

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

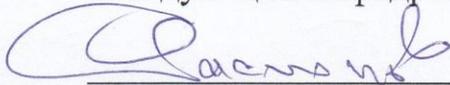
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

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)**  
**«Электроника систем ориентации, стабилизации и навигации»**

**основной профессиональной образовательной программы**  
**высшего образования – программы бакалавриата**

по направлению подготовки  
**24.03.02 – Опотехника**

с направленностью (профилем)  
**Оптико-электронные приборы и системы**

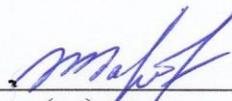
Форма(ы) обучения: *очная*

Идентификационный номер образовательной программы: 240302-01-2022

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 активных фильтров верхних и нижних частот первого порядка	4
Практическое занятие № 2 Расчет активных фильтров верхних и нижних частот второго порядка	8
Практическое занятие № 3 Расчет усилителей с управлением аналоговым сигналом	10
Практическое занятие № 4 Расчет усилителей с цифровым управлением	14
Практическое занятие № 5 Расчет схемы усилителя заряда	17
Практическое занятие № 6 Расчет основных параметров схем преобразователей ток-напряжение	22
Практическое занятие № 7 Расчет элементов схемы включения четырехплощадочного ФПУ, работающего с модулированным потоком излучения.	47

## Практическое занятие № 1

### РАСЧЕТ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ВЕРХНИХ И НИЖНИХ ЧАСТОТ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

#### 1. Цель и задачи работы

**Цель работы:** получение практических навыков расчета активных фильтров верхних и нижних частот первого порядка.

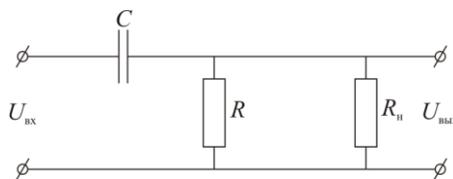
**Задачи работы:** получение практических навыков расчета элементов схемы параметров активных фильтров верхних и нижних частот первого порядка.

#### 2. Общие положения (теоретические сведения)

В общем случае передаточная функция фильтра нижних частот может быть записана в следующем виде:

$$K(p) = \frac{K_0}{1 + a_1 p}, \quad (11)$$

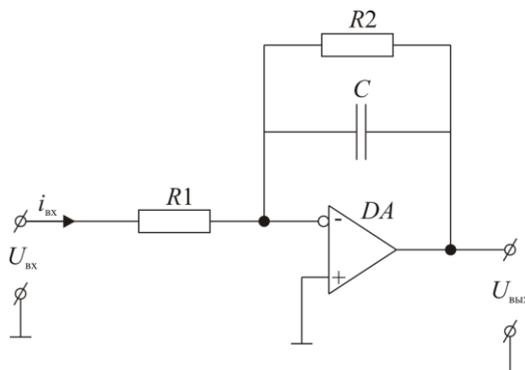
где  $K_0$  - коэффициент передачи в полосе пропускания;  $a_1$  - постоянная времени фильтра. Для получения передаточной функции фильтра высоких частот, в формуле (11) необходимо делать следующую замену:  $p \rightarrow 1/p$ , а в электрической принципиальной схеме – поменять местами резистор и конденсатор.



#### Пример пассивного фильтра верхних частот I порядка

$$K(p) = \frac{K_0}{1 + \frac{a_1}{p}} \Rightarrow K(p) = \frac{K_0 p}{a_1 + p}.$$

#### Схема активного фильтра нижних частот первого порядка



$$K(p) = \frac{k}{Tp + 1}.$$

### РАСЧЕТ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ

Исходными данными для расчета инвертирующего фильтра нижних частот являются:

- коэффициент передачи в полосе пропускания  $K_0$ ;
- частота среза фильтра  $f_c$ ;
- емкость конденсатора  $C$ .

$$R_2 = \frac{a_1}{2\pi f_{cp} C};$$

$$R_1 = -\frac{R_2}{K_0}.$$

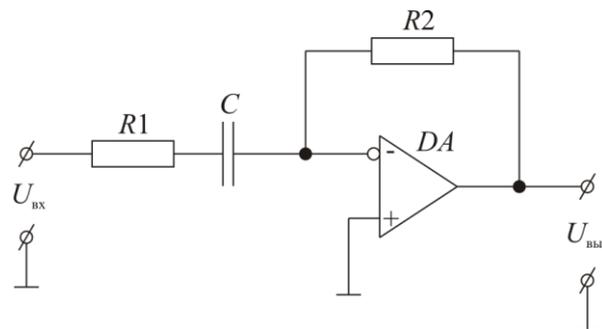
Фильтр высоких частот при инвертирующем включении ОУ имеет передаточную функцию следующего вида:

$$K(p) = \frac{-\frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{1}{R_1 C} \cdot \frac{1}{p}};$$

$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_{cp} a_1 C};$$

$$R_2 = -K_1 \cdot K_{OC}.$$

### Схема активного фильтра верхних частот первого порядка



$$K(p) = \frac{T_1 p}{T_2 p + 1}.$$

### 3. Задание на работу (рабочее задание)

Расчитать параметры схем ФНЧ ФВЧ на операционных усилителях.

