

**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-2»**

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

по направлению подготовки  
**12.03.02 – Оптехника**

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

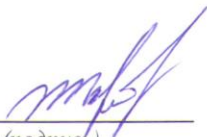
Форма(ы) обучения: *очная*

Идентификационный номер образовательной программы: 120302-01-2022

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 дифференциального усилительного каскада	14
Практическое занятие № 2 Расчет усилителей с обратными связями	
Практическое занятие № 3 Расчет основных схем включения операционных усилителей	17
Практическое занятие № 4 Расчет двухполупериодной схемы выпрямителя с нулевым выводом	22
Практическое занятие № 5 Расчет мостовой схемы выпрямителя.	26
Практическое занятие № 6 Расчет параметрического стабилизатора напряжения	37
Практическое занятие № 7 Расчет компенсационного стабилизатора напряжения	
Практическое занятие № 8 Расчет активных фильтров первого и второго порядков	

## Практическое занятие № 1

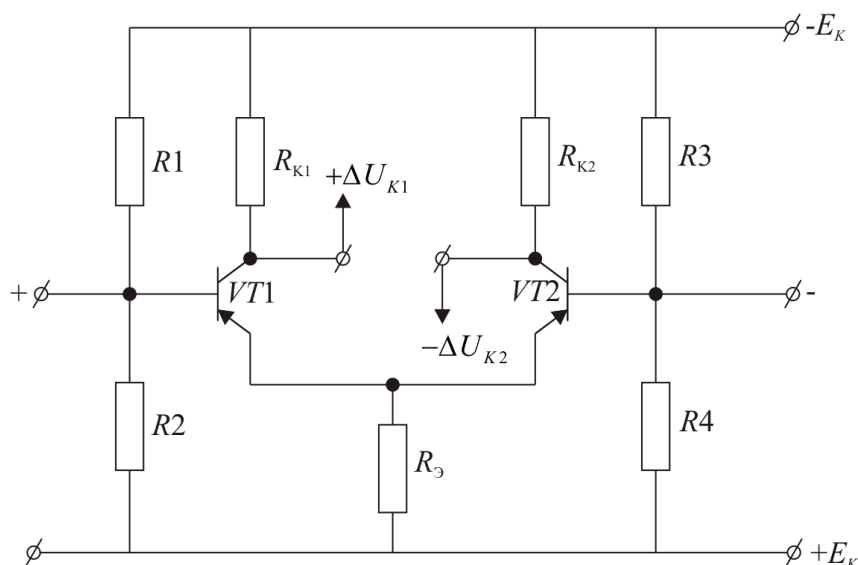
### РАСЧЕТ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

#### 1. Цель и задачи работы

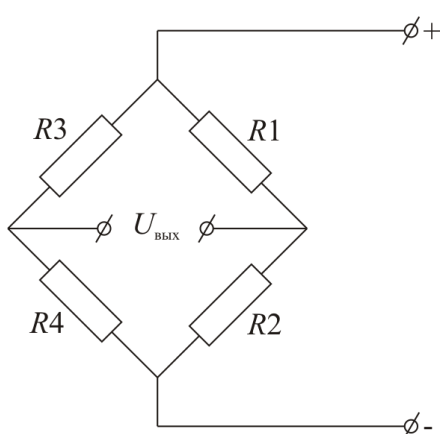
**Цель работы:** получение практических навыков расчета усилителей постоянного тока.

**Задачи работы:** получение практических навыков расчета элементов схемы усилителей постоянного тока.

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



В данной схеме транзисторы  $VT1$ ,  $VT2$  и сопротивления  $R_{K1}$ ,  $R_{K2}$  включены по мостовой



схеме. Данная схема Мао чувствительна к изменению напряжения питания и температурному дрейфу параметров транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ . Для этого необходимо подбирать транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  с одинаковыми коэффициентами усиления  $\beta$  и одинаковым обратным током коллектора. В одну диагональ моста подается напряжение питания, с другой диагонали коллектора транзистора снимается выходное напряжение. Входное напряжение подается так, чтобы изменять сопротивление нижних плеч моста  $VT1$  и  $VT2$ .  $R_Э$  предназначено для температурной стабилизации каскада. При увеличении температуры увеличиваются токи коллектора транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ , а значит и их токи эмиттера.

$$I_Э = I_{Э10} + I_{Э20} + \Delta I_{Э1} + \Delta I_{Э2};$$

$$\Delta I_Э = \Delta I_{Э1} + \Delta I_{Э2};$$

$$\Delta U_{RЭ} = R_Э \cdot \Delta I_Э.$$

В результате появления приращения напряжения на  $R_Э$  начинает работать отрицательная обратная связь, в результате чего напряжение база-эмиттер обоих транзисторов уменьшается. Следовательно, потенциалы коллекторов первого и второго

транзисторов возвращаются в исходное состояние. Подавать напряжение на вход можно 2-мя способами:

**1. Подача входного напряжения между базами транзисторов:**

$$r_{ex1} = r_{ex2}, \quad U_{ex1} = +\frac{U_{ex}}{2}; \quad U_{ex2} = -\frac{U_{ex}}{2}.$$

В результате ток  $I_{B1}$  уменьшается, а ток  $I_{B2}$  увеличивается. Поэтому, падение напряжения на  $R_{K1}$  увеличивается, а на  $R_{K2}$  - уменьшается. Следовательно, потенциал коллектора VT2 становится менее отрицательным, а потенциал транзистора VT1 более отрицательным.

$$|\Delta I_{K1}| = |\Delta I_{K2}| \Rightarrow |\Delta U_{KЭ1}| = |\Delta U_{KЭ2}|;$$

$$U_{вых} = 2\Delta U_{KЭ}.$$

Для схемы температурной стабилизации можно записать следующие уравнения:

$$I_{Э} = I_{Э10} - \Delta I_{Э1} + I_{Э20} + \Delta I_{Э2} = I_{Э}.$$

Причем,  $|\Delta I_{Э1}| = |\Delta I_{Э2}|$ . Таким образом, в этой схеме не возникает обратная связь по сигналу.

**2. Подача сигнала между базой и общим проводом:**

$$U_{ex1} = -U_{ex}; \quad U_{ex2} = 0;$$

$$\Delta U_{Э} = \Delta I_{Э1} \cdot R_{Э};$$

$$U_{ex1} = -U_{ex} - (-\Delta U_{Э});$$

$$U_{ex2} = 0 - (-\Delta U_{Э2}) = +\Delta U_{Э};$$

$$U_{вых} = 2\Delta U_{KЭ}.$$

За счет действия отрицательной обратной связи на вход транзистора VT2 полагается положительное напряжение  $\Delta U_{Э}$ . Следовательно, транзистор VT1 открывается отрицательным входным напряжением, а транзистор VT2 закрывается положительным напряжением обратной связи. Поэтому, напряжение сигнала на выходе будет таким же, как и напряжение в предыдущем случае. Однако входное напряжение не может быть большим, т.к. должно выполняться условие:

$$U_{БЭn} > \Delta U_{Э}.$$

Коэффициент усиления по напряжению, по определению, равен

$$K_U = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{ex}};$$

$$\pm \Delta U_{вых1,2} = \pm \Delta I_K \cdot R_K = \pm I_B \cdot \beta I_K;$$

$$\Delta U_{ex} = (R_{Г} + 2R_{ex}) \Delta I_{ex}.$$

Тогда,

$$K_{U1,2} = \frac{K_{U(ОЭ)}}{2};$$

$$K_{U(дифф)} = K_{U(ОЭ)}.$$

Таким образом, дифференциальный каскад имеет такой же коэффициент усиления по напряжению, что и каскад с общим эмиттером. Дифференциальный каскад может быть

построен на полевых транзисторах. В этом случае он будет обладать высоким входным сопротивлением ( $R_{\text{вх}} > 1 \text{ МОм}$ ).

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

Рассчитать параметры дифференциального усилительного каскада.

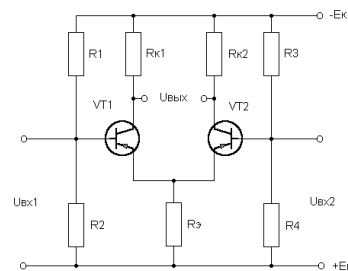
### 4. Ход работы (порядок выполнения работы)

1. В дифференциальном усилительном каскаде на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$  при подаче входного напряжения между базами ток эмиттера транзистора  $VT1$  изменился на  $1 \text{ мА}$ . На сколько изменится ток эмиттера транзистора  $VT2$ ? Ответ:  $\Delta I_2 = 1 \text{ мА}$ .
2. Суммарный ток эмиттера в дифференциальном усилительном каскаде на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$  в режиме покоя  $I_{\Sigma} = 2 \text{ мА}$ . Чему он будет равен после подачи входного напряжения между базами, если ток эмиттера каждого транзистора изменился на  $0,5 \text{ мА}$ ? Ответ:  $I_0 = 2 \text{ мА}$ .
3. Ток эмиттера транзистора  $VT1$  в дифференциальном усилительном каскаде при изменении температуры окружающей среды увеличился на  $1 \text{ мА}$ . На сколько изменится ток эмиттера, протекающий через сопротивление цепи температурной стабилизации каскада. Ответ:  $\Delta I_0 = 2 \text{ мА}$ .
4. Ток эмиттера, протекающий через сопротивление цепи температурной стабилизации дифференциального усилительного каскада, при повышении температуры окружающей среды изменился на  $3 \text{ мА}$ . На сколько изменится ток эмиттера покоя транзистора  $VT1$ ? Ответ:  $\Delta I_{01} = 1,5 \text{ мА}$ .
5. При подаче напряжения между базами транзисторов в дифференциальном усилительном каскаде ток коллектора транзистора  $VT1$  увеличился на  $1 \text{ мА}$ . Какое напряжение будет на выходе усилительного каскада, если сопротивление коллекторной нагрузки транзистора  $VT1$   $R_{\text{к1}} = 1 \text{ кОм}$ ?
  1.  $\Delta U_{\text{к1}} = \Delta I_{\text{к1}} \cdot R_{\text{к1}} = 1 \text{ В}$ .
  2.  $U_{\text{вых}} = 2 \cdot \Delta U_{\text{к1}} = 2 \text{ В}$ .Ответ:  $2 \text{ В}$ .

### 5. Контрольные вопросы

1. В чем заключается особенность усилителя постоянного тока?
2. Какой вид межкаскадной связи используется в усилителях постоянного тока?
3. Что называется дрейфом нуля усилителя постоянного тока?
5. Причины дрейфа нуля усилителя?
6. Какое условие накладывает приведенный к входу дрейф нуля усилителя постоянного тока?
7. Если дифференциальный каскад построить не на биполярных, а на полевых транзисторах, то у него появится еще одно достоинство:
8. Для чего предназначены резисторы  $R1, R2, R3, R4$ ?

9. Какие требования предъявляются к транзисторам дифференциального каскада?
10. Какую схему образуют транзисторы в дифференциальном усилительном каскаде?
11. За счет чего происходит компенсация дрейфа нуля усилительного каскада при изменении температуры?



### Список использованных источников

1. Щука, А. А. Электроника : учеб. пособие для вузов / А. А. Щука ; 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.

### Практическое занятие № 2

#### РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЕЙ С ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

##### 1. Цель и задачи работы

**Цель работы:** получение практических навыков расчета схем усилителей с обратными связями.

**Задачи работы:** изучение теоретических сведений, изучение основных расчетных зависимостей, расчет основных параметров усилителей.

