемника

Схема замещения фотоприемного устройства (ФПУ) на фотодиоде и операционном усилителе показана на рис. 5.

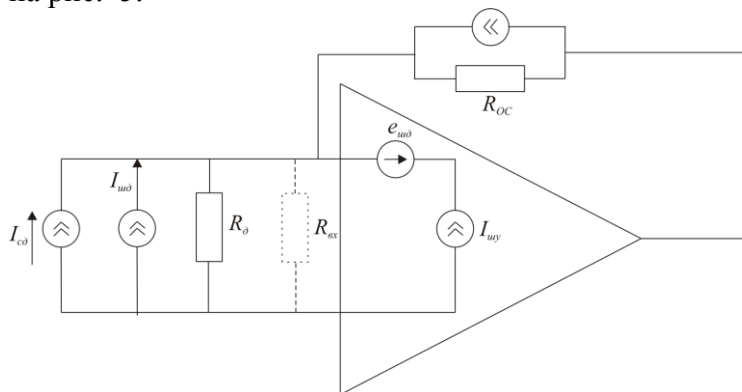


Рис. 5.

При работе ФПУ в режиме малых сигналов существенное значение имеют шумовые характеристики пары фотодиод ($\Phi Д$) – операционный усилитель ($ОУ$). Напряжение шума на выходе ФПУ в полосе частот $\Delta f = 1 \text{ Гц}$ определяется по формуле:

$$U_{ш(вых)} = \sqrt{e_{ш(y)}^2 + (i_{ш(y)}^2 + i_{ш(\Phi Д)}^2 + i_{ш(R(OC))}^2) R_{OC}^2},$$

где $e_{ш(y)}$ – спектральная плотность напряжения шума усилителя; $i_{ш(y)}$ – спектральная плотность шумового тока усилителя; $i_{ш(\Phi Д)}$ – спектральная плотность шумового тока фотодиода; $i_{ш(R(OC))}$ – спектральная плотность шумового тока, проходящего через сопротивление обратной связи R_{OC} .

Шумовые характеристики элементов приводятся в справочнике. Для современных $ОУ$ спектральная плотность напряжения шума и шумового тока находится в пределах:

$$e_{ш(y)} = (1...7) \cdot 10^{-8} \text{ В} / \text{Гц}^{1/2};$$

$$i_{ш(y)} = (1...2) \cdot 10^{-14} \text{ А} / \text{Гц}^{1/2}.$$

Для фотодиода, работающего в диодном режиме плотность шумового тока определяется по формуле:

$$i_{ш(\Phi Д)} = \sqrt{2eI_T},$$

для фотогоальванического режима:

$$i_{ш(\Phi Д)} = \sqrt{\frac{4kT}{R_{дифф}}},$$

где R_d – динамическое сопротивление $p-n$ перехода.

Спектральная плотность шумового тока сопротивления обратной связи R_{OC} определяется по формуле:

$$i_{ш(R_{OC})} = \sqrt{\frac{4RT}{R_{OC}}}.$$

При использовании малошумящих $ОУ$ основной вклад вносят шума $\Phi Д$ и сопротивление $ОС$.

$$U_{ш(вых)} \approx \sqrt{(i_{ш(\Phi Д)}^2 + i_{ш(R_{OC})}^2) R_{OC}^2}.$$

Шумовые параметры любой схемы характеризуются параметром, который называется *сигнал/шум*.

$$\frac{U_c}{U_{ш}} = \frac{S_i \Phi_e}{\sqrt{i_{ш(\Phi Д)}^2 + i_{ш(R_{OC})}^2}}.$$

При работе $\Phi Д$ в фотогоальваническом режиме сопротивление R_{OC} выбирается так, чтобы выполнялось условие: $R_{OC} > R_d$. В результате спектральная плотность шума фотодиода $i_{ш(\Phi Д)} \ll i_{ш(R_{OC})}$. Тогда отношение *сигнал/шум* примет следующий вид:

$$\frac{U_c}{U_{ш}} = \frac{S_i \hat{\Phi}_e}{\sqrt{\frac{4kT}{R_d}}}.$$

Требования, предъявляемые к $ОУ$ ФПУ:

- ✓ коэффициент усиления без ОС K_0 и входное сопротивление $R_{вх}$ при разомкнутой цепи ОС должны быть как можно больше во всем диапазоне рабочих частот
- ✓ шумовые параметры ОУ должны удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{cases} i_{\phi(\phi)}^2 \leq 2eI_T + 4kT / R_a, \\ e_{\phi(\phi)}^2 > \frac{i_{\phi(\phi\ddot{A})}}{C_{\phi\ddot{o}}}. \end{cases}$$

В приведенной системе $C_{вх}$ – эквивалентная емкость входной цепи, которая примерно равна емкости p - n -перехода; R_0 – динамическое сопротивление фотодиода в рабочей точке ВАХ.

3. Задание на работу (рабочее задание)

Рассчитать параметры теплового шума фотоприемника на фотодиоде и операционном усилителе.

4. Ход работы (порядок выполнения работы)

1. Рассчитать плотность шумового тока для фотодиода, работающего в диодном режиме по формуле:

$$i_{\phi(\phi\ddot{A})} = \sqrt{2eI_T}.$$

2. Рассчитать плотность шумового тока для фотодиода, работающего в фотогальваническом режиме по формуле:

$$i_{\phi(\phi\ddot{A})} = \sqrt{\frac{4kT}{R_{\phi\ddot{o}\phi\ddot{A}}}}.$$

3. Рассчитать спектральную плотность шумового тока сопротивления обратной связи R_{OC} по формуле:

$$i_{\phi(R_{OC})} = \sqrt{\frac{4RT}{R_{OC}}}.$$

4. Рассчитать напряжение шума на выходе ФПУ в полосе частот $\Delta f = 1 \text{ Гц}$ по формуле:

$$U_{\phi(\phi\ddot{o}\phi)} = \sqrt{i_{\phi(\phi)}^2 + (i_{\phi(\phi)}^2 + i_{\phi(\phi\ddot{A})}^2 + i_{R(\phi\ddot{N})}^2) R_{OC}^2}.$$

5. Рассчитать отношение сигнал/шум ФПУ.

$$\frac{U_c}{U_{ш}} = \frac{S_i \Phi_e}{\sqrt{i_{ш(\phi\ddot{D})}^2 + i_{ш(R_{OC})}^2}}.$$

6. Выбрать операционный усилитель по шумовым параметрам из условия

$$\begin{cases} i_{\phi(\phi)}^2 \leq 2eI_T + 4kT / R_a, \\ e_{\phi(\phi)}^2 > \frac{i_{\phi(\phi\ddot{A})}}{C_{\phi\ddot{o}}}. \end{cases}$$

5. Контрольные вопросы

1. Шумовые характеристики каких элементов ФПУ имеют существенное значение при работе фотоприемного устройства в режиме малых сигналов?
2. По какой формуле определяется напряжение шума в единичной полосе пропускания на выходе ФПУ?
3. По какой формуле определяется спектральная плотность тока шума фотодиода в фотогальваническом режиме работы?

Список использованных источников

1. Лаврентьев, Б. Ф. Схемотехника электронных средств : учебное пособие для вузов / Б. Ф. Лаврентьев .— Москва : Академия, 2010 .— 335 с. : ил. — (Высшее профессиональное образование. Радиоэлектроника) .— Библиогр. в конце кн. — ISBN 978-5-7695-5898-6 (в пер.) . 14 экз.
2. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. Учебник для вузов. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Логос, 2004. — 472 с.
3. Парвулюсов Ю.Б. Проектирование оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для втузов / Ю.Б.Парвулюсов, В.П.Солдатов, Ю.Г.Якушенков; Под ред. Ю.Г.Якушенкова . — М. : Машиностроение, 1990 . — 431 с.
4. Быстров Ю.А. Электронные приборы и устройства на их основе : справ.кн. / Ю.А.Быстров, С.А.Гамкрелидзе, Е.Б.Иссерлин, В.П.Черепанов; Под ред.Ю.А. Быстрова . — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : РадиоСофт, 2002 .— 656 с.