#### 4. Ход работы (порядок выполнения работы)

1. Определить коэффициент усиления по напряжению операционного усилителя в инвертирующей схеме включения и входное сопротивление, если сопротивление обратной связи  $R_{oc} = 100$  кОм, а сопротивление в прямой цепи  $R1 = 10$  кОм.

Ответ:  $K_U = -10$ .  $R_{вх} = 10$  кОм.

2. Рассчитать коэффициент усиления инвертирующего ФНЧ, у которого постоянная времени  $T = 0,1$  с, емкость интегрирующего конденсатора  $C = 1$  мкФ и сопротивление в прямой цепи  $100$  кОм. Ответ:  $K = -1$ .

3. При выполнении какого условия напряжение на выходе дифференциального усилителя определяется по формуле  $U_{вых} = U_{вх2} - U_{вх1}$ . Ответ:  $R1 = R2 = R3 = R4$ .

4. При выполнении какого условия напряжение на выходе дифференциального усилителя определяется по формуле  $U_{âõ} = \frac{R2}{R1}(U_{âõ2} - U_{âõ1})$ . Ответ:  $R3/R4 = R1/R2$

5. Рассчитать сопротивление в обратной связи неинвертирующего усилителя, если  $K_U = 11$ , а сопротивление в прямой цепи  $R1 = 20$  кОм. Ответ:  $R_{oc} = 200$  кОм.

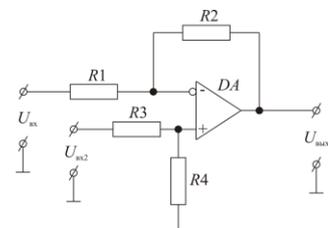
6. Какое сопротивление необходимо включить в прямую цепь интегратора, чтобы получить постоянную времени  $T = 2$  с при емкости интегрирующего конденсатора  $3,3$  мкФ.

Ответ:  $R = 606$  кОм.

7. В схеме инвертирующего сумматора сопротивление обратной связи  $R_{oc} = 100$  кОм. Рассчитать значения сопротивлений в прямой цепи, чтобы коэффициенты передачи по первому и второму входам сумматора были равны:  $K_1 = -5$ ,  $K_2 = -2$ .

8. Какое напряжение необходимо подать на первый вход дифференциального усилителя, чтобы получить на выходе  $U_{вых} = 3$  В, если на второй вход подано напряжение  $U_{вх2} = 4$  В, а в схему включены сопротивления  $R1 = 10$  кОм,  $R2 = 20$  кОм,  $R3 = 10$  кОм,  $R4 = 5$  кОм.

Ответ:  $U_{вх1} = 0,5$  В.

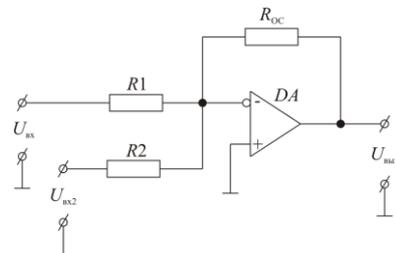


9. Рассчитать сопротивление  $R2$  в схеме дифференциального усилителя, чтобы получить на выходе  $U_{вых} = 3$  В, если на первый вход подано напряжение  $U_{вх1} = 0,5$  В, на второй вход подано напряжение  $U_{вх2} = 4$  В, а в схему включены сопротивления  $R1 = 10$  кОм,  $R3 = 10$  кОм,  $R4 = 5$  кОм.

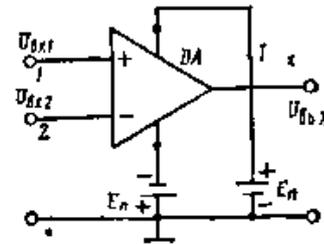
Ответ:  $R2 = 20$  кОм.

10. Какое напряжение необходимо подать на первый вход схемы, чтобы получить на выходе  $U_{вых} = 3$  В, если на второй вход подано напряжение  $U_{вх2} = 4$  В, а в схему включены сопротивления  $R1 = 10$  кОм,  $R2 = 20$  кОм,  $R_{oc} = 10$  кОм.