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

*Обратная связь* в усилителях осуществляется подачей части входного сигнала с выхода усилителя на его вход.

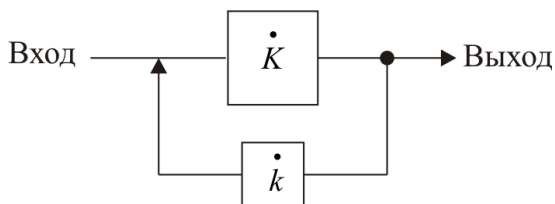
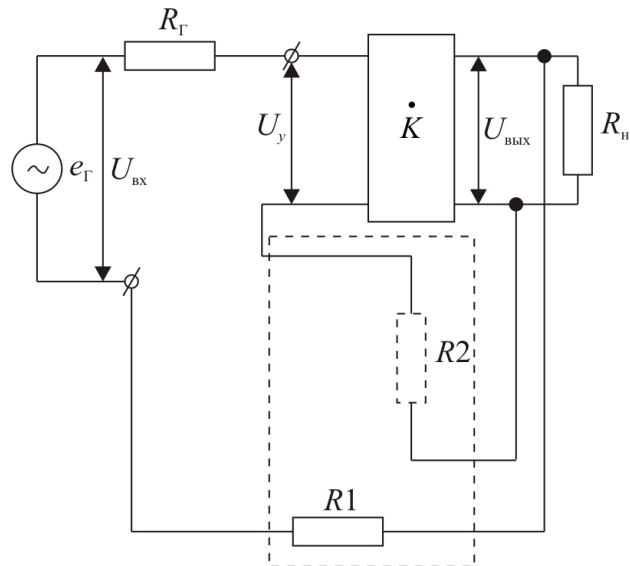


Рис.3.19.

*Виды обратных связей:*

- ❖ по параметру сигнала обратной связи различают:
  - обратную связь по напряжению;
  - обратная связь по току;
- ❖ по способу подключения ко входу:
  - последовательная обратная связь (сигнал обратной связи подключается последовательно с входным сигналом)
  - параллельная обратная связь.



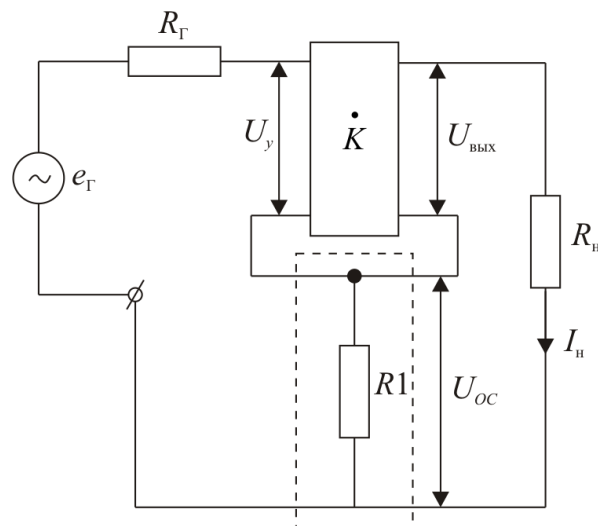
**Рис. 3.20.** Последовательная обратная связь по напряжению

$$K_{U(OC)} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{вх}}}; \quad U_y = U_{\text{вх}} + U_{OC};$$

$$\dot{K} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_y}; \quad \dot{k} = \frac{U_{OC}}{U_{\text{ВЫХ}}};$$

$$U_{OC} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_1 + R_2} \cdot R_2;$$

$$k = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$



**Рис. 3.21.** Последовательная обратная связь по току

$$U_{OC} = R_1 \cdot I_H;$$



$$k = \frac{U_{OC}}{I_n} = R_1.$$

### Параллельная обратная связь по напряжению

Обратная связь называется *положительной*, если она увеличивает сигнал на выходе усилителя. Обратная связь, которая уменьшает сигнал на выходе усилителя, называется *отрицательной*. Для вывода коэффициента усиления усилителя с обратной связью будем использовать схему с последовательной обратной связью по напряжению.

$$U_y = U_{ex} + U_{OC}. \quad (8)$$

Разделим обе части уравнения  $U_{вых}$ , получим:

$$\frac{U_y}{U_{вых}} = \frac{U_{ex}}{U_{вых}} + \frac{U_{OC}}{U_{вых}};$$

$$\frac{1}{\dot{K}} = \frac{1}{K_{U(OC)}} + \dot{k};$$

$$K_{U(OC)} = \frac{K}{1 - kK}.$$

1. Если  $0 < kK < 1$ , то  $K_{U(OC)} > K$  - условие положительности обратной связи.
2. Если  $kK \geq 1$  - условие самовозбуждения. На выходе усилителя присутствует сигнал, состоящий из спектра частот, изменяющихся от  $-\infty$  до  $+\infty$ , *независимо от сигнала на входе*. Сигнал на выходе называется «белый шум».
3. Если  $|kK| \leq 1$  - условие самовозбуждения на фиксированной частоте. Выходное напряжение представляет собой синусоиду фиксированной частоты, величина которой зависит от модуля коэффициента усиления. Это условие используется в генераторах синусоидального напряжения.
4.  $kK < 0$  - условие существования отрицательной обратной связи.

$$K_{U(OC)} = \frac{K}{1 + kK}.$$

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

Рассчитать параметры обратной связи усилительного каскада.

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

1. Относительное изменение коэффициента усиления усилителя с  $K = 1000$  при замене транзистора составляет 10%. Определить с каким коэффициентом передачи необходимо подключить цепь ООС, чтобы относительное изменение коэффициента усиления усилителя охваченного ООС не превышало 2%.  $k = 0,004$

$$\frac{\Delta K_{oc}}{K_{oc}} = \frac{1}{1 + Kk} \cdot \frac{\Delta K}{K}; \quad k = \frac{\frac{\Delta K}{K} - \frac{\Delta K_{oc}}{K_{oc}}}{\frac{\Delta K_{oc}}{K_{oc}}}$$

2. Относительное изменение коэффициента усиления усилителя с  $K = 1000$  при замене транзистора составляет 10%. Определить значение коэффициента усиления  $K_{oc}$  после подключения цепи ООС, при котором относительное изменение коэффициента усиления усилителя охваченного ООС не превышало бы 2%.  **$K_{oc} = 200$ .**

$$\frac{\Delta K_{oc}}{K_{oc}} = \frac{1}{1 + Kk} \cdot \frac{\Delta K}{K}; \quad k = \frac{\frac{\Delta K}{K} - \frac{\Delta K_{oc}}{K_{oc}}}{\frac{\Delta K_{oc}}{K_{oc}}}; \quad K_{oc} = \frac{K}{1 + Kk}$$

3. Коэффициент усиления усилителя на средних частотах  $K = 100$ , нижняя граничная частота полосы пропускания  $f_n = 200$  Гц, верхняя частота –  $f_v = 30$  кГц. К усилителю подключена цепь отрицательной обратной связи по напряжению с коэффициентом обратной связи  $k = 0,1$ . Определить коэффициент усиления усилителя с обратной связью, а также нижнюю и верхнюю граничные частоты полосы пропускания.  **$K_{oc} = \frac{K}{1 + K \cdot k} = 9,1$ .**

$$f_{noc} = \frac{f_n}{1 + K \cdot k} = 18,2 \text{ Гц. } f_{voc} = f_v \cdot (1 + K \cdot k) = 330 \text{ кГц.}$$

4. Усилитель с отрицательной обратной связью ( $k = 0,18$ ) имеет коэффициент усиления 5, а полосу пропускания – от 25 Гц, до 1,2 МГц. Определить коэффициент усиления и полосу пропускания усилителя без обратной связи.  **$K = \frac{K_{oc}}{1 - K_{oc} \cdot k} = 50$ .**

$$f_n = f_{noc} (1 + K \cdot k) = 250 \text{ Гц. } f_v = \frac{f_{voc}}{1 + K \cdot k} = 120 \text{ кГц.}$$

5. Коэффициент усиления каскада по напряжению  $K = 50$ . Найти величину коэффициента усиления при введении отрицательной обратной связи с коэффициентом  $k = 0,02$ .  **$K_{oc} = 25$ .**

6. После введения обратной связи коэффициент усиления усилителя уменьшился со 150 до 100. Определить коэффициент обратной связи.  **$k = 0,0033$ .**

7. Определить во сколько раз уменьшится коэффициент передачи усилителя  $K = 200$  при охвате его последовательной отрицательной обратной связью по напряжению в виде четырехполюсника с коэффициентом передачи  $\beta = 0,05$ .  **$K/K_{oc} = (1 + K\beta) = 11$ .**

8. При подключении цепи последовательной ООС по напряжению коэффициент усиления усилителя уменьшился в 10 раз. Определить входное и выходное сопротивления усилителя, если без обратной связи сопротивления  $R_{вх} = 10$  кОм,  $R_{вых} = 500$  Ом. 1)

$$\frac{K_{oc}}{K} = \frac{1}{1 + K \cdot k} \quad 2) \quad (1 + K \cdot k) = 10. \quad R_{\text{вх.оc}} = R_{\text{вх}}(1 + K \cdot k) = 100 \text{ кОм};$$

$$R_{\text{вх.оc}} = \frac{R_{\text{вых}}}{1 + K \cdot k} = 50 \text{ Ом.}$$

9. Определить выходное сопротивление усилителя охваченного последовательной ООС по напряжению, если при подключении обратной связи его входное сопротивление увеличилось в 12 раз. Выходное сопротивление усилителя без обратной связи  $R_{\text{вых}} = 360$

$$\text{Ом. } R_{\text{вх.оc}} = \frac{R_{\text{вых}}}{1 + K \cdot k} = 30 \text{ Ом.}$$

10. Какое напряжение будет на выходе усилителя, охваченного ООС с  $k_{oc} = 0,05$  при подаче на его вход напряжения  $U_{\text{вх}} = 0,3 \text{ В}$ , если коэффициент усиления прямой цепи усилителя  $K = 10$ .

$$K_{oc} = \frac{K}{1 + K \cdot k_{oc}} = 6,66 \quad U_{\text{вых}} = K_{oc} U_{\text{вх}} = 2 \text{ В}$$

11. Напряжение на выходе усилителя, охваченного последовательной ООС  $U_{\text{вых}} = 2 \text{ В}$ . Определить коэффициент передачи цепи обратной связи, если напряжение на ее выходе  $U_{oc} = 0,4 \text{ В}$ .

$$k_{oc} = \frac{U_{oc}}{U_{\text{вых}}} = 0,2$$

12. Какое напряжение будет на выходе усилителя с коэффициентом усиления прямой цепи  $K = 10$ , если после охвата его последовательной ООС коэффициент усиления уменьшился в два раза, а напряжение на выходе цепи ОС равно  $0,3 \text{ В}$ .

$$K_{oc} = \frac{K}{2} = 5 \quad k_{oc} = \frac{K - K_{oc}}{K_{oc} \cdot K} = 0,1 \quad U_{\text{вых}} = \frac{U_{oc}}{k_{oc}} = 3 \text{ В.}$$

## 5. Контрольные вопросы

1. Для чего применяют обратные связи?
2. Каков принцип действия ООС?
3. Каковы причины возникновения ПОС в усилителях?
4. Как ПОС в усилителе компенсирует ООС?
5. Почему с увеличением коэффициента усиления усилителя растет вероятность его самовозбуждения?

## Список использованных источников

1. Щука, А. А. Электроника : учеб. пособие для вузов / А. А. Щука ; 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.