Практическое занятие № 4

ИЗУЧЕНИЕ СХЕМ СОГЛАСУЮЩИХ УСИЛИТЕЛЕЙ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ФОТОРЕЗИСТОРОВ

1. Цель и задачи работы

Цель работы: получение практических навыков расчета согласующих усилителей.

Задачи работы: получение практических навыков расчета элементов схем согласующих усилителей.

2. Общие положения (теоретические сведения)

Схема включения функционального фоторезистора (ФФР)

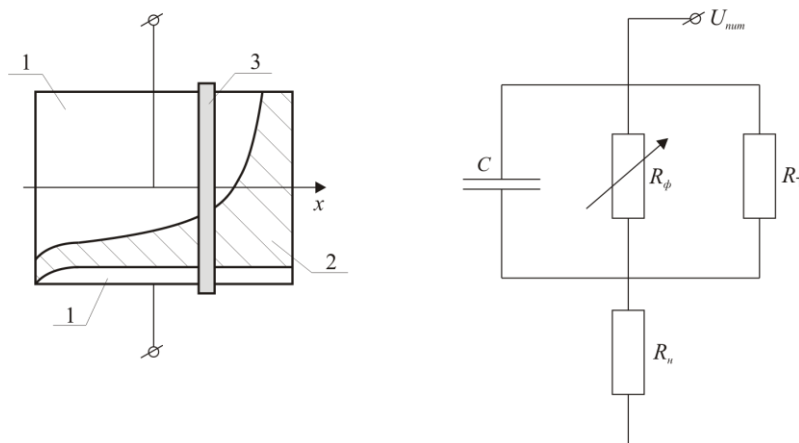


Рис. 6

В качестве позиционно чувствительного фотоприемного устройства ($\Phi П У$) в оптико-электронных приборах ($О Э П$) используются функциональные фоторезисторы ($\Phi Ф Р$). Он представляет собой профилированную пленку из полупроводникового материала **2**, которая подключается к схеме с помощью металлических контактов **1**. Оптическое изображение формируется в виде тонкой полоски **3**. При смещении оси симметрии изображения вдоль измерительного направления x уменьшается эквивалентное сопротивление $\Phi Ф Р$.

$\Phi Ф Р$ можно использовать как при модулированных, так и при немодулированных потоках излучения. Эквивалентная схема $\Phi Ф Р$ включает:

- R_{ϕ} – переменное сопротивление, обусловленное воздействием оптического сигнала; оно зависит от координаты изображения вдоль оси x
- C – эквивалентная емкость $\Phi Ф Р$
- R_T – темновое сопротивление
- R_n – сопротивление нагрузки

По значению *темнового тока* и *уровню собственных шумов* $\Phi Ф Р$ делят на три группы:

- низкоомные резисторы на основе германия, легированного медью;
 $R_T = 20 \dots 1000 \text{ Ом}$ и уровень шумов $0,5 \dots 10 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$
- охлаждаемые фоторезисторы на основе антимонида и арсенида индия;
 $R_T = 1 \dots 10 \text{ кОм}$, $e_{ш} = \text{нВ/Гц}^{1/2}$
- высокоомные фоторезисторы на основе халькогенидов свинца;
 $R_T = 1 \dots 10 \text{ МОм}$, $e_{ш} = 50 \dots 1000 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$.

Обобщенная структурная схема $\Phi П У$ на $\Phi Ф Р$

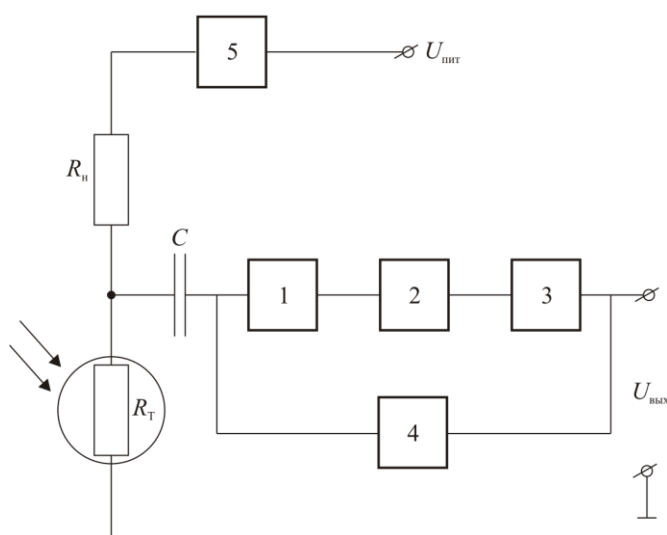


Рис. 7.

- 1** - согласующий каскад служит для внутреннего сопротивления фоторезистора с входным сопротивлением усилителя;
- 2** - усилительный каскад;
- 3** - выходной каскад;
- 4** - каскад автоматического регулирования усиления;
- 5** - фильтры нижних частот.

Для уменьшения собственного шума ФПУ согласующий каскад строится на малошумящих биполярных транзисторах (БТ), включенных по схеме с общей базой (ОБ) и работающих в режиме микротоков ($I_э \leq 0,5 \text{ мА}$).

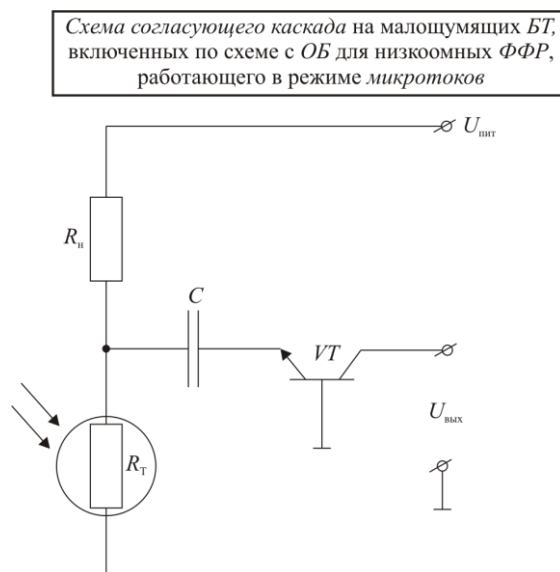


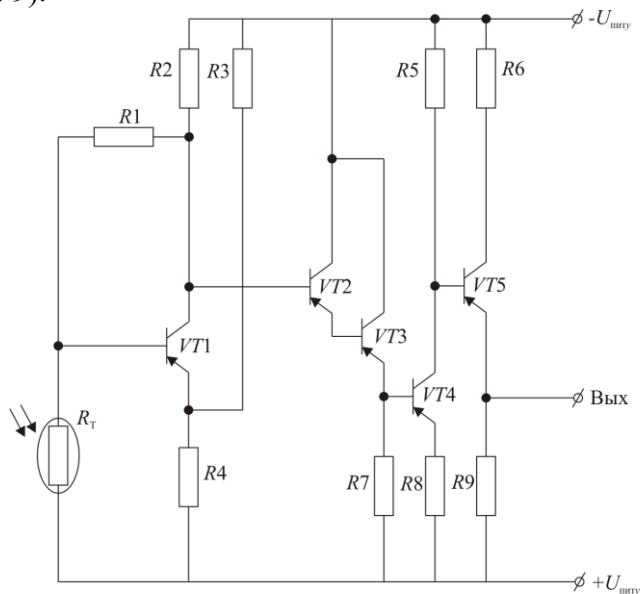
Рис. 8.