Ответ:  $U_{вх1} = -5$  В.



11. На вход 2 ОУ подается постоянное напряжение  $U_{вх2} = +2$  В, а на вход 1 – постоянное напряжение  $U_{вх1} = +1$  В. Воспользовавшись справочными данными ОУ, определить напряжение на его выходе.  
 Ответ:  $U_{вых} = -10$  В.



Справочные данные  $U_{п} = \pm 15$  В;  $U_{вых. max} = \pm 10$  В;  
 $K_u = 20 \cdot 10^3$ ;  $R_{вх} = 0,3$  МОм;  $R_n \geq 2$  кОм.

## 5. Контрольные вопросы

1. Чему равен коэффициент усиления инвертирующего ФНЧ первого порядка?
2. Какие параметры операционного усилителя относятся к статическим?
3. Чему равен коэффициент усиления инвертирующего ФВЧ первого порядка?

### Список использованных источников

1. Шука, А. А. Электроника : учеб. пособие для вузов / А. А. Шука ; под ред. А. С. Сигова .— СПб. : БХВ-Петербург, 2005 .– 800 с.
2. Скаржепа В.А. Электроника и микросхемотехника: учебник в 2 ч. Ч.1. Электронные устройства информационной автоматики / В.А. Скаржепа, А.Н. Луценко; под общ. ред. А.А. Краснопрошеной. – Киев: Выща школа. 1989. – 430 с.
3. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов / Ю.С. Забродин – М.: Высш. школа, 1982. – 496 с.
4. Токхейм Р. Основы цифровой электроники / Р. Токхейм; пер. с англ. В.А. Курочкина, В.М. Матвеева; под ред. Е.К. Масловского. – М.: Мир, 1988. – 392 с.

## Практическое занятие № 2

### РАСЧЕТ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ВЕРХНИХ И НИЖНИХ ЧАСТОТ ВТОРОГО ПОРЯДКА

#### 1. Цель и задачи работы

**Цель работы:** получение практических навыков расчета активных фильтров верхних и нижних частот второго порядка.

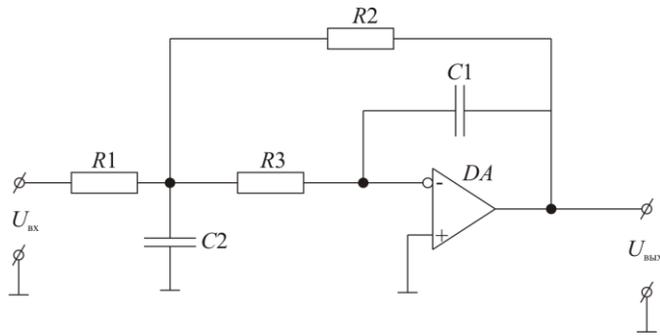
**Задачи работы:** получение практических навыков расчета элементов схемы параметров активных фильтров верхних и нижних частот второго порядка.

#### 2. Общие положения (теоретические сведения)

##### ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ ВТОРОГО ПОРЯДКА

$$K(p) = \frac{K_0}{1 + a_1 p + b_1 p^2}.$$

Активные фильтры нижних частот второго порядка могут быть реализованы с помощью одного операционного усилителя, включенного по инвертирующей схеме, и двух реактивных элементов (конденсаторов) – **структура Рауха**.



$$K(p) = \frac{-\frac{R_2}{R_1}}{1 + C_1 \left( R_2 + R_3 + \frac{R_2 - R_3}{R_1} \right) p + C_1 C_2 R_2 R_3 p^2}.$$

Исходными данными для расчета фильтра являются следующие, которые берутся из справочника:

- коэффициент передачи в полосе пропускания  $K_0$ ;
- частота среза фильтра  $f_c$ ;
- постоянная времени фильтра  $a_1$ ;
- коэффициент  $b_1$ .

Для проведения расчета данного вида фильтра необходимо задаться емкостями конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ ; требуется найти  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ .

$$R_2 = \frac{a_1 C_2 - \sqrt{a_1 C_2^2 - 4 C_1 C_2 b_1 (1 - K_0)}}{4 \pi f_{cp} C_1 C_2}.$$

Чтобы  $R_2$  не получился отрицательным,  $C_1$  и  $C_2$  необходимо выбирать из следующих условий:

$$\begin{cases} \frac{C_2}{C_1} \geq \frac{4b_1(1-K_0)}{a_1^2}, \\ R_3 = \frac{b_1}{4\pi^2 f_{cp}^2 C_1 C_2}; \end{cases}$$

$$K(0) = -\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_1 = \frac{R_2}{K(0)}.$$

Коэффициенты  $a_1$  и  $b_1$  выбираются из таблиц в зависимости от вида полинома, аппроксимирующего данный фильтр.