## Практическое занятие № 3

### РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

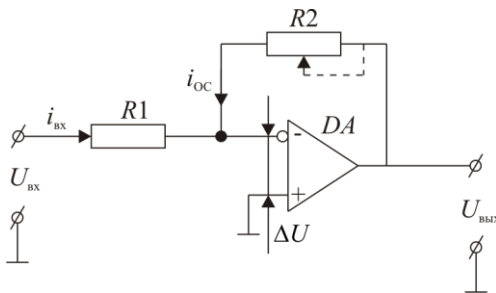
#### 1. Цель и задачи работы

**Цель работы:** получение практических навыков расчета базовых схем на операционных усилителях.

**Задачи работы:** получение практических навыков расчета элементов и параметров схем на операционных усилителях.

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

##### 1. Инвертирующее включение операционного усилителя



Будем считать, что для операционного усилителя  $\Delta U = 0$ . Тогда,

$$U_{\text{вх}} = i_{\text{вх}} R_1;$$

$$U_{\text{вых}} = i_{\text{оc}} R_2;$$

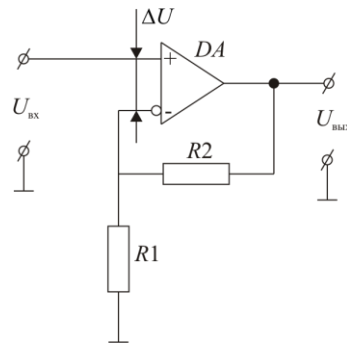
$$i_{\text{вх}} + i_{\text{оc}} = i_{\Sigma}.$$

Т.к. потенциал инвертирующего входа равен 0, то из этой точки не вытекает ток, т.е.  $i_{\Sigma} = 0$ . Тогда, получим

$$\begin{aligned} i_{\text{вх}} &= -i_{\text{оc}}; \\ K_U &= \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{i_{\text{оc}} R_2}{i_{\text{вх}} R_1} = -\frac{R_2}{R_1}. \\ K_U &= -\frac{R_2}{R_1}. \end{aligned}$$

Таким образом, коэффициент усиления по напряжению данной схемы не зависит от коэффициента усиления операционного усилителя, а определяется только элементами обратной связи  $R_1, R_2$ ; схема является инвертирующей, на что указывает знак «-» в формуле коэффициента усиления. Т.к. на инвертирующем входе имеем потенциал искусственной земли, то входной ток протекает только через сопротивление  $R_1$ .  $R_{\text{вх}}$  выбирают из следующего условия:  $R_{\text{вх}} = R_1$  (не менее 10 кОм). Коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  выбирают путем выбора  $R_2$ .

##### 2. Неинвертирующее включение операционного усилителя



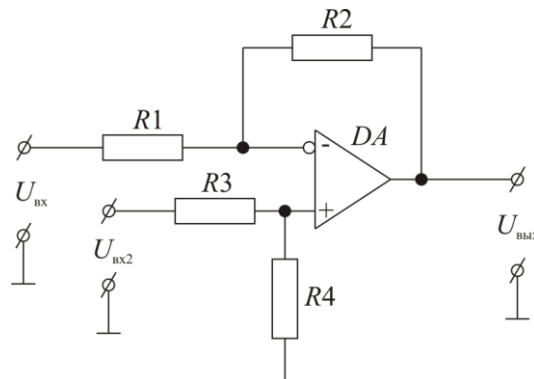
$$U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вых}}}{R_1 + R_2} R_1;$$

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1};$$

$$K_U = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

Недостатком данной схемы является то, что ее коэффициент усиления не может быть меньше 1, а достоинством является большое входное сопротивление, которое равно входному сопротивлению операционного усилителя.

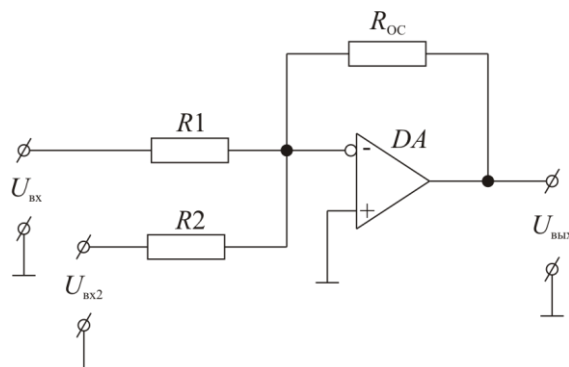
### 3. Дифференциальный усилитель



$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх2}} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - U_{\text{вх1}} \frac{R_2}{R_1}.$$

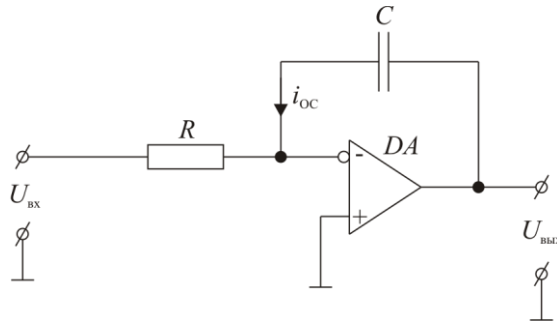
В частном случае, когда  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$  получаем, что  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}}$ .

### 4. Инвертирующий сумматор



$$U_{\text{вых}} = - \left( \frac{R_{OC}}{R_1} U_{\text{вх1}} + \frac{R_{OC}}{R_2} U_{\text{вх2}} \right).$$

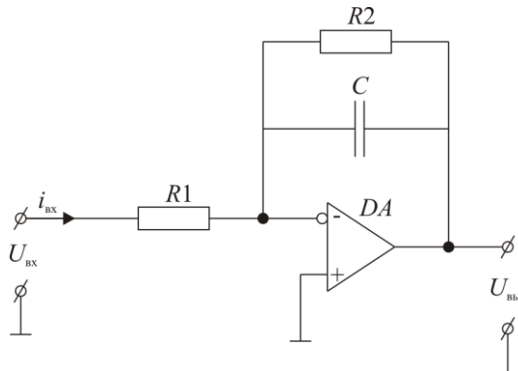
## 5. Инвертирующий интегратор



$$\begin{aligned} i_{\text{вх}} &= -i_{\text{ОС}}; \\ U_{\text{вх}} &= R \cdot i_{\text{вх}}; \quad U_{\text{вых}} = X_C \cdot i_{\text{ОС}}; \\ U_{\text{вых}} &= X_C \cdot i_{\text{ОС}}; \\ K_U &= -\frac{X_C}{R} = -\frac{1}{j\omega CR}; \quad j\omega \rightarrow p \Rightarrow K(p) = -\frac{1}{Tp}, \end{aligned}$$

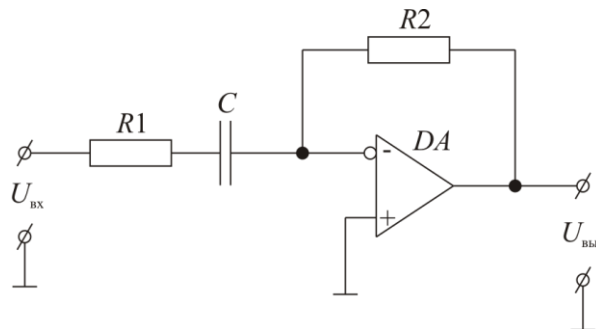
где  $T = RC$  - постоянная времени интегратора.

## 6. Аperiodический инвертирующий усилитель



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

## 7. Дифференцирующий усилитель



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

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

Рассчитать параметры схем 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 апериодического усилителя, 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  $U_{вых} = \frac{R2}{R1}(U_{вх2} - U_{вх1})$ . 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.

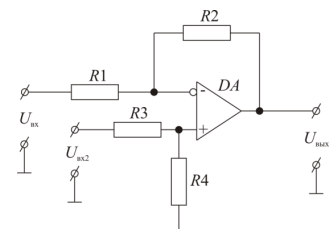
6. Какое сопротивление необходимо включить в прямую цепь интегратора, чтобы получить постоянную времени  $T = 2$  с при емкости интегрирующего конденсатора  $3,3$  мкФ.

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.

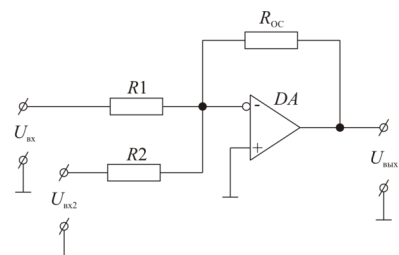


9. Рассчитать сопротивление  $R2$  в схеме дифференциального усилителя, чтобы получить на выходе  $U_{вых} = 3$  В, если на первый вход подано напряжение  $U_{вх1} = 0,5$  В, на второй вход подано напряжение  $U_{вх2} = 4$  В, а в схему включены сопротивления  $R1 = 10$  кОм,  $R3 = 10$  кОм,  $R4 =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

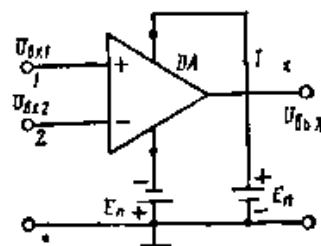
Ответ:  $R2 = 20$  кОм.

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 при неинвертирующем включении ОУ?
2. Какие параметры операционного усилителя относятся к статическим?
3. Для чего предназначен каскад сдвига уровня в операционном усилителе?

## Список использованных источников

1. Щука, А. А. Электроника : учеб. пособие для вузов / А. А. Щука ; 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 № 4

### РАСЧЕТ ДВУХПОЛУПЕРИОДНОЙ СХЕМЫ ВЫПРЯМИТЕЛЯ С НУЛЕВЫМ ВЫВОДОМ

#### 1. Цель и задачи работы

**Цель работы:** получение практических навыков расчета схем однофазных выпрямителей..

**Задачи работы:** получение практических навыков расчета и выбора выпрямительных диодов и основных параметров выпрямителей.

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

##### Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом

Схема выпрямителя показана на рис. 3.29. Необходимым элементом выпрямителя является силовой трансформатор Тр с двумя вторичными обмотками  $n=\omega_1/\omega_{2-1}=\omega_1/\omega_{2-2}$ . Схема соединения обмоток такова, что одинаковые по величине напряжения на выводах вторичных обмоток относительно общей (нулевой) точки сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ .



Вторичные обмотки трансформатора подключены к анодам диодов  $D_1$ ,  $D_2$ . Выходное напряжение  $U_d$  снимается между нулевой точкой трансформатора и общей точкой соединения катодов обоих диодов. Принцип действия схемы рассмотрим для случая ч и с т о активной нагрузки  $R_H$  с использованием временных диаграмм напряжений и токов, приведенных на рис. 3.30.

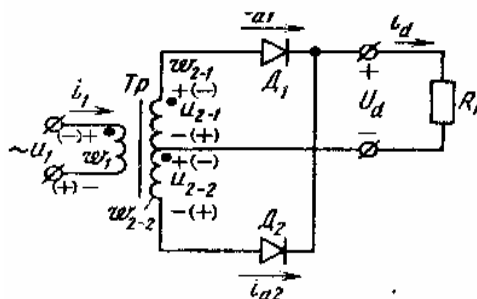


Рис. 3.29

При поступлении полуволны напряжения  $u_1$  положительной полярности (интервал  $0-\pi$  на рис. 3.30) на вторичных обмотках трансформатора действуют напряжения  $u_{2-1}$  и  $u_{2-2}$  с полярностью относительно нулевой точки, показанной на рис. 3.29 без скобок. К аноду диода  $D_1$  относительно нулевой точки прикладывается напряжение положительной полярности, а к аноду диода  $D_2$  - отрицательной.