3. Задание на работу (рабочее задание)

Изучить схемы и рассчитать параметры согласующих усилителей.

4. Ход работы (порядок выполнения работы)

1. Для низкоомных ФФР в качестве согласующего каскада используется параллельное включение нескольких транзисторов, включенных по схеме с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 9).



Принципиальная электрическая схема ФПУ на основе фоторезистора из антимида с включением входного каскада по схеме с ОЭ

Рис. 9

При использовании фоторезисторов с темновым сопротивлением около 1 кОм применяются *германиевые* транзисторы, а фоторезисторов с темновым сопротивлением около 10,0 кОм – *кремниевые*.

2. Согласующая схема на параллельном включении БТ по схеме с ОЭ показана на рис. 10.

СКО тока сигнала, снимаемого с выхода усилителя увеличивается в n раз, где n – число параллельно включенных транзисторов. СКО тока шума схемы увеличивается в \sqrt{n} раз, т.к. эквивалентные шумовые генераторы не коррелированы. Т.о., в данной схеме отношение сигнал/шум по мощности увеличивается в n раз. Достоинством схемы по сравнению со схемой с ОБ является большой коэффициент усиления, и в тоже время схема не увеличивает шум на выходе.

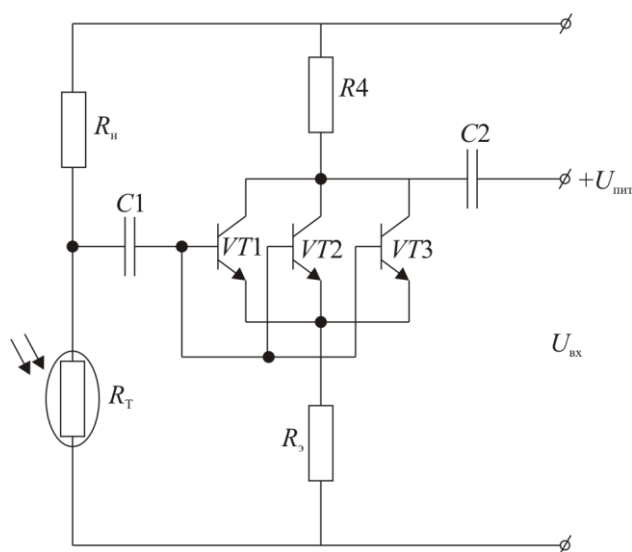
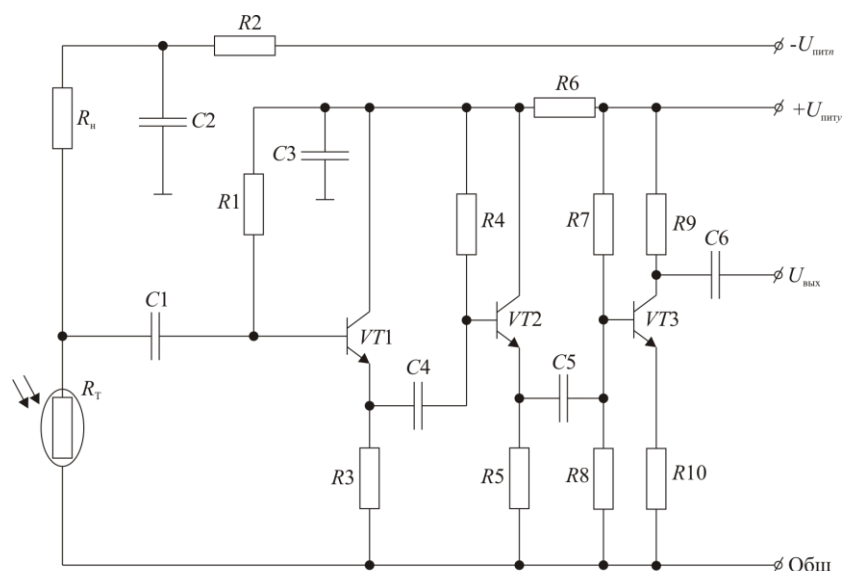
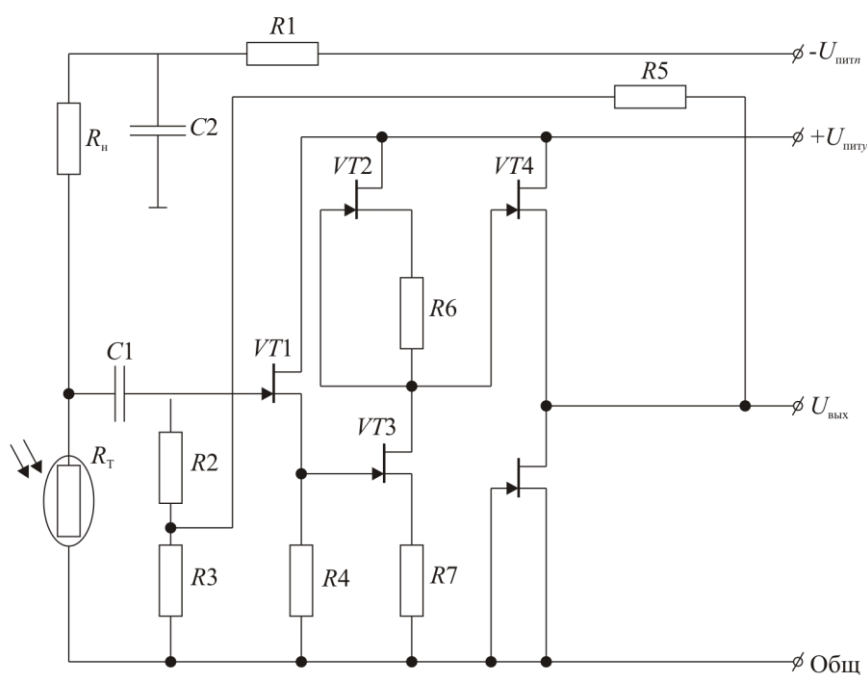


Рис. 10. Согласующая схема на параллельном включении БТ по схеме с ОЭ

3. Согласующие устройства (каскады) для высокоомных фоторезисторов выполняются на полевых транзисторах. При темновом сопротивлении приемника излучения до 1,0 МОм полевой транзистор включается по схеме с общим истоком (ОИ), а при сопротивлении более 1 МОм (что характерно для ряда охлаждаемых фоторезисторов) применяются эмиттерные или истоковые повторители.

