

# Лабораторная работа №4

## Операционные усилители

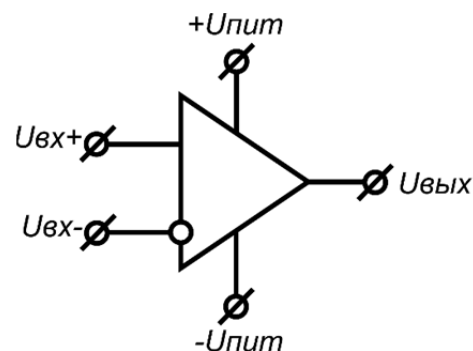
### Теоретические сведения

#### 1. Понятие операционный усилитель

Операционный усилитель (ОУ) – основной элемент аналоговой схемотехники, на его базе реализуются узлы для выполнения различных операций над аналоговыми сигналами. К таким операциям относятся масштабирование, сравнение, сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование и т.д.

ОУ представляет собой многокаскадный усилитель напряжения или тока, выполненный в виде интегральной микросхемы. Далее будем рассматривать усилитель напряжения.

Операционный усилитель имеет два входа – **инвертирующий** и **неинвертирующий**, - на которые подаются входные сигналы в форме напряжения. Инвертирующий вход на схеме отмечается кружком или знаком минус. Усилитель имеет один выход, на котором формируется выходное напряжение



$$U_{\text{ВЫХ}} = k \cdot (U_{\text{ВХ}+} - U_{\text{ВХ}-}) \quad (1)$$

Соотношение (1) позволяет рассматривать операционный усилитель как источник напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ , управляемый напряжением  $\Delta U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}+} - U_{\text{ВХ}-}$ .

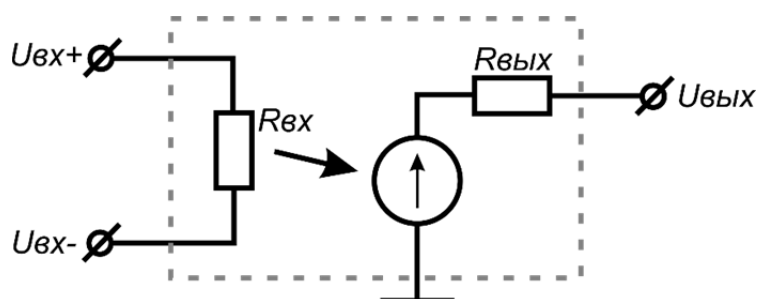


Рис. 2. Эквивалентная схема операционного усилителя

Для обеспечения работоспособности у ОУ есть 2 вывода питания  $+U_{\text{пит}}, -U_{\text{пит}}$ . В электрических схемах эти выводы могут не показываться. В общем случае к усилителю прикладывается двуполярное питание порядка  $\pm 5 \div \pm 15 \text{ В}$ . Однако существуют схемы включения усилителя и с однополярным питанием.

Коэффициент усиления  $k$  операционного усилителя велик и равен величине порядка  $10^5 \div 10^6$ . Для получения требуемого коэффициента усиления ОУ дополняется цепью обратной связи. Таким способом формируются 3 основные схемы включения операционного усилителя:

1. *инвертирующий усилитель* (Рис. 3)

2. *неинвертирующий усилитель* (Рис. 4)

3. *дифференциальный усилитель* (Рис. 5)

## 2. Концепция идеального ОУ

Данная концепция применяется для инженерных расчетов схем на ОУ, при наличии обратной связи. Предполагается, что ОУ обладает следующими идеальными характеристиками:

- $k = \infty$
  - $R_{\text{вх}} = \infty$
  - $R_{\text{вых}} = 0$
- (2)

Из этого следует:

1) **Входные токи идеального ОУ равны нулю**  $I_+ = I_- = 0$  (3)

Т.к.  $R_{\text{вх}} = \infty$ , входные токи в ОУ не текут.

2) **Потенциалы входов ОУ равны**  $\varphi_+ = \varphi_-$  (4)

Выходное напряжение не может превосходить напряжение питания

$$U_{\text{вых}} \leq U_{\text{пит}}$$

С другой стороны,  $U_{\text{вых}} = k \cdot \Delta U_{\text{вх}}$ , где  $k = \infty$

Следовательно,  $\Delta U_{\text{вх}} \leq \frac{U_{\text{пит}}}{k} = 0 \rightarrow \varphi_+ = \varphi_-$

Соотношения (3), (4) широко используются для расчета схем на ОУ

### 3. Основные схемы включения ОУ

#### 3.1. Инвертирующий усилитель

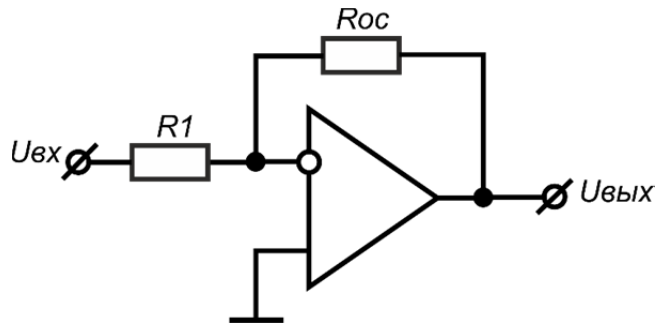


Рис. 3. Инвертирующий усилитель

*Приведенная схема содержит ОУ, охваченный отрицательной обратной связью. Для расчета выходного напряжения можно применить концепцию идеального ОУ.*

- 1) Известен потенциал неинвертирующего входа:  $\varphi_+ = 0 \text{ В}$ .