При указанной полярности напряжений на анодах диод  $D_1$  на интервале  $0-\pi$  открыт, а диод  $D_2$  закрыт. Поскольку в открытом состоянии падение напряжения на диоде мало, практически все напряжение  $u_{2-1}$  прикладывается к нагрузке  $R_H$ , создавая на ней напряжение  $u_d$ . На данном интервале анодный ток диода равен току нагрузки  $i_{a1}=i_d=u_{2-1}/R_H$ . В конце интервала  $0-\pi$  напряжения и токи в схеме достигают нулевых значений.

При поступлении напряжения  $u_1$  отрицательной полярности (интервал  $\pi-2\pi$  на рис. 3.30) полярность напряжений на вторичных обмотках становится обратной. В проводящем состоянии находится диод  $D_2$ , а диод  $D_1$  закрыт. К нагрузке  $R_H$  прикладывается напряжение  $u_{2-2}$  определяющее напряжение  $u_d$  той же полярности, что и на предшествующем интервале. Теперь токи в схеме определяются полуволной напряжения положительной полярности  $u_{2-2}: i_d=i_{a2}=u_{2-2}/R_H$ .

Связь между действующим значением вторичного напряжения  $U_2$  трансформатора со средним значением выпрямленного напряжения  $U_d$  находим из кривой рис. 3.30, определяя напряжение  $U_d$  как среднее за полупериод значение напряжения  $u_2$ :

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \vartheta d\vartheta = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.9 U_2 \quad (3.20)$$

Поскольку величина  $U_d$  при расчете выпрямителя является заданной, находим вторичное напряжение:

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d = 1.11 U_d, \quad (3.21)$$

а также коэффициент трансформации трансформатора:

$$n = \frac{U_1}{U_2}. \quad (3.22)$$

Как видно из рис. 3.30 выпрямленное напряжение пульсирует. Его мгновенные значения  $U_d$  изменяются в течение полупериода от максимального значения, равного  $\sqrt{2}U_2$  до нуля. Напряжение  $u_d$  помимо постоянной составляющей  $U_d$  содержит переменную составляющую, представляющую собой сумму гармонических. Разложение в ряд Фурье кривой  $u_d$  (рис. 3.30) позволяет определить амплитуду  $U_{dm}$  высших гармоник:

$$U_{dm} = 2U_d / ((vm)^2 - 1), \quad (3.23)$$

где  $V = 1, 2, 3, \dots$  — номера гармонических;  $m$  — эквивалентное число фаз выпрямления (для данной схемы  $m = 2$ ).

Для оценки качества выпрямленного напряжения пользуются так называемым коэффициентом пульсации  $q_1$ , характеризующим отношение амплитуды  $V$ -й гармоники к среднему значению напряжения  $U_d$ . Коэффициент пульсации обычно определяют по амплитуде первой (основной) гармоники ( $V = 1$ ), как наибольшей из всех остальных и наиболее трудно поддающейся фильтрации:

$$q_1 = \frac{U_{d1m}}{U_d} = \frac{2}{(m^2 - 1)} \quad (3.24)$$

Для рассматриваемой схемы частота первой гармоники пульсации  $f_{п(1)} = 2f_c$  и при частоте питающей сети  $f_c = 50$  Гц составляет 100 Гц.

Подстановкой в выражение (3.24)  $m = 2$  определяем коэффициент пульсации по первой гармонике:

$$q_1 = 0,67$$

т. е. амплитуда первой гармонической для данной схемы составляет 67% от  $U_d$ .

При определении типа диодов необходимо знать среднее значение тока  $I_a$ , протекающего через каждый из диодов, и прикладываемое к ним максимальное обратное напряжение  $U_{bmax}$ .

Поскольку ток  $i_d$  протекает через диоды поочередно (рис. 3.30), средний ток через каждый диод составит

$$I_a = \frac{I_d}{2} \quad (3.25)$$

Обратное напряжение прикладывается к закрытому диоду, когда проводит ток другой диод. При открытом, например, диоде  $D_2$  из интервала  $\pi - 2\pi$  (рис. 3.30) на диоде  $D_1$  в обратном направлении действует суммарное напряжение двух вторичных обмоток, в связи с чем  $u_b = 2u_2$  (рис. 3.30) и максимальное обратное напряжение

$$U_{bmax} = 2\sqrt{2}U_2$$

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

Рассчитать основные параметры выпрямителя и выбрать диоды.

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

1. В схеме однополупериодного выпрямителя через диод проходит выпрямленный ток  $I_0=75$  мА. Определить сопротивление нагрузки  $R_n$ , если амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора  $U_{2T}=200$  В. Ответ:  **$R_n=850$  Ом**

2. Амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора двухполупериодной схемы выпрямителя  $U'_{2m}=210$  В. Определить выпрямленный ток, проходящий через каждый диод  $I_0$ , если сопротивление нагрузки  $R_n=510$  Ом. Ответ:  **$I_0=131$  мА.**

3. Для схемы двухполупериодного выпрямителя с индуктивным сглаживающим фильтром определить коэффициент сглаживания  $q$ , если известно, что амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора  $U'_{2m}=300$  В, выпрямленный ток, проходящий через нагрузку,  $I_0=200$  мА, частота сети  $f_c=50$  Гц, индуктивность дросселя  $L_\Phi=10$  Гн. Ответ:  **$q=6,6$ .**

4. В схеме двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом на нагрузке  $R_n=510$  Ом постоянное напряжение  $U_0=100$  В. Какой из диодов правильно выбран для этой схемы?

1. Д205 ( $U_{обр}=400$  В,  $I_{выпр. ср.}=400$  мА). 2. Д7Д ( $U_{обр}=300$  В,  $I_{выпр. ср.}=300$  мА). 3. Д209 ( $U_{обр}=400$  В,  $I_{выпр. ср.}=100$  мА). 4. Д205 и Д7Д. 5. **Д205 и Д209.** 6. Д7Д и Д209.  
Ответ: 5. **Д205 и Д209.**

5. Определить частоту пульсаций первой гармоники напряжения на нагрузке двухполупериодного выпрямителя, если напряжение первичной обмотки трансформатора имеет частоту  $f_c=400$  Гц. Ответ:  **$f_n=800$  Гц.**

6. Действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора мостовой схемы выпрямителя  $U_2=10$  В. Определить обратное напряжение приложенное к диоду. Ответ:  **$U_{обр.}=14,1$  В.**

7. Определить действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора в схеме двухполупериодного мостового выпрямителя если через каждый диод протекает средний ток  $I_0=150$  мА, а сопротивление нагрузки  $R_n=430$  Ом. Ответ:  **$U_2=143$  В.**

8. Для схемы двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом определить выпрямленное напряжение на нагрузке  $U_d$ , если действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора  $U_2=120$  В. Ответ:  **$U_d=108$  В.**

9. В схеме двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом обратное напряжение, действующее на каждый диод  $U_{обр.}=471,2$  В. Определить выпрямленное напряжение на нагрузке  $U_d$ . Ответ:  **$U_d=150$  В.**

10. Определить амплитуду первой гармоники переменного напряжения на нагрузке в схеме двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом, если выпрямленный ток, протекающий через каждый диод  $I_a=70$  мА, а сопротивление нагрузки  $R_n=39$  Ом. Ответ:  **$U_{d1m}=3,66$  В.**

1)  $I_d=2 \cdot I_a=140$  мА.

2)  $U_d=I_d \cdot R_n=5,46$  В.

3)  $U_{d1m}=q_1 \cdot U_d=3,66$  В.

11. Частота пульсации выпрямленного напряжения в схеме двухполупериодного выпрямителя  $f_{п} = 2$  кГц. Определить частоту питающей сети. Ответ:  $f_c = 1$  кГц.

12. Определить выпрямленное  $U_d$  на нагрузке мостовой схемы выпрямителя, если амплитуда напряжения первичной обмотки трансформатора  $U_{1m} = 150$  В, а коэффициент трансформации  $n = 2$ . Ответ:  $U_d = 47,8$  В.

1)  $U_{2m} = U_{1m} / n = 75$  В.

2)  $U_2 = U_{2m} / 1,41 = 53,2$  В.

3)  $U_d = 0,9 \cdot U_2 = 47,8$  В.

13. В мостовой схеме выпрямителя обратное напряжение на диодах  $U_{обр.} = 235,5$  В. Определить ток, проходящий через каждый диод, если сопротивление нагрузки  $R_n = 390$  Ом. Ответ:  $I_a = 193$  мА.

## 5. Контрольные вопросы

1. Сколько диодов одновременно находится в цепи тока двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом?
2. Почему напряжения на крайних выводах трансформатора должны быть одинаковыми?
3. Какова частота пульсаций на выходе выпрямителя?
4. Как влияют конденсаторы фильтра на пульсации?
5. Почему схему двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом применяют в силовых выпрямителях?

## Список использованных источников

1. Щука, А. А. Электроника : учеб. пособие для вузов / А. А. Щука ; 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 № 5

### РАСЧЕТ МОСТОВОЙ СХЕМЫ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

#### 1. Цель и задачи работы

**Цель работы:** получение практических навыков расчета схем мостовых выпрямителей.

**Задачи работы:** получение практических навыков расчета и выбора выпрямительных диодов и основных параметров выпрямителей.

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

Мостовая схема выпрямления дает точно такой же результат, как двухполупериодная, но имеет более простой трансформатор с одной вторичной обмоткой, рассчитанной на напряжение  $U_2$ .

Схема мостового выпрямителя без фильтра и ее временные диаграммы показаны на рис. 48, а—е.

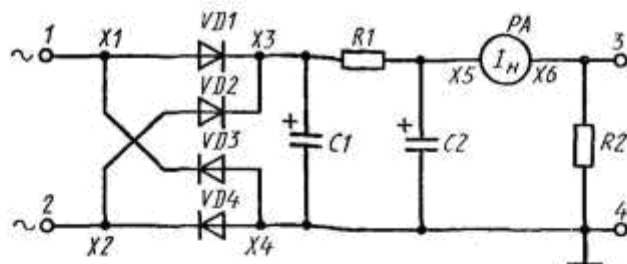


Рис. 47

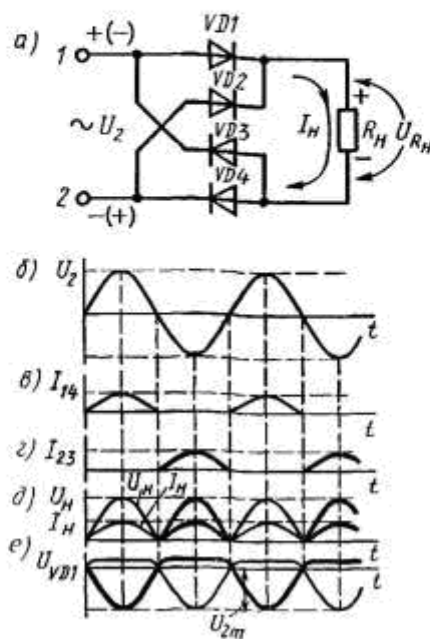


Рис. 48

Пусть в первый полупериод (рис. 48, а—в) напряжения  $U_2$  на выводе 1 вторичной обмотки трансформатора действует положительное по отношению к выводу 2 напряжение и ток  $I_{14}$  проходит по цепи: вывод диод  $VD1$ , резистор  $R_H$  диод  $VD4$ , вывод 2. При этом на нагрузке образуется падение напряжения  $U_{R_H}$ , полярность которого указана на рис. 48, а. Форма напряжения  $U_{R_H}$  это следующие один за другим синусоидальные импульсы (рис. 48, д). Диоды  $VD2$  и  $VD3$  в течение этого полупериода тока не проводят, так как закрыты поступающим на них через открытые диоды  $VD1$  и  $VD4$  напряжением  $U_{2m}$  (рис. 48, е). Максимальное обратное напряжение за крытых диодов равно амплитуде напряжения  $U_{2m}$  на обмотке трансформатора, т. е. вдвое меньше, чем в двухполупериодной схеме.