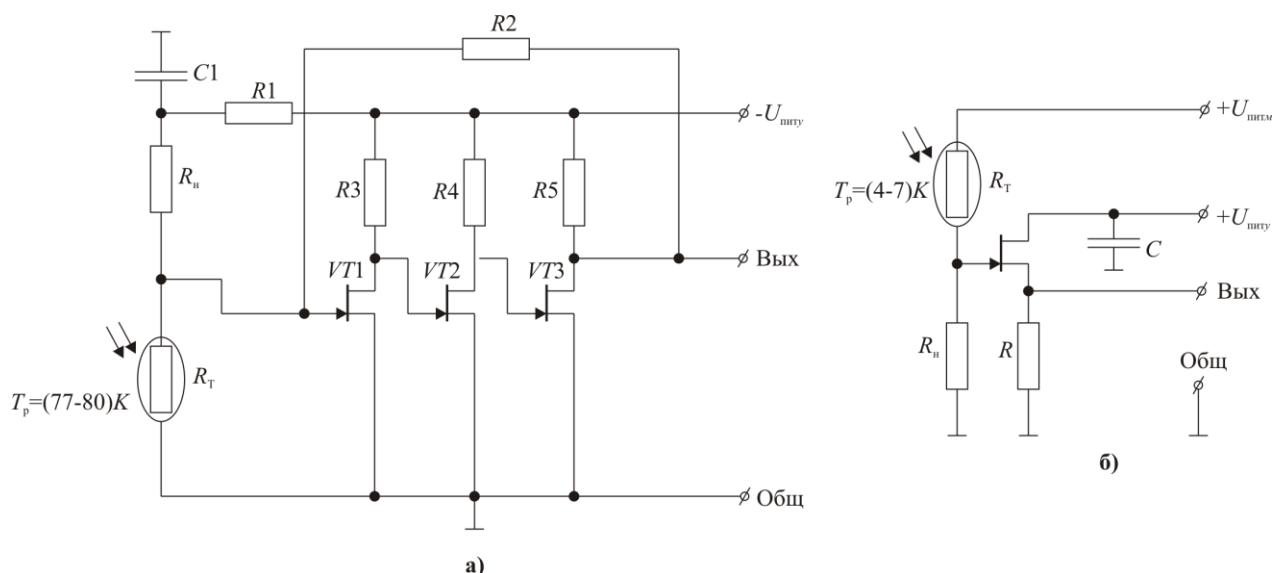


Принципиальная электрическая схема ФПУ на основе высокоомных фоторезисторов со схемой эмиттерного повторителя



Принципиальная электрическая схема ФПУ на основе высокоомных фоторезисторов со схемой истокового повторителя

Для снижения уровня собственных шумов электронного тракта ФПУ практикуется *охлаждение сопротивления нагрузки и элементов согласующего каскада до низкой температуры (6-100 K)*. В этом случае элементы как согласующих, так и усилительных каскадов выполняются, как правило, на полевых транзисторах.



Принципиальные электрические схемы ФПУ с охлаждаемыми предусилителями:

- а)** – транзистор с изолированным затвором; **б)** – транзистор с каналом p – типа;
 T_p – рабочая температура

5. Контрольные вопросы

1. На какие группы делят функциональные фоторезисторы по значению темнового сопротивления и уровням собственных шумов?
2. Какие схемы согласования применяют для низкоомных фоторезисторов?
3. Какие схемы согласования применяют для высокоомных фоторезисторов?
4. Изобразите типовую структурную схему фотоприемника на ФФР и назовите ее блоки.

Список использованных источников

1. Лаврентьев, Б. Ф. Схемотехника электронных средств : учебное пособие для вузов / Б. Ф. Лаврентьев .— Москва : Академия, 2010 .— 335 с. : ил. — (Высшее профессиональное образование. Радиоэлектроника) .— Библиогр. в конце кн. — ISBN 978-5-7695-5898-6 (в пер.) . 14 экз.
2. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. Учебник для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2004. – 472 с.
3. Парвулюсов Ю.Б. Проектирование оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для вузов / Ю.Б.Парвулюсов, В.П.Солдатов, Ю.Г.Якушенков; Под ред. Ю.Г.Якушенкова . – М. : Машиностроение, 1990 . – 431 с.
4. Быстров Ю.А. Электронные приборы и устройства на их основе : справ.кн. / Ю.А.Быстров, С.А.Гамкрелидзе, Е.Б.Иссерлин, В.П.Черепанов; Под ред.Ю.А. Быстрова . – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : РадиоСофт, 2002 .– 656 с.

Практическое занятие № 5

ФПУ С ПРОТИВОШУМОВОЙ И ЧАСТОТНОЙ КОРРЕКЦИЯМИ

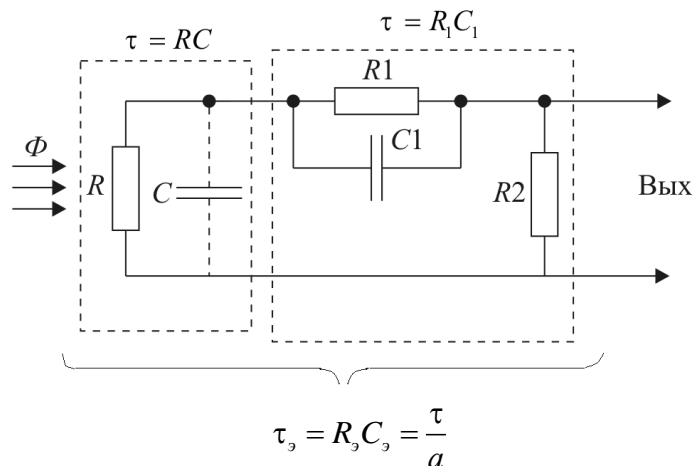
Цель работы: получение практических навыков расчета базовых схем противозумовой и частотной коррекции.

Задачи работы: получение практических навыков расчета элементов и параметров схем противозумовой и частотной коррекции.

..

2. Общие положения (теоретические сведения)

Для достижения максимального соотношения сигнал/шум в согласующих каскадах могут использоваться схемы противозумовой коррекции. Если постоянная времени приемника излучения больше минимальной длительности регистрируемого импульса, то применяют специальные меры коррекции инерционности фотоприемника.



Функциональная схема цепи коррекции постоянной времени фотоприемника

Приемник излучения можно представить в виде *апериодического звена* с постоянной времени $\tau = RC$, равной времени рекомбинации носителей заряда.

Последовательное соединение фотоприемника с дифференцирующим звеном, постоянная времени которого равна постоянной времени фотоприемника, эквивалентно некоторому новому апериодическому звену с постоянной времени

$$\tau_s = R_s C_s = \frac{\tau}{a} \quad \text{где } a = \frac{R_1 + R_2}{R_2}, \quad \tau_s = \frac{\tau R_2}{R_1 + R_2}.$$

Т.к. $a > 1$, то $\tau_s < \tau$ и система становится более быстродействующей. Однако, при этом возрастает уровень шумов. Если спектральная плотность шума убывает обратно пропорционально частоте, то шум при коррекции увеличивается меньше, чем в a раз, а СКО увеличивается в γ^2 раз, где

$$\gamma^2 = 1 + \frac{\frac{a^2 + 1}{2} \ln \frac{1 + (2\pi f_s \tau)^2}{1 + (2\pi f_n \tau)^2}}{\ln \frac{f_s}{f_n}};$$

При $f_s/f_n = 100$ $\gamma \approx 2,5$. Следовательно напряжение шума на выходе электронного тракта при введении коррекции увеличивается в меньшей степени, чем уменьшается постоянная времени ФПУ.

3. Задание на работу (рабочее задание)

Рассчитать параметры схемы противозумовой коррекции.

4. Ход работы (порядок выполнения работы)

1. Определить постоянную времени ФПУ $\tau = RC$.
2. Рассчитать эквивалентную постоянную времени $\tau_э = \frac{\tau R_2}{R_1 + R_2}$.
3. Рассчитать во сколько раз увеличится СКО шума на выходе ФПУ в заданной полосе пропускания ФПУ

$$\gamma^2 = 1 + \frac{\frac{a^2 + 1}{2} \ln \frac{1 + (2\pi f_с \tau)^2}{1 + (2\pi f_n \tau)^2}}{\ln \frac{f_с}{f_n}}.$$

5. Контрольные вопросы

1. Для чего используется противошумовая коррекция?
2. Как влияет противошумовая коррекция на уровень собственных шумов ФПУ?