### 3. Задание на работу (рабочее задание)

Рассчитать параметры и элементы схемы фильтров второго порядков.

### 4. Ход работы (порядок выполнения работы)

1. Рассчитать сопротивление в прямой цепи инвертирующего интегратора, чтобы получить постоянную времени схемы  $T = 0,01$  с, если емкость интегрирующего конденсатора  $C = 0,18$  мкФ.

2. Какое сопротивление необходимо включить в прямую цепь интегратора, чтобы получить постоянную времени  $T = 2$  с при емкости интегрирующего конденсатора  $3,3$  мкФ.  
 Ответ:  $R = 606$  кОм.

3. Рассчитать коэффициент усиления инвертирующего апериодического усилителя, у которого постоянная времени  $T = 1$  с, емкость интегрирующего конденсатора  $C = 1$  мкФ и сопротивление в прямой цепи  $100$  кОм.

## 5. Контрольные вопросы

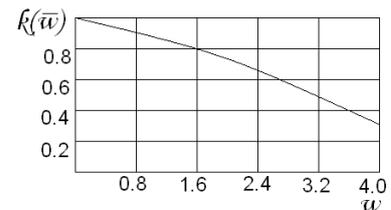
1. Для чего применяются фильтры?
2. Какие недостатки имеют пассивные фильтры?
3. Из какого условия выбираются конденсаторы в фильтре нижних частот второго порядка?
4. Как называется область частот, в которой фильтр мало ослабляет сигнал?
5. Какой вид имеет передаточная функция ФНЧ первого порядка?
6. Фильтр Баттерворта имеет следующий вид нормированной АЧХ

$$1. |K(\bar{\omega})| = \frac{1}{\sqrt{\bar{\omega}^{2n} + 1}}$$

$$2. |K(\bar{\omega})| = \frac{1}{\sqrt{\bar{\omega}^{2n} - 1}}$$

$$3. |K(\bar{\omega})| = \frac{1}{\sqrt{\bar{\omega}^2 + 1}}$$

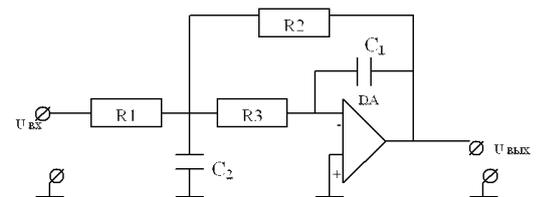
7. Определить по виду АЧХ какой это фильтр 4-ого порядка:



8. Значения  $C_1$  и  $C_2$  для фильтра нижних частот II порядка (см. рис.) выбираются из условия:

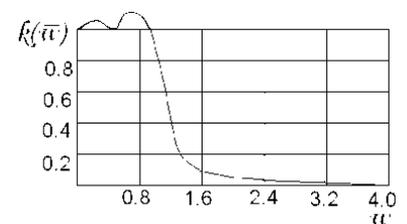
$$1. \frac{C_2}{C_1} \geq \frac{4B_1(1-K_0)}{a_1^2} \quad 2. \frac{C_2}{C_1} \leq \frac{4B_1(1-K_0)}{a_1^2}$$

$$3. \frac{C_2}{C_1} = \frac{4B_1(1-K_0)}{a_1^2}$$



9. Определить по виду АЧХ какой это фильтр 4-ого порядка:

1. Фильтр Бесселя;
2. Фильтр Баттерворта;
3. Фильтр Чебышева;
4. Эллиптический фильтр;



10. Какой фильтр второго порядка имеет наиболее пологий спад АЧХ?

## Список использованных источников

1. Максина Е.Л. Электроника [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Максина Е.Л.— Электрон. текстовые данные.— Саратов: Научная книга, 2012.— 159 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/6270>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю

2. Скаржепа В.А. Электроника и микросхемотехника: учебник в 2 ч. Ч.1. Электронные устройства информационной автоматики / В.А. Скаржепа, А.Н. Луценко; под общ. ред. А.А. Краснопрошеной. – Киев: Выща школа. 1989. – 430 с.

3. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов / Ю.С. Забродин – М.: Высш. школа, 1982. – 496 с.

## Практическое занятие № 3

### РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЕЙ С УПРАВЛЕНИЕМ АНАЛОГОВЫМ СИГНАЛОМ

**Цель работы:** получение практических навыков расчета схем для автоматической регулировки коэффициента.

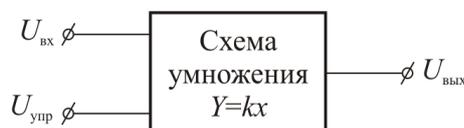
**Задачи работы:** получение практических навыков расчета схем для автоматической регулировки коэффициента усиления.