В следующий полупериод, когда знаки напряжения на вторичной обмотке трансформатора изменяются на противоположные (на рис. 48, а они даны в скобках), ток  $I_{23}$  (рис. 48, г) будет проходить по цепи (рис. 48, а): вывод 2, диод  $VD3$ , резистор  $R_H$  диод  $VD1$ , вывод 1.

Достоинство мостовой схемы по сравнению с двухполупериодной состоит в том, что диоды могут быть рассчитаны на вдвое меньшее обратное напряжение. Однако в цепи прямого тока в любой момент выпрямительного процесса находятся два последовательно включенных диода, что снижает экономичность схемы из-за падения напряжения на них при прохождении прямого тока. В выпрямителях, выпрямленное напряжение которых значительно выше прямого падения

напряжения на диодах, этот недостаток незаметен. В тех же случаях, когда выпрямленное напряжение соизмеримо с прямым падением напряжения, применяют двухполупериодную схему.

В мостовой схеме, как и в двухполупериодной, частота пульсаций равна удвоенной частоте сети.

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

Рассчитать основные параметры выпрямителя и выбрать диоды.

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

1. В схеме однополупериодного выпрямителя через диод проходит выпрямленный ток  $I_0 = 75$  мА. Определить сопротивление нагрузки  $R_n$ , если амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора  $U_{2r} = 200$  В. Ответ:  $R_n = 850$  Ом

2. Амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора двухполупериодной схемы выпрямителя  $U'_{2m} = 210$  В. Определить выпрямленный ток, проходящий через каждый диод  $I_0$ , если сопротивление нагрузки  $R_n = 510$  Ом. Ответ:  $I_0 = 131$  мА.

3. Для схемы двухполупериодного выпрямителя с индуктивным сглаживающим фильтром определить коэффициент сглаживания  $q$ , если известно, что амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора  $U'_{2m} = 300$  В, выпрямленный ток, проходящий через нагрузку,  $I_0 = 200$  мА, частота сети  $f_c = 50$  Гц, индуктивность дросселя  $L_\phi = 10$  Гн. Ответ:  $q = 6,6$ .

4. Действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора мостовой схемы выпрямителя  $U_2 = 10$  В. Определить обратное напряжение приложенное к диоду. Ответ:  $U_{обр.} = 14,1$  В.

5. Определить действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора в схеме двухполупериодного мостового выпрямителя если через каждый диод протекает средний ток  $I_0 = 150$  мА, а сопротивление нагрузки  $R_n = 430$  Ом. Ответ:  $U_2 = 143$  В.

6. Частота пульсации выпрямленного напряжения в схеме двухполупериодного выпрямителя  $f_n = 2$  кГц. Определить частоту питающей сети. Ответ:  $f_c = 1$  кГц.

7. Определить выпрямленное  $U_d$  на нагрузке мостовой схемы выпрямителя, если амплитуда напряжения первичной обмотки трансформатора  $U_{1m} = 150$  В, а коэффициент трансформации  $n = 2$ . Ответ:  $U_d = 47,8$  В.

1)  $U_{2m} = U_{1m} / n = 75$  В.

2)  $U_2 = U_{2m} / 1,41 = 53,2$  В.

3)  $U_d = 0,9 \cdot U_2 = 47,8$  В.

8. В мостовой схеме выпрямителя обратное напряжение на диодах  $U_{обр.} = 235,5$  В. Определить ток, проходящий через каждый диод, если сопротивление нагрузки  $R_n = 390$  Ом. Ответ:  $I_a = 193$  мА.

### 5. Контрольные вопросы

1. Сколько последовательно включенных диодов имеется в цепи тока нагрузки при мостовой схеме выпрямления?
2. Каким должно быть максимально допустимое обратное напряжение диода в мостовой схеме?
3. Как влияют конденсаторы фильтра и сопротивление нагрузки на амплитуду пульсаций?
4. Какой будет осциллограмма напряжения на нагрузке, если один из диодов отключен?
5. Когда применяют мостовую схему выпрямления?

### 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.
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 № 6

#### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

##### 1. Цель и задачи работы

**Цель работы:** получение практических навыков расчета параметрических стабилизаторов напряжения.

**Задачи работы:** получение практических навыков расчета элементов схемы и основных параметров параметрических стабилизаторов напряжения.

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

В ряде случаев к выходному напряжению маломощного выпрямителя, используемому в качестве напряжения питания для некоторого электронного устройства, предъявляются требования в отношении его стабильности. Ввиду зависимости напряжения  $U_d$  от тока нагрузки, обусловленной наклоном внешней характеристики выпрямителя, а также от изменений напряжения  $U_1$  питающей сети между выпрямителем и нагрузкой включают стабилизатор напряжения.

Существует два типа стабилизаторов напряжения: параметрические и компенсационные. В первом типе стабилизаторов используется постоянство напряжения некоторых видов приборов при изменении протекающего через них тока. Из полупроводниковых приборов таким свойством, как известно, обладает стабилитрон.

Во втором типе стабилизаторов задачу стабилизации напряжения решают по компенсационному принципу, основанному на автоматическом регулировании напряжения, подводимого к нагрузке.

Схема параметрического стабилизатора напряжения приведена на рис. 3.31. Она состоит из балластного резистора  $R_b$  и стабилитрона  $D$ . Стабилизатор подключается

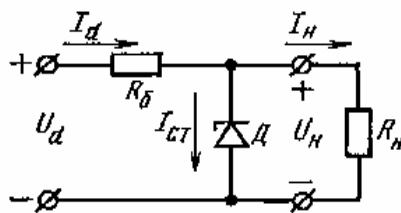


Рис. 3.31

к выходу выпрямителя с фильтром. Нагрузка включена параллельно стабилитрону.

При изменении напряжения  $U_d$  под действием колебания напряжения питающей сети или изменения сопротивления нагрузки  $R_n$  напряжение на нагрузке изменяется незначительно, так как оно определяется мало изменяющимся обратным напряжением стабилитрона  $U_{ст}$  при изменении протекающего через него тока.

Главным при расчете стабилизатора являются выбор типа стабилитрона на напряжение нагрузки  $U_{ст}=U_n$  и обеспечение условий его работы, при которых изменяющийся в процессе работы ток стабилитрона  $I_{ст}$  не выходил бы за пределы рабочего участка, т. е. не был меньше  $I_{стmin}$  и больше  $I_{стmax}$ .

Основные соотношения для токов и напряжений в стабилизаторе получаем, воспользовавшись первым и вторым законами Кирхгофа:

$$I_d = I_n + I_{ст}, \quad (3.28)$$

$$U_d = U_{R\delta} + U_n, \quad (3.29)$$

где  $U_{R\delta} = (I_n + I_{ст})R_\delta$ .

На основании соотношений (3.28), (3.29) для тока стабилитрона можно записать

$$I_{ст} = (U_d - U_n)/R_\delta - U_n/R_n. \quad (3.30)$$

Напряжение  $U_n$  определяемое напряжением  $U_{ст}$ , изменяется незначительно, в связи с чем его можно считать неизменным. Тогда в условиях изменения тока нагрузки (сопротивления  $R_n$ ) и напряжения  $U_d$  ток  $I_{ст}$ , будет изменяться от некоторого минимального значения  $I_{стmin}$  до максимального значения  $I_{стmax}$ . Минимальному значению тока  $I_{стmin}$  согласно выражению (3.30) будут соответствовать минимальные значения  $U_{dmin}$  и  $R_{nmin}$ , а максимальному значению тока  $I_{стmax}$  - максимальные значения  $U_{dmax}$  и  $R_{nmax}$ . Расчет стабилизатора сводится к тому, чтобы выбрать величину сопротивления  $R_\delta$  при которой через стабилитрон протекал бы ток  $I_{стmin}$ , соответствующий началу его рабочей характеристики. В связи с указанным для расчета балластного сопротивления имеем

$$R_\delta = (U_{dmin} - U_n)/(I_{стmin} + U_n/R_{nmin}). \quad (3.31)$$

Ток  $I_{стmax} = (U_{dmax} - U_n)/R_\delta - U_n/R_{nmax}$ , протекающий через стабилитрон в процессе работы схемы, учитывают выбором типа прибора по току, исходя из того, чтобы ток  $I_{стmax}$  не превышал максимально допустимого значения тока через стабилитрон. Максимальные мощности, рассеиваемые в стабилитроне и резисторе  $R_\delta$  рассчитывают по формулам

Таким образом, в процессе работы стабилизатора напряжение на нагрузке определяется напряжением на стабилитроне, соответствующим вольтамперной

$$P_{ст max} = U_{ст} I_{ст max},$$

$$P_{R\delta} = \frac{(U_{d max} - U_{ст})^2}{R_\delta}.$$



характеристике прибора. Изменение напряжения на нагрузке характеризуется изменением напряжения на стабилитроне при изменении тока  $I_{ст}$ : т. е. определяется его дифференциальным сопротивлением  $r_d$ . Показателем качества стабилизации напряжения служит коэффициент стабилизации  $K_{ст}$ , показывающий, во сколько раз относительное приращение напряжения на выходе стабилизатора меньше вызвавшего его относительного приращения напряжения на входе:

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_d}{U_d} : \frac{\Delta U_{н}}{U_{н}}.$$

Приращение напряжения на выходе стабилизатора  $\Delta U_{н}$  связано с приращением входного напряжения  $\Delta U_d$  соотношением

$$\Delta U_{н} = \frac{\Delta U_d (r_d \parallel R_{н})}{R_6 + r_d \parallel R_{н}}.$$

С учетом того, что  $R_{н} \gg r_d$  и  $R_6 \gg r_d$ , соотношение (3.32) можно записать в виде

$$\Delta U_{н} = \frac{\Delta U_d r_d}{R_6}. \quad (3.34)$$

Подстановкой (3.34) в (3.32) получаем выражение для коэффициента стабилизации параметрического стабилизатора напряжения:

$$K_{ст} = \frac{U_{н}}{U_d} \frac{R_6}{r_d}.$$

Обычно он не превышает 20—50.

Другим параметром стабилизатора является его выходное сопротивление  $R_{вых}$  стабилизаторов рассмотренного типа  $R_{вых} = r_d \parallel R_6 \approx r_d$ .

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

Рассчитать параметры параметрического стабилизатора напряжения и выбрать его элементы.

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

1. Определить коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора напряжения, если напряжение на входе стабилизатора  $U_d = 12$  В, балластное сопротивление  $R_6 = 100$  Ом, напряжение стабилизации стабилитрона  $U_{ст} = 9$  В, дифференциальное сопротивление стабилитрона  $r_{диф} = 10$  Ом. Ответ:  $K_{ст} = 7,5$ .

2. Определить какое напряжение необходимо подать на вход параметрического стабилизатора напряжения, чтобы получить коэффициент стабилизации  $K_{ст} = 20$ , если

стабилитрон имеет напряжение стабилизации  $U_{ст} = 9$  В, дифференциальное сопротивление стабилитрона  $r_{диф} = 10$  Ом, а балластное сопротивление  $R_б = 270$  Ом. Ответ:  $U_d = 12,15$  В.