Список использованных источников

1. Лаврентьев, Б. Ф. Схемотехника электронных средств : учебное пособие для вузов / Б. Ф. Лаврентьев .— Москва : Академия, 2010 .— 335 с. : ил. — (Высшее профессиональное образование. Радиоэлектроника) .— Библиогр. в конце кн. — ISBN 978-5-7695-5898-6 (в пер.) . 14 экз.
2. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. Учебник для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2004. – 472 с.
3. Парвулюсов Ю.Б. Проектирование оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для вузов / Ю.Б.Парвулюсов, В.П.Солдатов, Ю.Г.Якушенков; Под ред. Ю.Г.Якушенкова . – М. : Машиностроение, 1990 . – 431 с.
4. Быстров Ю.А. Электронные приборы и устройства на их основе : справ.кн. / Ю.А.Быстров, С.А.Гамкрелидзе, Е.Б.Иссерлин, В.П.Черепанов; Под ред.Ю.А. Быстрова . – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : РадиоСофт, 2002 .– 656 с.

Практическое занятие № 6

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФПУ

Цель работы: получение практических навыков расчета основных параметров фотоприемных устройств на фоторезисторах и фотодиодах.

Задачи работы: расчет допустимого уровня собственных шумов электронного тракта, верхней граничной частоты сигнала, ширины полосы пропускания, коэффициента усиления электронного тракта, коэффициента регулирования чувствительности в канале, АРУ и темнового сопротивления (или темнового тока) фотоприемника.

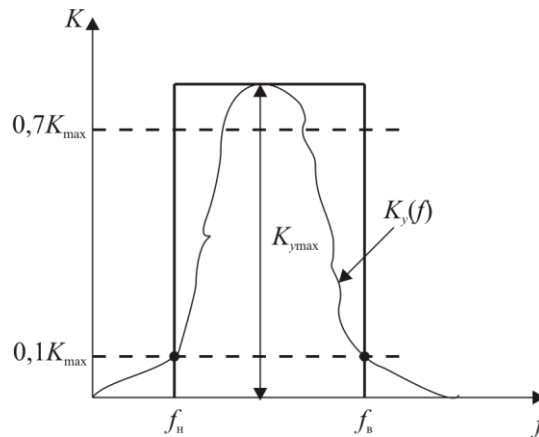
2. Общие положения (теоретические сведения)

Обнаружительная способность может быть выражена через параметры ФПУ и параметры электронного тракта по следующей формуле:

$$D^* = \frac{S_U \sqrt{A_\phi \Pi}}{U_{ш}},$$

где A_ϕ – площадь чувствительного слоя ФПУ; $U_{ш}$ – напряжение собственных шумов приемника; Π – эффективная (эквивалентная) шумовая полоса электронного тракта, Гц.

Эффективная шумовая полоса – полоса пропускания электронного тракта ФПУ, представленного в виде полосы идеального фильтра с прямоугольной АЧХ и амплитудой, равной максимальному значению коэффициента усиления реальной характеристики, эквивалентной по передаче мощности реальному фильтру с произвольной АЧХ.



К расчету эквивалентной шумовой полосы

В общем виде эквивалентная шумовая полоса может быть рассчитана по формуле:

$$\Pi = \int \frac{K_y^2(f)}{K_{y,max}^2} df.$$

Суммарный уровень шума на выходе фотоприемника можно выразить через обнаружительную способность по формуле:

$$U_{ш} = \frac{S_U \sqrt{A_\phi \Pi}}{D^*},$$

$$\Phi_\Pi = \frac{1}{D^*},$$

где Φ_Π – удельный пороговый поток.

Φ_Π показывает минимальное среднеквадратическое значение потока излучения, при котором среднеквадратическое значение напряжения на выходе устройства равно среднеквадратическому значению напряжения шума в единичной полосе частот, отнесенной к единичной площади фоточувствительного элемента.

Вначале определяется допустимый уровень шумов электронного тракта, приведенный ко входу в единичной полосе пропускания:

$$U_{ш} = \sqrt{U_{ш(эл)}^2 + U_{ш(\Pi)}^2},$$

$$U_{ш(эл)} = \sqrt{U_{ш}^2 - U_{ш(\Pi)}^2}.$$

Производится расчет полосы пропускания электронного тракта. В случае синусоидальной модуляции потока излучения ширина полосы пропускания выражается формулой:

$$\Delta f_{0,7} = 2f_m.$$

При прямоугольной модуляции потока излучения полоса пропускания определяется по формуле:

$$\Delta f_{0,7} = f_{\epsilon} - f_n.$$

$$f_{\epsilon} = \frac{1}{2\tau_{\min}}; \quad f_n = \frac{\ln\left(\frac{1}{1-\sigma}\right)}{2\pi\tau_{\max}},$$

где τ_{\min} – минимальная длительность прямоугольного импульса на входе ФПУ; τ_{\max} – максимальная длительность прямоугольного импульса на входе ФПУ; σ – спад плоской вершины прямоугольного импульса.

Для верхней границы частоты электронного тракта f_v должно выполняться условие:

$$f_{\epsilon} \leq \frac{1}{2\pi\tau_n},$$

где τ_n – постоянная времени фотоприемника.

Определяется коэффициент усиления электронного тракта по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{u(вых)max}}{U_u} = \frac{U_{u(вых)max} \cdot D^*}{S_U \sqrt{A_{\phi} \Pi_{0,1}}}.$$

$$\Pi_{0,1} = f_{\max} \cdot \ln\left(\frac{f_{\epsilon}}{f_n}\right).$$

$$\frac{\Pi_{0,1}}{\Delta f} = 1,01 \dots 1,57.$$

$$\Pi_{0,1} = 1,22 \Delta f_{0,7}.$$

Пороговый поток излучения на входе ФПУ определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{пор}} = \frac{\psi U_u}{S_U},$$

где ψ – требуемое отношение сигнал/шум; U_u – среднеквадратическое значение напряжения на выходе ФПУ при отсутствии излучения.

Для выбора схемы построения усилителя определяем максимальный поток излучения по формуле:

$$\Phi_{\max} = \Phi_{\Pi} \cdot D,$$

где D – динамический диапазон ФПУ по мощности.

Определяем максимальное напряжение фотосигнала на входе ФПУ при воздействии максимального потока излучения:

$$U_{C\max} = \Phi_{\max} S_U K_U.$$

Если $U_{C\max}$ на выходе ФПУ превышает максимально допустимое напряжение на выходе электронного тракта, то необходимо введение схемы АРУ с регулируемым коэффициентом усиления:

$$K_p = \frac{U_{C\max}}{U_{(вых)max}}.$$

На основании данных, полученных в результате расчета (допустимого уровня собственных шумов электронного тракта, верхней граничной частоты сигнала, ширины полосы пропускания, коэффициента усиления электронного тракта, коэффициента регулирования чувствительности в канале, АРУ и темнового сопротивления фотоприемника) производится выбор активных элементов электрической схемы ФПУ.

Последовательность расчета, рассмотренная выше, может быть использована также для ФПУ на основе фотодиодов с учетом параметров фотодиодов и выражения для их определения.

3. Задание на работу (рабочее задание)

Рассчитать основные параметры ФПУ.

4. Ход работы (порядок выполнения работы)

Исходными данными для расчета ФПУ и выбора элементов его электронной схемы являются:

- ❖ значение удельной обнаружительной способности D^* на заданной рабочей частоте модуляции
- ❖ максимальное выходное напряжение фотосигнала $U_{C\max}$
- ❖ максимальное допустимое напряжение шума на выходе $U_{ш(вых)\max}$.

Заданы также параметры n/n фоточувствительного элемента (напряжение шума, темновое сопротивление, постоянная времени, размеры приемной площадки, интегральная вольтовая чувствительность S_U).

1. Рассчитать обнаружительную способность ФПУ:

$$D^* = \frac{S_U \sqrt{A_\phi \Pi}}{U_{ш}},$$

где A_ϕ – площадь чувствительного слоя ФПУ; $U_{ш}$ – напряжение собственных шумов приемника; Π – эффективная (эквивалентная) шумовая полоса электронного тракта, Гц.