### 2. Общие положения (теоретические сведения)

#### Управляемый напряжением усилитель на основе умножителя

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

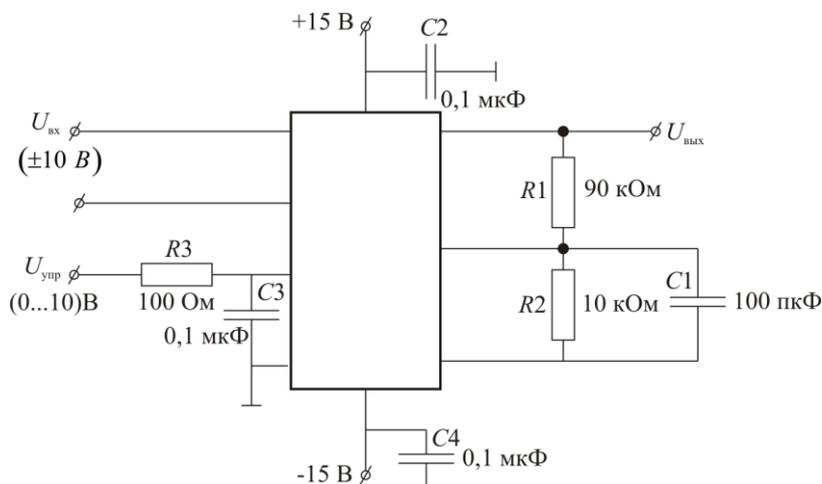
$$U_{\text{вых}} = U_{\text{упр}} \cdot U_{\text{вх}}$$



#### 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

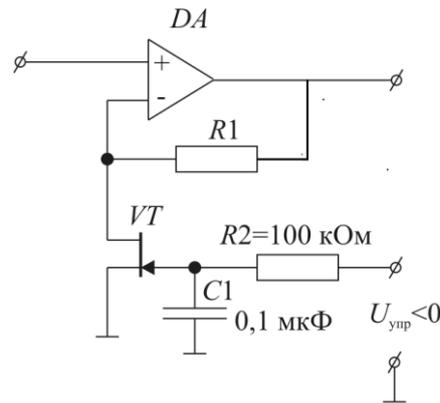


## Схема АРУ на 4-ех квадрантном перемножителе 526ПС-1, ПС-2

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

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

### Регулировка усиления с помощью полевого транзистора



### Регулирование усиления с помощью ПТ

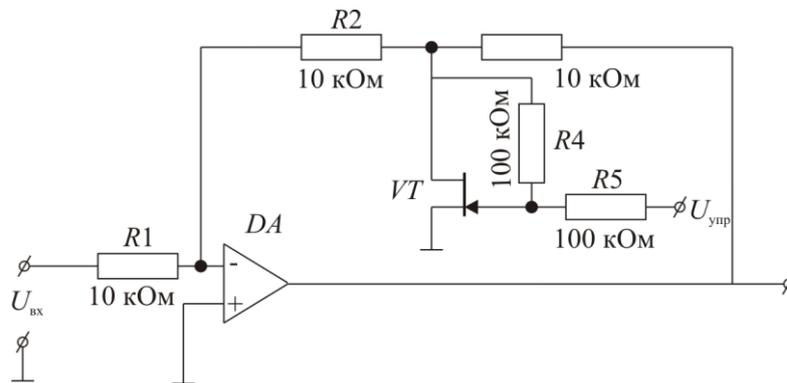
Сопротивление каналов транзистора  $R_{\text{си}}$  включено в цепь отрицательной обратной связи (ООС) неинвертирующего усилителя, его величину можно изменять отрицательного управляющего напряжения, подаваемого на затвор. Тогда, коэффициент усиления изменяется по следующей формуле:

$$K = 1 + \frac{R_1}{R_{\text{си}}}.$$

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.

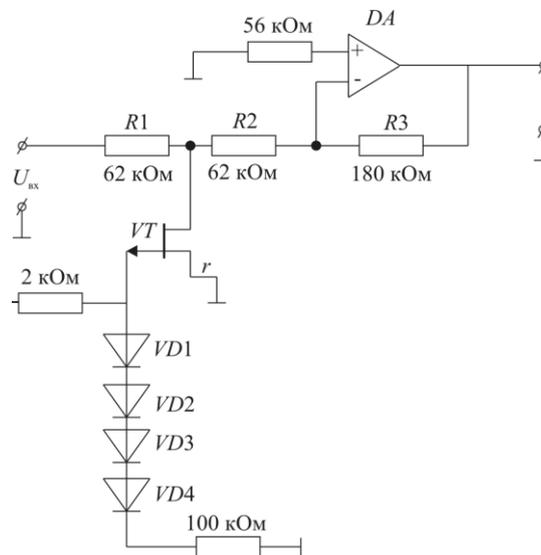
Для уменьшения искажений можно включить ПТ в качестве одного из сопротивлений  $T$  – образной ООС усилителя. При этом уменьшается размах сигнала на транзисторе и его влияние на коэффициент усиления.