3. Определить величину балластного сопротивления  $R_б$ , если напряжение на входе стабилизатора  $U_d = 12$  В, напряжение стабилизации стабилитрона  $U_{ст} = 9$  В, входной ток стабилизатора  $I_d = 15$  мА. Ответ:  $R_б = 200$  Ом.

4. Определить выходное сопротивление параметрического стабилизатора напряжения, у которого балластное сопротивление  $R_б = 100$  Ом, если при изменении тока стабилизации стабилитрона  $\Delta I_{ст} = 30$  мА напряжение стабилизации изменяется на величину  $\Delta U_{ст} = 180$  мВ. Ответ:  $R_{вых} = 5,66$  Ом.

5. Как изменится ток стабилизации стабилитрона в схеме параметрического стабилизатора, если входное напряжение изменилось на величину  $\Delta U_{вх} = 2$  В? Сопротивление резистора  $R_б = 200$  Ом. Считать, что напряжение на нагрузке не изменяется. Ответ:  $\Delta I_{ст} = 10$  мА.

7. Известно, что напряжение на входе параметрического стабилизатора изменяется в пределах  $U_d = 15 \pm 10\%$  В, напряжение стабилизации стабилитрона  $U_{ст} = 9$  В, ток стабилизации  $I_{ст} = 10$  мА, ток нагрузки  $I_n = 20$  мА. Определить в каких пределах изменяется ток на входе стабилизатора.

$$R_б = \frac{U_d - U_{ст}}{I_{ст} + I_n} = 200 \text{ Ом}$$

$$I_{d \max} = \frac{U_{d \max} - U_{ст}}{R_б} = 37,5 \text{ мА}$$

$$I_{d \min} = \frac{U_{d \min} - U_{ст}}{R_б} = 22,5 \text{ мА}.$$

8. Известно, что напряжение на входе параметрического стабилизатора изменяется в пределах  $U_d = 15 \pm 10\%$  В, напряжение стабилизации стабилитрона  $U_{ст} = 9$  В, ток стабилизации  $I_{ст} = 10$  мА, ток нагрузки  $I_n = 20$  мА. Определить в каких пределах изменяется ток стабилизации стабилитрона.

$$R_б = \frac{U_d - U_{ст}}{I_{ст} + I_n} = 200 \text{ Ом}$$

$$I_{d \max} = \frac{U_{d \max} - U_{ст}}{R_б} = 37,5 \text{ мА}$$

$$I_{d \min} = \frac{U_{d \min} - U_{ст}}{R_б} = 22,5 \text{ мА}.$$

$$I_{ст \max} = I_{d \max} - I_n = 17,5 \text{ мА}$$

$$I_{ст \min} = I_{d \min} - I_n = 2,5 \text{ мА}$$

## 5. Контрольные вопросы

1. Почему пульсации напряжения на стабилитроне невелики?
2. Почему короткое замыкание на выходе не выводит параметрический стабилизатор из строя?
3. Почему КПД параметрического стабилизатора невысок?
4. Когда применяют параметрические стабилизаторы?
5. Как изменяется режим работы стабилитрона при перегрузке?

## Список использованных источников

1. Щука, А. А. Электроника : учеб. пособие для вузов / А. А. Щука ; 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 № 7

### РАСЧЕТ КОМПЕНСАЦИОННОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

#### 1. Цель и задачи работы

**Цель работы:** получение практических навыков расчета компенсационных стабилизаторов напряжения.

**Задачи работы:** получение практических навыков расчета элементов схемы и параметров компенсационных стабилизаторов напряжения.

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

Принципиальная схема компенсационного стабилизатора напряжения последовательного типа приведена на рис. 3.33, а. Транзистор

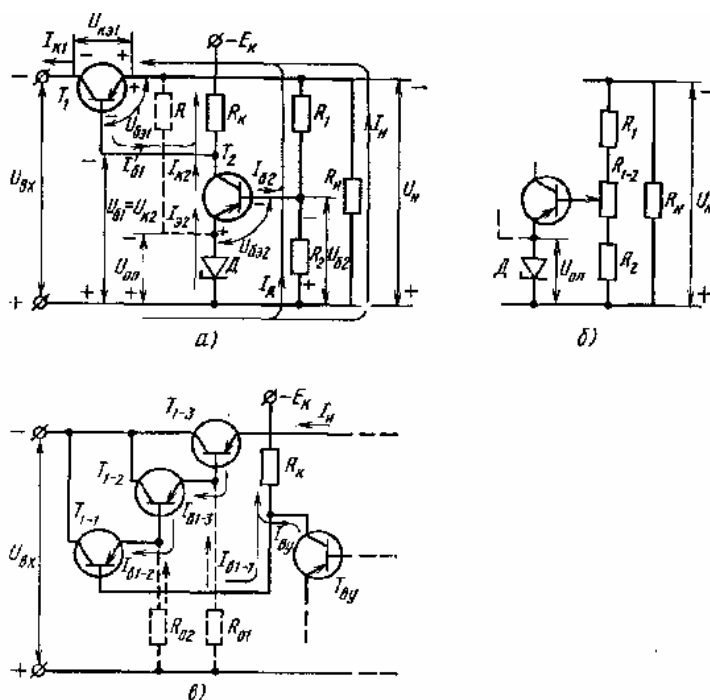


Рис. 3.33

$T_1$  служит регулирующим элементом, а усилитель постоянного тока (однокаскадный) выполнен на транзисторе  $T_2$ . Источником опорного напряжения является стабилитрон  $D$ , включенный в цепь эмиттера транзистора  $T_2$ . Резистор  $R$  (показан пунктиром) используют для вывода стабилитрона на рабочий участок характеристики, если ток  $I_{Э2}$  транзистора  $T_2$  мал. Резисторы  $R_1, R_2$  являются элементами входного делителя напряжения. Напряжение между базой и эмиттером транзистора  $T_2$   $U_{бэ2} = ((R_2 / (R_1 + R_2)) * (U_H - U_{оп}))$ .

Силовая цепь стабилизатора, включающая источник питания, транзистор  $T_1$ , и нагрузку  $R_H$ , представляет собой усилительный каскад на транзисторе  $T_1$  с общим коллектором, в котором  $U_{вх}$  — напряжение питания,  $U_{б1}$  — входное, а  $U_H$  — выходное напряжения ( $U_H = U_{б1} - U_{бэ1}$ ). Для получения требуемого напряжения  $U_H$  необходимо, чтобы напряжение на выходе усилителя ( $U_{к2} = U_{б1}$ ) было близко к напряжению  $U_H$ . Для этого питание коллекторной цепи транзистора  $T_2$  осуществляют от отдельного источника —  $E_K$ . Усилитель постоянного тока при этом обеспечивает соответствие необходимого напряжения  $U_{к2}$  напряжению его входной цепи  $U_{б2}$ . Указанные соображения положены в основу расчета элементов схемы по заданным параметрам  $U_H, I_H$  номинального режима.

Стабилизирующее действие схемы обусловлено наличием в ней глубокой отрицательной обратной связи по приращениям выходного напряжения  $U_H$ .

Предположим, что под действием уменьшения напряжения  $U_{вх}$  напряжение  $U_H$  (здесь и далее имеются в виду абсолютные значения напряжений) стало меньше номинального. Снижение напряжения  $U_H$  вызывает уменьшение напряжения на базе  $U_{б2}$  и напряжения  $U_{бэ2}$  транзистора  $T_2$ , а следовательно, его токов  $I_{б2}$  и  $I_{к2}$ . Уменьшение тока  $I_{к2}$  приводит к меньшему падению напряжения на резисторе  $R_K$  и увеличению напряжений  $U_{б1}$  и  $U_{бэ1}$  транзистора  $T_1$ . Вследствие увеличения напряжения  $U_{бэ1}$  напряжение  $U_{кэ1}$  транзистора  $T_1$  уменьшается, повышая тем самым почти до прежней величины напряжение  $U_H$ . Подобно рассмотренному осуществляется компенсация изменения напряжения  $U_H$  при увеличении  $U_{вх}$ , а также при изменениях тока нагрузки.

Коэффициент стабилизации стабилизатора находят из соотношения

$$K_{от} = \frac{R_K}{r_{вх2} A + R_K \frac{r_{б2}}{r_{к(э)2}} \left( 1 + \frac{R_1 \parallel R_2}{r_{б2}} \right)},$$

где  $r_{вх2}$ ,  $r_{б2}$ ,  $r_{к(э)2}$  — соответственно входное, базовое и коллекторное сопротивления транзистора  $T_2$ ;  $A = 1 + r_d / r_{вх2} + (R_1 \parallel R_2) / r_{вх2} \beta_2$  — поправочный коэффициент, учитывающий влияние динамического сопротивления стабилитрона  $r_d$  и сопротивлений делителя в базовой цепи транзистора  $T_2$ .

Выходное сопротивление стабилизатора в первом приближении (без учета влияния усилителя в цепи обратной связи) можно оценить по сопротивлению транзистора  $T_1$  со стороны эмиттера. Приняв  $U_{б1} = \text{const}$  имеем  $R_{вых} = r_{э1} + r_{б1} / (1 + \beta_1)$ , что составляет достаточно малую величину. Поскольку усилитель создает в схеме отрицательную обратную связь по напряжению, выходное сопротивление получается еще меньше. Для его расчета можно воспользоваться выражением

$$R_{вых} = (r_{э2} + r_d) / \beta_1 + r_{б2} / \beta_1 \beta_2 \quad (3.35)$$

Числовое значение коэффициента стабилизации стабилизатора находится в пределах нескольких сотен, а выходное сопротивление составляет десятые и сотые доли ома.

При разработке стабилизатора часто ставится задача регулирования его выходного напряжения  $U_H$ . Возможность регулирования напряжения можно показать, выразив напряжение  $U_H$  схемы через параметры входной цепи усилителя:

$$U_H = I_D(R_1 + R_2) + I_{B2}R_1. \quad (3.36)$$

Элементы входного делителя обычно выбирают достаточно низкоомными, обеспечивающими выполнение условия  $I_D \gg I_{B2}$ . Это необходимо для ослабления влияния изменяющегося в процессе работы схемы тока  $I_{B2}$  на напряжение  $U_{B2}$ , а следовательно, на коэффициент стабилизации стабилизатора. С учетом сказанного вторым членом в выражении (3.36) можно пренебречь. Тогда получим

$$\begin{aligned} U_H &= I_D(R_1 + R_2) = U_{B2} \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \\ &= (U_{оп} + U_{BЭ2}) \frac{R_1 + R_2}{R_2} \approx U_{оп} \frac{R_1 + R_2}{R_2}. \end{aligned}$$

Таким образом, задачу регулирования напряжения решают путем изменения соотношения плеч выходного делителя, что реализуется введением во входную цепь усилителя потенциометра  $R_{1-2}$  (рис. 3.33, б). Пределы регулирования напряжения при этом составляют:

$$\begin{aligned} U_{H \max} &\approx U_{оп} \frac{R_1 + R_{1-2}}{R_2}, \\ U_{H \min} &\approx U_{оп} \frac{R_1}{R_2 + R_{1-2}}. \end{aligned}$$

Если, например, принять  $U_{оп} = 10$  В,  $R_1 = 300$  Ом,  $R_2 = 360$  Ом и  $R_{1-2} = 240$  Ом, то выходное напряжение стабилизатора можно регулировать в диапазоне от 5 до 15 В. Напряжение  $U_H$  стабилизатора связано с напряжениями входной цепи транзистора  $T_1$ , соотношением

$$U_H = U_{B1} - U_{BЭ2} = U_{K2} - U_{BЭ1} \quad (3.37)$$

Или

$$U_H = E_K - (I_{B1} - I_{K2})R_K - U_{BЭ1} \quad (3.38)$$

Соотношение (3.38) позволяет сделать ряд важных выводов о работе стабилизатора и возможностях его применения. С этой целью рассмотрим два режима работы стабилизатора:  $U_{ВХ} = \text{var}$ ,  $R_H = \text{const}$  ( $I_H = \text{const}$ ) и  $U_{ВХ} = \text{const}$ ,  $R_H = \text{var}$  ( $I_H = \text{var}$ ).