2. Рассчитать суммарный уровень шума на выходе фотоприемника:

$$U_{ш} = \frac{S_U \sqrt{A_\phi \Pi}}{D^*}.$$

3. Определить допустимый уровень шумов электронного тракта, приведенный ко входу в единичной полосе пропускания:

$$U_{ш} = \sqrt{U_{ш(эл)}^2 + U_{ш(П)}^2},$$

$$U_{ш(эл)} = \sqrt{U_{ш}^2 - U_{ш(П)}^2}.$$

4. Произвести расчет полосы пропускания электронного тракта. В случае синусоидальной модуляции потока излучения ширина полосы пропускания выражается формулой:

$$\Delta f_{0,7} = 2f_m.$$

При прямоугольной модуляции потока излучения полоса пропускания определяется по формуле:

$$\Delta f_{0,7} = f_s - f_n.$$

$$f_{\epsilon} = \frac{1}{2\tau_{\min}}; \quad f_{\eta} = \frac{\ln\left(\frac{1}{1-\sigma}\right)}{2\pi\tau_{\max}},$$

где τ_{\min} – минимальная длительность прямоугольного импульса на входе ФПУ; τ_{\max} – максимальная длительность прямоугольного импульса на входе ФПУ; σ – спад плоской вершины прямоугольного импульса.

Для верхней границы частоты электронного тракта $f_{\text{в}}$ должно выполняться условие:

$$f_{\epsilon} \leq \frac{1}{2\pi\tau_n},$$

где τ_n – постоянная времени фотоприемника.

5. Определить коэффициент усиления электронного тракта по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{u(\text{вых})\max}}{U_{u\text{}}} = \frac{U_{u(\text{вых})\max}}{S_U \sqrt{A_{\phi} \Pi_{0,1}}} \cdot D^*.$$

$$\Pi_{0,1} = f_{\max} \cdot \ln\left(\frac{f_{\epsilon}}{f_{\eta}}\right).$$

$$\frac{\Pi_{0,1}}{\Delta f} = 1,01 \dots 1,57.$$

$$\Pi_{0,1} = 1,22 \Delta f_{0,7}.$$

6. Рассчитать пороговый поток излучения на входе ФПУ:

$$\Phi_{\text{пор}} = \frac{\psi U_{u\text{}}}{S_U},$$

где ψ – требуемое отношение сигнал/шум; $U_{u\text{}}$ – среднеквадратическое значение напряжения на выходе ФПУ при отсутствии излучения.

7. Для выбора схемы построения усилителя определить максимальный поток излучения по формуле:

$$\Phi_{\max} = \Phi_{\Pi} \cdot D,$$

где D – динамический диапазон ФПУ по мощности.

8. Определить максимальное напряжение фотосигнала на входе ФПУ при воздействии максимального потока излучения:

$$U_{C\max} = \Phi_{\max} S_U K_U.$$

9. Если $U_{C\max}$ на выходе ФПУ превышает максимально допустимое напряжение на выходе электронного тракта, то необходимо введение схемы АРУ с регулируемым коэффициентом усиления:

$$K_{\delta} = \frac{U_{C\max}}{U_{(\text{дл} \delta)\max}}.$$

На основании данных, полученных в результате расчета (допустимого уровня собственных шумов электронного тракта, верхней граничной частоты сигнала, ширины

полосы пропускания, коэффициента усиления электронного тракта, коэффициента регулирования чувствительности в канале, АРУ и темнового сопротивления фотоприемника) производится выбор активных элементов электрической схемы ФПУ.

Последовательность расчета, рассмотренная выше, может быть использована также для ФПУ на основе фотодиодов с учетом параметров фотодиодов и выражения для их определения.

5. Контрольные вопросы

1. По какой формуле определяется удельная обнаружительная способность?
2. Что такое эффективная шумовая полоса?
3. По какой формуле определяется ширина полосы пропускания электронного тракта в случае синусоидальной модуляции потока излучения?
4. По какой формуле определяется ширина полосы пропускания электронного тракта в случае прямоугольной модуляции потока излучения?

Список использованных источников

1. Лаврентьев, Б. Ф. Схемотехника электронных средств : учебное пособие для вузов / Б. Ф. Лаврентьев .— Москва : Академия, 2010 .— 335 с. : ил. — (Высшее профессиональное образование. Радиоэлектроника) .— Библиогр. в конце кн. — ISBN 978-5-7695-5898-6 (в пер.) . 14 экз.
2. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. Учебник для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2004. – 472 с.
3. Парвулюсов Ю.Б. Проектирование оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для вузов / Ю.Б.Парвулюсов, В.П.Солдатов, Ю.Г.Якушенков; Под ред. Ю.Г.Якушенкова . – М. : Машиностроение, 1990 . – 431 с.
4. Быстров Ю.А. Электронные приборы и устройства на их основе : справ.кн. / Ю.А.Быстров, С.А.Гамкрелидзе, Е.Б.Иссерлин, В.П.Черепанов; Под ред.Ю.А. Быстрова . – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : РадиоСофт, 2002 .– 656 с.

Практическое занятие № 7

РАСЧЕТ СХЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАКТА ФПУ

Цель работы: получение практических навыков расчета схем для автоматической регулировки коэффициента усиления электронного тракта ФПУ.

Задачи работы: получение практических навыков расчета схем для автоматической регулировки коэффициента усиления электронного тракта ФПУ.

2. Общие положения (теоретические сведения)

Управляемый напряжением усилитель на основе умножителя

Напряжение выхода $U_{вых}$ связано в данном случае с входным напряжением $U_{вх}$ следующим соотношением:

$$U_{вых} = U_{упр} \cdot U_{вх}.$$

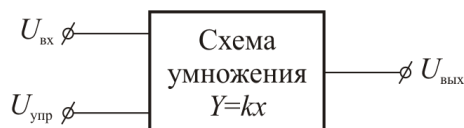


Схема управляемого напряжением усилителя на основе умножителя

Изменяя напряжение управления, которое является одним из сомножителей, можно регулировать коэффициент передачи усилителя.

Схема АРУ на 4-х квадрантном перемножителе 526 ПС-1, ПС-2

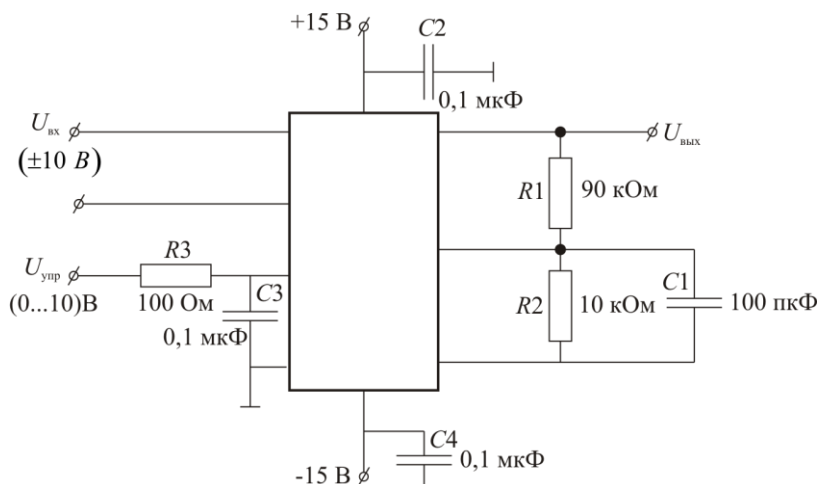
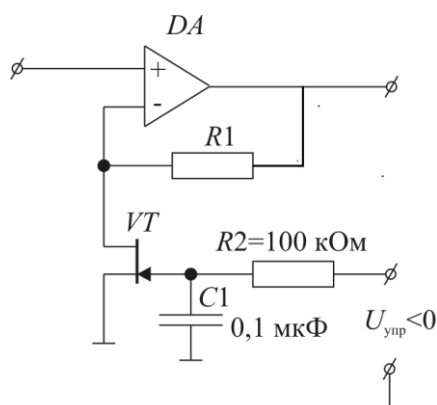