Включение ПТ в Т – образную обратную связь

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

### 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:

$$K_{\text{ослmin}} = \frac{R_3}{R_1 + R_2} \text{ при } U_{\text{упр}} \geq 7B;$$

$$K_{\text{ослmax}} = \frac{R_3}{R_2} \frac{r}{R_1 + r} \text{ при } U_{\text{упр}} = 0,$$

где  $r$  – сопротивление открытого канала полевого транзистора.

### 3. Задание на работу (рабочее задание)

Рассчитать параметры и элементы схем для автоматической регулировки коэффициента усиления.

#### 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. 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 T-образной обратной связи усилителя?
3. Изобразите схему регулирования усиления с помощью полевого транзистора.
4. Изобразите схему усилителя с делителем напряжения с переменным затуханием.

#### 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

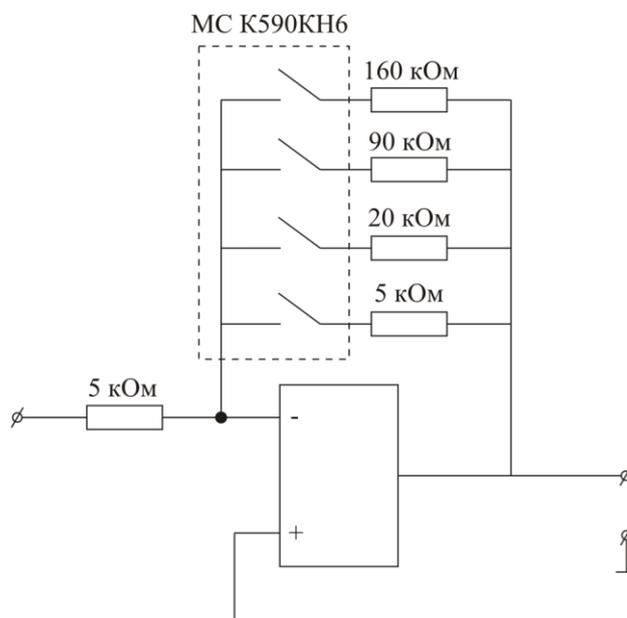
##### РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЕЙ С УПРАВЛЕНИЕМ ЦИФРОВЫМ СИГНАЛОМ

**Цель работы:** получение практических навыков расчета схем для автоматической регулировки коэффициента.

**Задачи работы:** получение практических навыков расчета схем для автоматической регулировки коэффициента усиления.

#### 2. Общие положения (теоретические сведения)

##### Усилители с цифровым управлением коэффициента усиления



### Усилитель с цифровым управлением коэффициента 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 590КН6*.

### 3. Задание на работу (рабочее задание)

Рассчитать параметры и элементы схем для автоматической регулировки коэффициента усиления.

### 4. Ход работы (порядок выполнения работы)

1. Разработать схему электрическую принципиальную усилителя с цифровым управлением коэффициентом усиления с использованием аналогового ключа 590 КН6.

### 5. Контрольные вопросы

1. Изобразите схему усилителя с цифровым управлением коэффициента 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.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

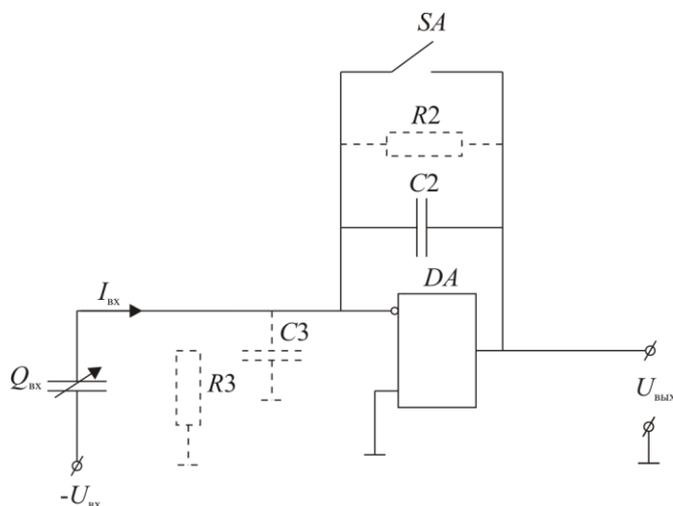
### РАСЧЕТ СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЯ ЗАРЯДА