При изменении входного напряжения величина  $U_H$  стабилизатора изменяется незначительно. Поэтому можно считать, что приращение напряжения  $\Delta U_{ВХ}$  будет скомпенсировано соответствующим увеличением или уменьшением напряжения  $\Delta U_{KЭ1}$  транзистора  $T_1$ . При условии  $I_{B1} = I_H = \text{const}$  это вызовет в конечном итоге изменение тока базы, (и коллектора) регулирующего транзистора посредством изменения тока  $I_{K2}$  усилителя, протекающего через резистор  $R_K$ . Напряжение  $U_H$  будет тем стабильнее, чем меньшему значению  $\Delta U_H$  будет соответствовать необходимое изменение тока  $I_{K2}$ , т. е. чем выше будет коэффициент усиления усилителя. Повышение коэффициента усиления в рассматриваемой схеме достигается увеличением коэффициента  $\beta_2$  и сопротивления  $R_K$ . Увеличение сопротивления  $R_K$  при этом требует повышения напряжения питания  $E_K$  усилителя.

В условиях изменяющегося тока нагрузки ток базы регулирующего транзистора  $I_{B1}$  изменяется пропорционально  $I_H$ , так как  $I_{B1} = I_H / (1 + \beta_1)$ . Поскольку напряжение  $U_{BЭ1}$  мало (доли вольта), режиму стабилизации напряжения  $U_H$  согласно выражению (3.38) соответствует почти неизменная сумма токов  $I_{B1} + I_{K2}$ . Это означает, что с уменьшением тока

$I_H$  ток  $I_{K2}$  увеличивается на величину, на которую уменьшился ток  $I_{B1}$ . При изменении нагрузочного тока от  $I_{Hmax}$  до нуля ток  $I_{K2}$  изменяется от некоторого минимального значения  $I_{K2min}$  до  $I_{Hmax}/(1+\beta_1)+I_{K2min}\approx I_{Hmax}/(1+\beta_1)=I_{B1max}$ . Таким образом, транзистор  $T_2$  в схеме рис. 3.33, а необходимо выбирать на коллекторный ток, близкий к максимальному току базы регулирующего транзистора.

С увеличением тока  $I_H$  транзисторы  $T_1, T_2$  выбираются на большие коллекторные токи. Однако использование рассматриваемой схемы при  $I_H > 200 - 300$  мА неэффективно из-за трудностей в обеспечении высоких значений коэффициента усиления усилителя, а, следовательно, и коэффициента стабилизации. Причина заключается в вынужденном уменьшении сопротивления  $R_K$  (ввиду больших значений  $I_{B1}$  и  $I_{K2}$ ), а также в малых значениях коэффициента  $\beta$  мощных транзисторов.

Задачу уменьшения тока базы регулирующего транзистора при переходе к большим токам нагрузки решают заменой его в стабилизаторе составным транзистором (рис. 3.33, в). Составной транзистор представляет собой соединение двух, трех транзисторов и более, при котором база каждого последующего транзистора связана с эмиттером предшествующего, а коллекторы всех транзисторов объединены.

Поскольку ток базы каждого транзистора меньше его тока эмиттера в  $1+\beta$  раз, ток управления составным транзистором получается во много раз меньше тока эмиттера выходного транзистора (т. е. тока нагрузки стабилизатора). Так, для схемы, состоящей из трех транзисторов (рис. 3.33, а), имеем

$$I_{B1-1} = \frac{I_H}{(1+\beta_{1-3})(1+\beta_{1-2})(1+\beta_{1-1})} \approx \frac{I_H}{\beta_{1-3}\beta_{1-2}\beta_{1-1}} = \frac{I_H}{\beta_c}$$

где  $\beta_c$  — коэффициент передачи тока составного транзистора, числовое значение которого равно  $10^3$ — $10^4$ .

Тем самым обеспечивается необходимый режим согласования по току выходной цепи усилителя и входной цепи регулирующего транзистора при больших токах  $I_H$ .

Токоотводящие резисторы  $R_{01}, R_{02}$  (показаны пунктиром) создают цепи протекания

$$R_{0(1,2)} = (1,5 \div 2) \frac{U_H}{I_{K0(1,2)}}.$$

начальных токов  $I_{K0(э)}$  транзисторов  $T_{1-1}$ , и  $T_{1-2}$ , исключая их протекание по цепям баз последующих транзисторов. С их помощью обеспечивается нормальный режим работы схемы при минимальном токе нагрузки. Для расчета сопротивлений  $R_{01}$  и  $R_{02}$  можно воспользоваться соотношением

Составные транзисторы нашли широкое применение в стабилизаторах на токи  $0,5$  —  $1$  А и выше.

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

Рассчитать основные параметры компенсационного стабилизатора напряжения и выбрать элементы схемы.

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

#### Расчёт регулирующего элемента

При статическом расчёте по току нагрузки  $I_P$  и максимальному напряжению питания  $U_{n\ max}$  определяются количество и тип РЭ. При этом основным критерием при выборе количества, как и при выборе режима их работы, является минимизация электрических

потерь в РЭ. Помимо этого в статический расчёт входит выбор элементов источника эталонного напряжения, сопротивлений резисторов цепи ООС, определяется коэффициент усиления ОУ, необходимый для стабилизации, фильтрации, выходного сопротивления. Статический расчёт проводится в следующем порядке:

Выберем количество и тип транзисторов РЭ:

Ток коллектора оконечного транзистора

$$I_k = I_H(1 + d_y),$$

где  $d_y = 0.05$ , так как предполагается, что вспомогательные цепи управления увеличивают ток нагрузки коллектора транзистора РЭ на 5%:

$$I_k = 5(1 + 0.05) = 5.25 \text{ A}.$$

Количество транзисторов в РЭ определяется следующим образом:

$$n - 1 = \frac{\lg \frac{I_H}{I_{OY} * h_{21Э}}}{\lg h_{21Э}}$$

где  $h_{21Эi} = h_{21Э0} * H_i$ ;  $m$  - расчётный коэффициент, выбираемый из интервала [0 - 4];  $I_{OY}$  - выходной ток ОУ;  $h_{21Э0}$  - типовой (расчётный) статический коэффициент передачи тока транзистора;  $i$  - порядковый номер транзистора.

Принимая  $I_{OY} = 8 \text{ mA}$ ,  $h_{21Э0} = 20$  (для мощных транзисторов),  $h_{21Э02} = 50$  (для транзисторов малой и средней мощности) и выбирая для всех транзисторов  $m_p = 1$ , поскольку чем меньше  $m_p$ , тем выше КПД НКСН, получаем

$$H = 1 + 0.092 e^{-0.2(1+1)} = 0.42; h_{21Э1} = 8.4; h_{21Э2} = 21;$$

$$n - 1 = \frac{\lg \frac{5.25}{8 * 10^{-3} * 8.4}}{\lg 21} \approx 1.4$$

Для дальнейших расчётов принимаем количество транзисторов в РЭ  $n = 2$ .

Напряжение на РЭ (если применяются транзисторы одного типа проводимости) равно

$$U_{РЭ} = U_{КЭ}(1 + m_p) + (n - 1)U_{БЭ},$$

где  $U_{КЭ}$ ,  $U_{БЭ}$  - напряжение коллектор-эмиттер и напряжение база-эмиттер. Для  $U_{КЭ} = 1.8 \text{ В}$  и  $U_{БЭ} = 0.7 \text{ В}$

$$U_{РЭ} = 1.8 - (1 + 1) + 1 - 0.7 = 4.3 \text{ В}.$$

Минимально необходимое напряжение источника питания

$$U_{n. \min} = U_n + U_{РЭ\min} + U_{m \text{ пульс. п.}}, \text{ т. е. } U_{n. \min} = 5 + 4.3 + 0.1 = 9.4 \text{ В}$$

С учётом допуска на изменения напряжения питания номинальный и максимальный уровни составляют:

$$U_{n. \text{ном}} = \frac{U_{n. \min}}{1 - \delta_-} = \frac{9.4}{1 - 0.1} = 10.4 \text{ В}$$

$$U_{n. \max} = U_{n. \text{ном}} * (1 + \delta_+) = 11.96 \text{ В} \approx 12 \text{ В}$$

Поскольку на выходе стабилизатора может быть включён конденсатор, то в момент включения всё напряжение источника питания будет приложено к РЭ. Поэтому выбор оконечного транзистора производится по  $U_{n. \max}$  и

$$I_{k. \max} = (1.5 \div 2) \cdot I_k = 9 \text{ A}.$$

Выбираем транзистор КТ927В с параметрами  $I_{k. \max} = 10 \text{ A}$ ,  $U_{КЭ} = 35 \text{ В}$ ,  $h_{21Э1} = 40 \div 100$  (для дальнейших расчётов принимаем  $h_{21Э1} = 40$ ).

Второй транзистор РЭ выбираем по  $U_{n. \max}$  и  $I_{k. \max} / h_{21ЭР}$  предыдущего транзистора  $= 10 / 40 = 0.25 \text{ A}$ .

Выбираем транзистор КТ630Б с параметрами  $I_{k. \max} = 1 \text{ A}$ ,  $U_{КЭ} = 120 \text{ В}$ ,  $h_{21Э2} = 80 - 240$  (для дальнейших расчётов принимаем  $h_{21Э2} = 80$ ).

Определяем коэффициент усиления РЭ по напряжению (с учётом параметров транзисторов РЭ в режиме, близком к граничному:  $m_p = 1$ ;  $r_k = 10 \text{ Ом}$ ;

$$R_H \gg r_э, \text{ где } R_H = \frac{U_n}{I_n} = 10 \text{ Ом}, (R_H + r_э)h_{21Э} > r_б,$$

$$K_{РЭВ} \approx \frac{r_{k1}}{R_H} \Rightarrow K_{РЭВ} \approx \frac{10}{1} \approx 10$$

### Расчёт источника эталонного напряжения.

Рассчитывается требуемый ТКН стабилитрона ( $\mu_{ЭТ}$ ) при условии, что температурные изменения выходного напряжения НКСН определяется стабилитроном эталонного источника напряжения:

$$\mu_{ЭТ} = \frac{2 * \delta U_n * 100\%}{c_B \Delta T},$$

где  $c_B$  - весовой коэффициент, определяющий степень воздействия температуры окружающей среды ( $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$  - диапазон её изменения) на выходное напряжение стабилизатора. Для  $c_B = 1$  получаем

$$\mu_{ЭТ} = \frac{2 * 0,02 * 100}{1 * 30} = 0,13\% / ^\circ \text{C}.$$

По ТКН и условию  $U_{\text{ст. max}} < U_n$  выбираем стабилитрон типа КС139А с характеристиками  $\mu_{ЭТ} = -0,10\% / ^\circ \text{C}$ ,  $r_{\text{диф}} = 60 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{ст. ном}} = 10 \text{ мА}$ ,

$$U_{\text{ст. ном}} = 3,9 \text{ В} \pm 10\%.$$

Определяем сопротивление балластного резистора

$$R_б = \frac{U_n - U_{\text{ст. max}}}{I_{\text{ст. ном}}} = \frac{5 - 4,29}{10 * 10^{-3}} = 71 \text{ Ом}$$

Мощность, рассеиваемая на этом резисторе

$$P_б = I_{\text{ст}}^2 R_б = 0,01^2 * 71 = 7,1 * 10^{-5} \text{ Вт}.$$

Выбираем резистор типа С2-23 мощностью 0,062 Вт с сопротивлением 71 Ом.