Схема АРУ на 4-ех квадрантном перемножителе 526ПС-1, ПС-2

В данном случае, выходное напряжение $U_{вых}$ связано с входным $U_{вх}$ и напряжением управления $U_{упр}$ следующей зависимостью:

$$U_{вых} = U_{вх} \left(\frac{U_{упр}}{1 В} \right).$$

Регулировка усиления с помощью полевого транзистора



Регулирование усиления с помощью ПТ

Сопротивление каналов транзистора $R_{си}$ включено в цепь отрицательной обратной связи (ООС) неинвертирующего усилителя, его величину можно изменять отрицательного

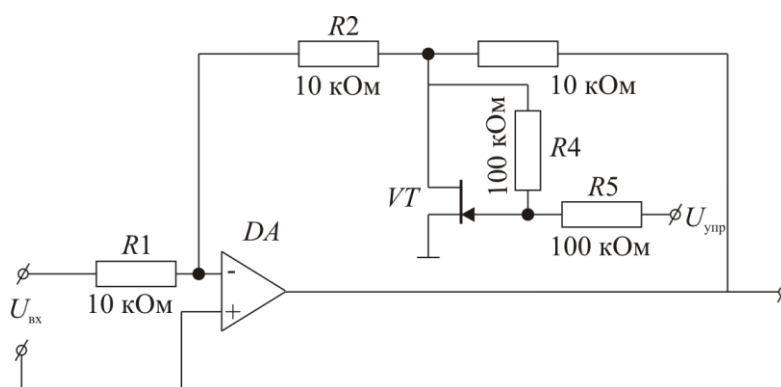
управляющего напряжения, подаваемого на затвор. Тогда, коэффициент усиления изменяется по следующей формуле:

$$K = 1 + \frac{R_1}{R_{CH}}$$

Чтобы не возникало искажение сигнала, *ПТ* должен работать на линейном участке характеристики сток-исток. Искажение вызывается тем, что в большом сигнале напряжение сток-исток повышается и происходит модуляция сопротивления канала, а следовательно, и коэффициента усиления входным сигналом.

Необходимо выбирать *ПТ* с большим напряжением отсечки для увеличения диапазона регулировки коэффициента усиления. Точность и стабильность коэффициента усиления ограничивается стабильностью параметров *ПТ*.

Для уменьшения искажений можно включить *ПТ* в качестве одного из сопротивлений *T* – образной *ОС* усилителя. При этом уменьшается размах сигнала на транзисторе и его влияние на коэффициент усиления.

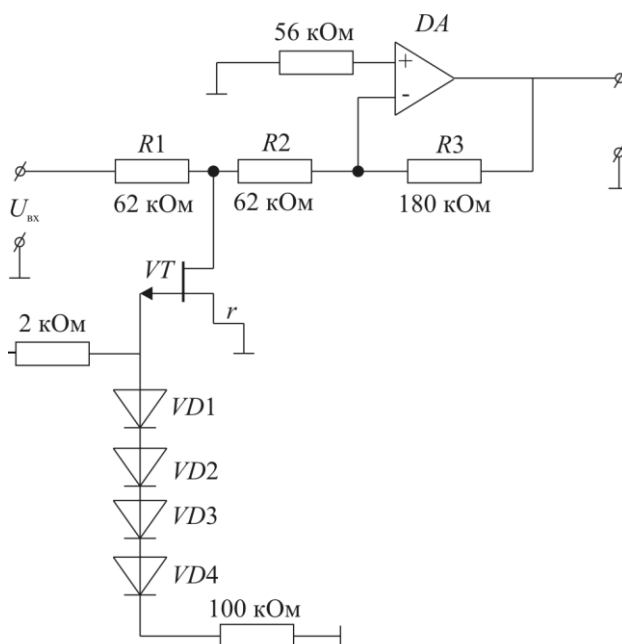


Включение ПТ в Т – образную обратную связь

Для уменьшения нелинейности характеристик выбирают $R_4 = R_5$; $R_5 \gg R_2 \square R_{CH}$.

Усилители с управлением аналоговым сигналом

Усилители с делителем напряжения с переменным затуханием



Усилитель с делителем напряжения с переменным затуханием

Здесь используется логарифмическая зависимость между напряжением на затворе и сопротивлением сток – исток *ПТ*. Набор диодов *VD1 – VD4* обеспечивает напряжение на затворе *ПТ*, который является нелинейной функцией управляющего напряжения. В результате на выходе сигнал является линейной функцией управляющего напряжения.

Для оценки минимального и максимального коэффициентов ослабления можно пользоваться следующими выражениями:

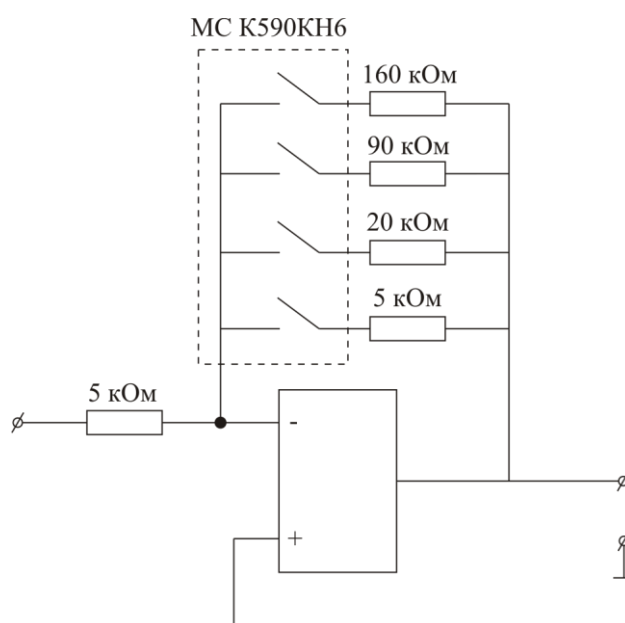
$$K_{\text{ослmin}} = \frac{R3}{R1 + R2} \text{ при } U_{\text{уп}} \geq 7B;$$

$$K_{\text{ослmax}} = \frac{R3}{R2} \frac{r}{R1 + r} \text{ при } U_{\text{уп}} = 0,$$

где *r* – сопротивление открытого канала полевого транзистора.

Усилители с цифровым управлением

Усилители с цифровым управлением коэффициентом усиления



Усилитель с цифровым управлением коэффициентом усиления

Схема представляет собой усилитель с цифровым управлением, выбор коэффициента усиления 1, 4, 16 или 32 осуществляется замыканием ключей, выполненных на МОП – транзисторах. На затвор такого транзистора подается логическая 1, в результате чего транзистор переходит в открытое состояние с сопротивлением канала 10-30 Ом, которым можно пренебречь по сравнению с сопротивлением обратной связи. В качестве такого аналогового ключа можно использовать *МС 590KH6*.

3. Задание на работу (рабочее задание)

Рассчитать параметры и элементы схем для автоматической регулировки коэффициента усиления электронного тракта ФПУ.

4. Ход работы (порядок выполнения работы)

1. Рассчитать коэффициент усиления схемы регулирования усиления с помощью ПТ.
2. Рассчитать значения сопротивлений для схемы регулирования усиления при включении ПТ в цепь обратной связи операционного усилителя.
3. Рассчитать минимальный и максимальный коэффициенты ослабления усилителя с делителем напряжения с переменным затуханием.
5. Разработать схему электрическую принципиальную усилителя с цифровым управлением коэффициентом усиления с использованием аналогового ключа 590 КН6.