**Цель работы:** получение практических навыков расчета схемы усилителя заряда.

**Задачи работы:** получение практических навыков расчета параметров и элементов схем усилителей заряда.

#### 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

$C_2 = 10 \text{ нФ} \dots 10 \text{ мФ}$  – 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:

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

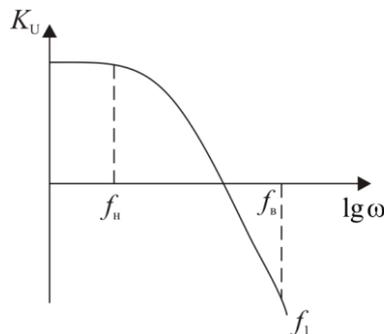
$$f_s = \frac{C_2}{C_2 + C_3} f_1,$$

где  $f_1$  – частота единичного усиления полностью скорректированного усилителя.

Напряжение смещения на выходе усилителя выражается следующей формулой:

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

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



### К пояснению полосы пропускания

Выходной дрейф усилителя заряда определяется по формуле:

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

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.

### 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. Выбрать 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. 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 № 6

### 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;  $\Phi_e$  – 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  $\Delta K_0$ , продифференцируем формулу (13) по  $K_0$ :

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

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

Теперь найдем отношение  $\Delta U_c / U_c$  :

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

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:

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

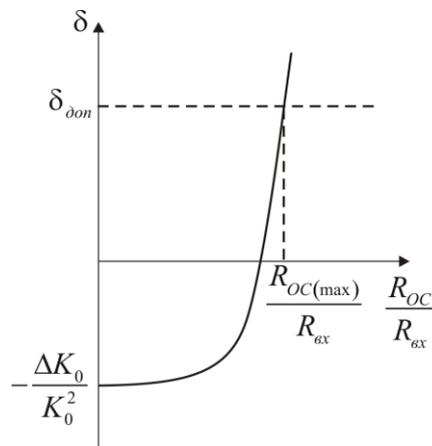


Рис. 1.

где  $e$  – заряд электрона;  $I_T$  – темновой ток фотодиода;  $T$  – температура окружающей среды;  $k$  – постоянная Больцмана;  $R_0$  – 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 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 № 7

#### 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 пикофард и подбирается при настройке.

Резисторы  $R1-1$  (2,3,4) используются для увеличения динамического диапазона преобразователей «ток-напряжение» за счет компенсации постоянных составляющих темповых 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