По значению  $U_n$  и  $U_{\text{ст. ном}}$  определяется коэффициент передачи цепи ООС по напряжению

$$\beta_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ст. ном}}}{U_n} = \frac{3,9}{5} = 0,78.$$

### Расчёт усилителя сигнала рассогласования.

Определяется коэффициент усиления ОУ по требованиям к коэффициенту стабилизации и выходному сопротивлению стабилизатора

$$K_{\beta \text{ОС}} = \max \left\{ \alpha_B \frac{\delta U_n * U_n}{\delta U_n * U_n K_{\text{мЭе}}}; b_B \frac{\Delta I_n (h_{21Эм} * r_э + R_y + r_э^*)}{\delta U_n * U_n * h_{21Эм}} \right\},$$

где  $\alpha_B$  и  $b_B$  - весовые коэффициенты, связанные соотношением  $\frac{1}{\alpha_B} + \frac{1}{b_B} = 1 - \frac{1}{c_B}$  и выбираемые так, чтобы значение  $K_{\beta \text{ОС}}$  (коэффициент передачи разомкнутого контура), рассчитываемое по выражениям в фигурных скобках, было примерно одинаковым.

Для  $\alpha_B = 70$  и  $b_B = 20$

$$K_{\beta \text{ОС}} = \max \left\{ 70 \frac{0,15 * 10,4}{0,02 * 5 * 10} \approx 109; 20 \frac{0,5 (40 * 0,5 + \frac{400}{80^2} + 2)}{0,01 * 5 * 40} \approx 110 \right\}$$



Коэффициент усиления ОУ определяется из следующего соотношения

$$K_{OY} = \frac{K_{\beta OC}}{\beta_{OC}} = \frac{110}{0.78} \approx 142$$

По  $K_{OY}$  выбирается ОУ типа К140УД6 с параметрами:  $K_{OY} = 30000$ ,

$$U_n = \pm 5 \div 20 \text{ В}, I_{ном} = 3 \text{ нА}, I_{ВХ} = 100 \text{ нА}, \Delta I_{ВХ} = 25 \text{ нА}, \Delta \Delta I_{ВХ} = 0.1 \text{ нА} / ^\circ \text{С},$$

$$U_{дрлр} = 30 \text{ мкВ} / ^\circ \text{С}$$

Определяем сопротивления резисторов в цепях смещения ОУ и ООС:

$$R_1 = \frac{U_{cm}}{q_o * I_{ВХ}} = \frac{3.9}{100 * 0.1 * 10^{-6}} = 390 \text{ кОм}$$

$$R_2 = \frac{U_H}{q_o * I_{ВХ}} - R_1 = \frac{5}{100 * 0.1 * 10^{-6}} - 390000 = 110 \text{ кОм}$$

где  $q_o = \frac{I_o}{I_{ВХ}} = 100$ ;  $I_o$  – ток делителя  $R_1 R_2$ .

Для выбора резисторов рассчитаем их номинальные мощности:

$$P_1 = I_o^2 * R_1 = (1 * 10^{-5})^2 * 3.9 * 10^5 = 3.9 * 10^{-5} \text{ Вт}$$

$$P_2 = I_o^2 * R_2 = (1 * 10^{-5})^2 * 1.1 * 10^5 = 1.1 * 10^{-5} \text{ Вт}$$

Выбираем резистор  $R_1$  - С2-23 с параметрами  $P=0,062 \text{ Вт}$ ,  $R = 390 \text{ кОм}$ .

Выбираем резистор  $R_2$  - С2-23 с параметрами  $P=0,125 \text{ Вт}$ ,  $R = 110 \text{ кОм}$ .

Уточняется изменение выходного напряжения НКСН при воздействии температуры окружающей среды с учётом температурного дрейфа характеристик ОУ:  $\delta U_H = S_H * \Delta T$ , где

$$A \approx \frac{R_o}{R_o + R_y} * \frac{\Delta E_{cm}}{U_H} + \frac{\Delta U_{дрлр}}{U_H} + \frac{R_1 * \Delta \Delta I_{ВХ}}{U_H}$$

$$S_n = \frac{(R_1 + R_2) * (R_o + R_y)}{(R_1 * R_o - R_2 * R_y)}$$

где  $R_c = r_{диф} = 600 \text{ Ом}$ ,

$$\Delta U_{дрлр} = U_{дрлр} \Delta T = 9 * 10^{-4},$$

$$\Delta E_{cm} = \mu_{cm} * U_{cm} * \Delta T * 10^{-2} = 0.117$$

## 5. Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия компенсационного стабилизатора напряжения?
2. Какие максимальное и минимальное напряжения можно получить на выходе исследуемой схемы?
3. Как влияет сопротивление резистора  $R_2$  на коэффициент стабилизации?
4. Почему компенсационный стабилизатор сглаживает пульсации?
5. В каком режиме мощность, рассеиваемая транзистором, минимальна?

## 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.

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 № 8

### 1. Цель и задачи работы

#### РАСЧЕТ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ПЕРВОГО И ВТОРОГО ПОРЯДКОВ

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

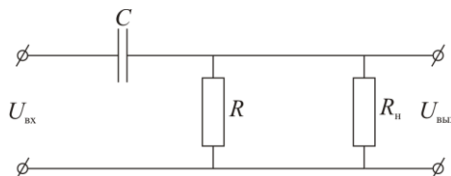
**Задачи работы:** получение практических навыков расчета элементов схемы параметров активных фильтров верхних и нижних частот первого порядка.

### 2. Общие положения (теоретические сведения)

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

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

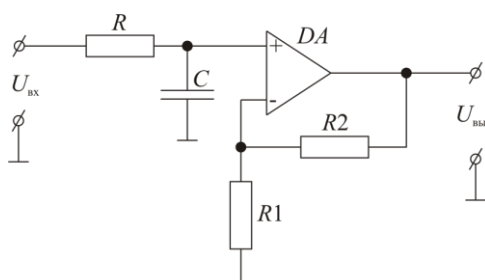
где  $K_0$  - коэффициент передачи в полосе пропускания;  $a_1$  - постоянная времени фильтра. Для получения передаточной функции фильтра высоких частот, в формуле (11) необходимо делать следующую замену:  $p \rightarrow 1/p$ , а в электрической принципиальной схеме – поменять местами резистор и конденсатор.



#### Пример пассивного фильтра верхних частот I порядка

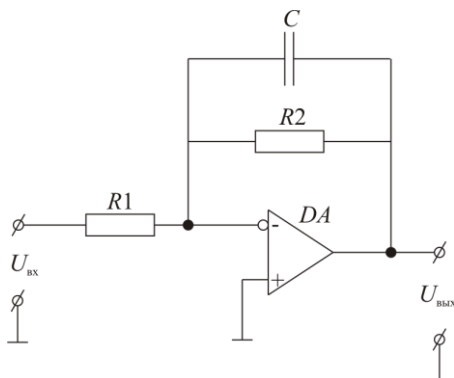
$$K(p) = \frac{K_0}{1 + \frac{a_1}{p}} \Rightarrow K(p) = \frac{K_0 p}{a_1 + p}.$$

### 1. Неинвертирующий фильтр нижних частот

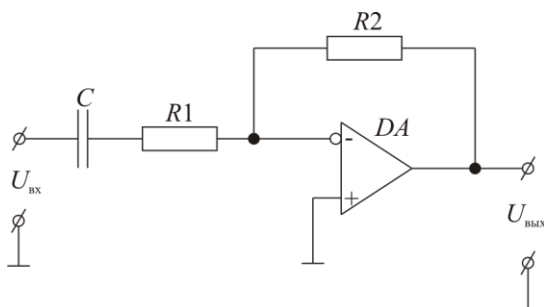


Неинвертирующий фильтр нижних частот представляет собой пассивную  $RC$  – цепь, у которой постоянная времени равна  $RC$ . К выходу  $RC$  – цепи в качестве нагрузочного подключено входное сопротивление операционного усилителя, которое стремится к бесконечности.

## 2. Инвертирующий фильтр нижних частот



## 3. Инвертирующий фильтр верхних частот



$$T = R_2 C.$$

## 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:

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

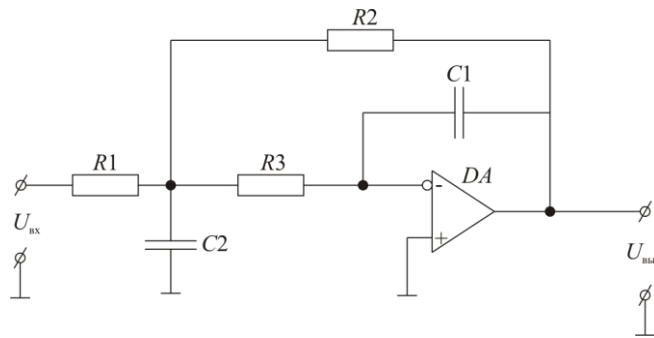
$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_{cp} a_1 C};$$

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

#### 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  $R_1, R_2, R_3$ .

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

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

$$\begin{cases} \frac{C_2}{C_1} \geq \frac{4b_1(1-K_0)}{a_1^2}, \\ R_3 = \frac{b_1}{4\pi^2 f_{cp}^2 C_1 C_2}; \\ K(0) = -\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_1 = \frac{R_2}{K(0)}. \end{cases}$$

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 первого и 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

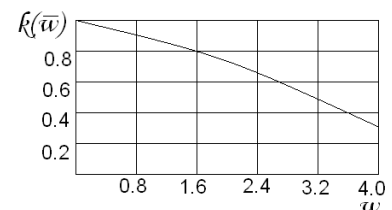
1. Для чего применяются фильтры?
2. Какие недостатки имеют пассивные фильтры?
3. Из какого условия выбираются конденсаторы в фильтре нижних частот второго порядка?
4. Как называется область частот, в которой фильтр мало ослабляет сигнал?
5. Какой вид имеет передаточная функция ФНЧ первого порядка?
6.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

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

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

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

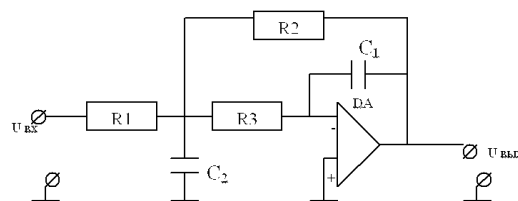
7. Определить по виду АЧХ какой это фильтр 4-ого порядка:



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

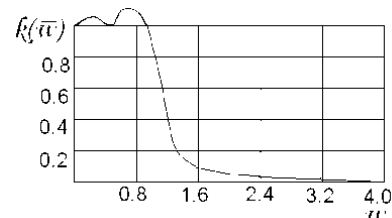
$$1. \quad \frac{C_2}{C_1} \geq \frac{4B_1(1-K_0)}{a_1^2} \quad 2. \quad \frac{C_2}{C_1} \leq \frac{4B_1(1-K_0)}{a_1^2}$$

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



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.