5. Контрольные вопросы

1. Для чего в схеме управления коэффициентом усиления с помощью полевого транзистора необходимо выбирать транзистор с большим значением напряжения отсечки?
2. Для чего в схеме управления коэффициентом усиления с помощью полевого транзистора можно включить полевой транзистор вместо одного из сопротивлений Т-образной обратной связи усилителя?
3. Изобразите схему регулирования усиления с помощью полевого транзистора.
4. Изобразите схему усилителя с делителем напряжения с переменным затуханием.
5. Изобразите схему усилителя с цифровым управлением коэффициентом усиления.

Список использованных источников

1. Лаврентьев, Б. Ф. Схемотехника электронных средств : учебное пособие для вузов / Б. Ф. Лаврентьев .— Москва : Академия, 2010 .— 335 с. : ил. — (Высшее профессиональное образование. Радиоэлектроника) .— Библиогр. в конце кн. — ISBN 978-5-7695-5898-6 (в пер.) . 14 экз.
2. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. Учебник для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2004. – 472 с.
3. Парвулюсов Ю.Б. Проектирование оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для втузов / Ю.Б.Парвулюсов, В.П.Солдатов, Ю.Г.Якушенков; Под ред. Ю.Г.Якушенкова . – М. : Машиностроение, 1990 . – 431 с.
4. Быстров Ю.А. Электронные приборы и устройства на их основе : справ.кн. / Ю.А.Быстров, С.А.Гамкредидзе, Е.Б.Иссерлин, В.П.Черепанов; Под ред.Ю.А. Быстрова . – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : РадиоСофт, 2002 .– 656 с.

Практическое занятие № 8

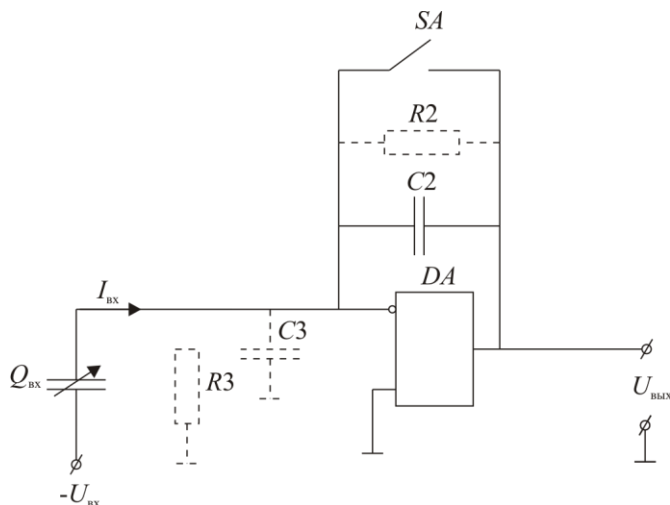
РАСЧЕТ СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЯ ЗАРЯДА ДЛЯ СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ПЗС

Цель работы: получение практических навыков расчета схемы усилителя заряда для считывания информации из ПЗС.

Задачи работы: получение практических навыков расчета параметров и элементов схем усилителей заряда для считывания информации из ПЗС.

2. Общие положения (теоретические сведения)

Схема формирует выходное напряжение пропорционально изменению заряда на ее входе. В качестве источника сигнала может быть выходной конденсатор ПЗС, пьезодатчик, емкостный датчик. Усилитель может быть построен по схеме *инвертирующего входного тока*.



Усилитель, построенный по схеме инвертирующего входного тока

$C_2 = 10 \text{ нФ} \dots 10 \text{ нФ}$ – интегрирующий конденсатор; SA – ключ для разряда конденсатора C_2 ; R_2 – обеспечивает обратную связь по постоянному току (ограничение коэффициента усиления в области нижних частот). R_2 может существовать в виде сопротивления утечек монтажа сопротивлению ключа SA . R_3 – входное сопротивление операционного усилителя (OU); C_3 – входная емкость OU и соединительных проводов.

Входной заряд, измеряемый схемой, связан с входным током по формуле:

$$I_{\text{вх}} = -\frac{dQ_{\text{вх}}}{dt}.$$

Входной ток усилителя интегрируется конденсатором C_2 , в результате напряжение на выходе схемы пропорционально заряду. Коэффициент передачи заряда определяется по формуле:

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta Q} = -\frac{1}{C_2 \left(1 + \frac{1}{K_u} + \frac{C_3}{C_2 K_U} \right)^2} \approx -\frac{1}{C_2}.$$

Данная схема имеет полосу пропускания, ограниченную верхней и нижней частотой:

$$f_n = \frac{1}{2\pi R_2 C_2},$$

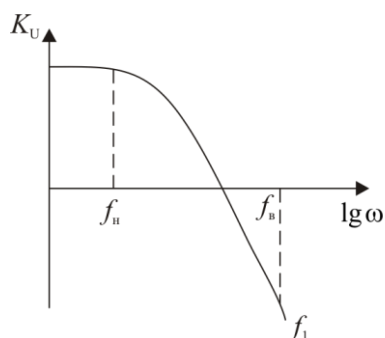
$$f_s = \frac{C_2}{C_2 + C_3} f_1,$$

где f_1 – частота единичного усиления полностью скорректированного усилителя.

Напряжение смещения на выходе усилителя выражается следующей формулой:

$$U_{см(вых)} = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) U_{см(вх)} + I_{см(вх)} R_2,$$

где $U_{см(вх)}$ и $I_{см(вх)}$ определяются из справочных данных на операционные усилители.



К пояснению полосы пропускания

Выходной дрейф усилителя заряда определяется по формуле:

$$\frac{dU_{вых}}{dt} = \frac{U_{см(вх)}}{C_2 R_2} + \frac{I_{см(вх)}}{C_2}.$$

Необходимо выбирать ОУ с малыми значениями напряжения и тока смещения на выходе.

3. Задание на работу (рабочее задание)

Рассчитать параметры и элементы схем усилителей заряда для считывания информации из ПЗС.

4. Ход работы (порядок выполнения работы)

1. Рассчитать коэффициент передачи усилителя заряда.
2. Рассчитать нижнюю граничную частоту пропускания усилителя заряда.
3. Рассчитать верхнюю граничную частоту пропускания усилителя заряда.
4. Рассчитать выходной дрейф усилителя заряда.
5. Выбирать по справочнику ОУ для усилителя заряда с малыми значениями напряжения и тока смещения на выходе.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое коэффициент передачи усилителя заряда?
2. По какой формуле определяется напряжение смещения на выходе усилителя заряда?
3. По какой формуле определяется выходной дрейф усилителя заряда?
4. Изобразить схему усилителя заряда и объяснить назначение ее элементов.

Список использованных источников

1. Лаврентьев, Б. Ф. Схемотехника электронных средств : учебное пособие для вузов / Б. Ф. Лаврентьев .— Москва : Академия, 2010 .— 335 с. : ил. — (Высшее профессиональное образование. Радиоэлектроника) .— Библиогр. в конце кн. — ISBN 978-5-7695-5898-6 (в пер.) . 14 экз.

2. Якушков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. Учебник для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2004. – 472 с.
3. Парвлюсов Ю.Б. Проектирование оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для вузов / Ю.Б.Парвлюсов, В.П.Солдатов, Ю.Г.Якушков; Под ред. Ю.Г.Якушкова . – М. : Машиностроение, 1990 . – 431 с.
4. Быстров Ю.А. Электронные приборы и устройства на их основе : справ.кн. / Ю.А.Быстров, С.А.Гамкредидзе, Е.Б.Иссерлин, В.П.Черепанов; Под ред.Ю.А. Быстрова . – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : РадиоСофт, 2002 .– 656 с.