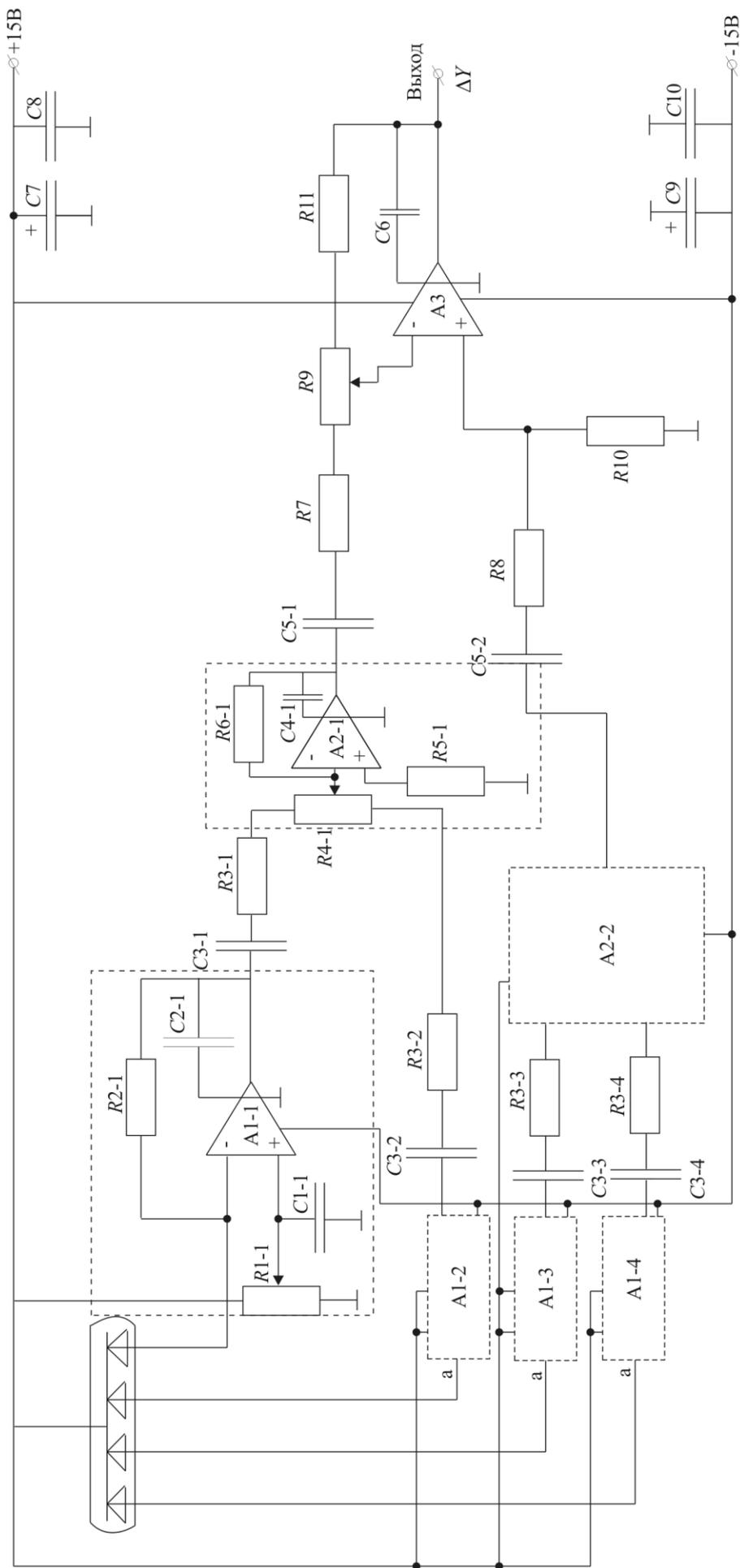


Рис. 3 Схема электрическая принципиальная

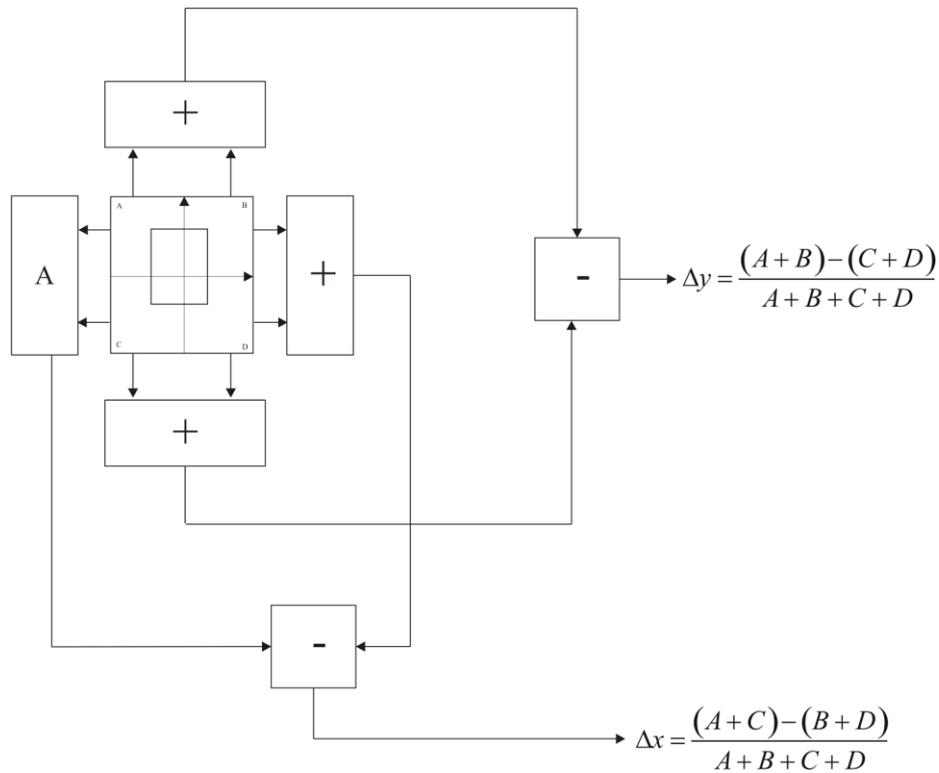


Рис. 4

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

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  $R_3 = 150$  кОм. Резисторы  $R4-1(2)$  необходимы для выравнивания коэффициентов передачи суммируемых сигналов при настройке сумматоров на ОУ  $A2-1(2)$ .

Коэффициент передачи сумматора  $K_{\Sigma}$  на ОУ определяется соотношением сопротивлений 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

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

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

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 сопротивлений 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 А3?
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.