Согласно соотношению (4),  $\varphi_- = \varphi_+ = 0 \text{ В}$ .

- 2) Найдем ток через резистор  $R_1$ :

$$I_1 = \frac{U_{\text{ВХ}} - \varphi_-}{R_1} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1}$$

- 3) После резистора  $R_1$ , ток  $I_1$  разделяется на входной ток ОУ и ток  $I_{\text{ОС}}$  через резистор обратной связи.

$$I_1 = I_{\text{ВХ-}} + I_{\text{ОС}}$$

Согласно концепции идеального ОУ  $I_{\text{ВХ-}} = 0$ , тогда

$$I_{\text{ОС}} = I_1$$

- 4) Определим выходное напряжение схемы

$$I_{\text{ОС}} R_{\text{ОС}} = U_{R_{\text{ОС}}} = \varphi_- - U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВЫХ}}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -I_{\text{ОС}} R_{\text{ОС}} = -\frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} \cdot R_{\text{ОС}}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \left( -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} \right)$$

 (5)

### 3.2. Неинвертирующий усилитель

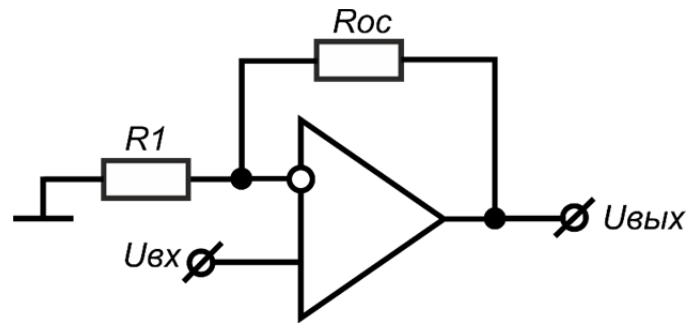


Рис. 4. Неинвертирующий усилитель

*Приведенная схема содержит ОУ, охваченный отрицательной обратной связью. Для расчета выходного напряжения можно применить концепцию идеального ОУ.*

- 1) Известен потенциал неинвертирующего входа:  $\varphi_+ = U_{\text{ВХ}}$ .

Согласно соотношению (4),  $\varphi_- = \varphi_+ = U_{\text{ВХ}}$ .

- 2) Найдём ток через резистор  $R_1$ :

$$I_1 = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1}$$

- 3) Согласно концепции идеального ОУ входной ток  $I_{\text{ВХ-}} = 0$ , значит

$$I_{\text{ОС}} = I_1 = I$$

- 4) Определим выходное напряжение неинвертирующего усилителя:

$$U_{\text{ВЫХ}} = I \cdot (R_{\text{ОС}} + R_1) = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} \cdot (R_{\text{ОС}} + R_1)$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \left( 1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} \right)$$

 (6)

- 5) **Частный случай.**

При  $R_1 = \infty$ .  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}$   $k = 1$

Усилитель работает в режиме **повторителя напряжения**.

### 3.3. Дифференциальный усилитель

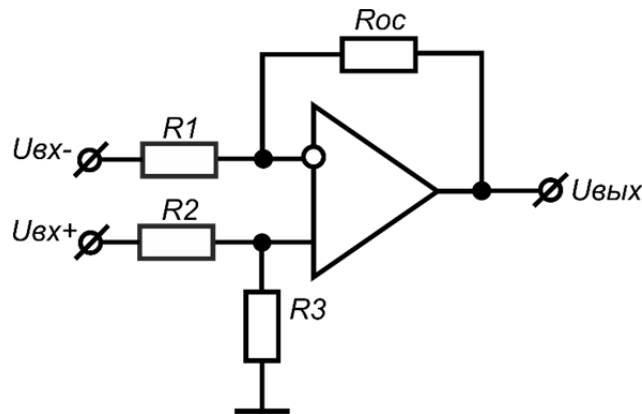


Рис. 5. Дифференциальный усилитель

1) Т.к. схема построена на ОУ, охваченном отрицательной ОС, для нее будут справедливы соотношения, полученные на основе концепции идеального ОУ.

2) Рассмотрим дифференциальный усилитель как суперпозицию схем инвертирующего и неинвертирующего усилителей. Тогда из выражений (5), (6) и принципа суперпозиции получаем:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх-}} \left( -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} \right) + \varphi_{\text{вх+}} \left( 1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} \right)$$

3) Неинвертирующий вход ОУ является средней точкой делителя  $R_2 R_3$ :

$$\varphi_{\text{вх+}} = U_{\text{вх+}} \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

4) Получим

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх-}} \left( -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} \right) + U_{\text{вх+}} \frac{R_3}{R_2 + R_3} \left( 1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} \right) \quad (7)$$

5) При  $\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} = k$  выражение (7) упрощается:

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} (U_{\text{вх+}} - U_{\text{вх-}})$$

(8)

#### 4. Источник тока на ОУ

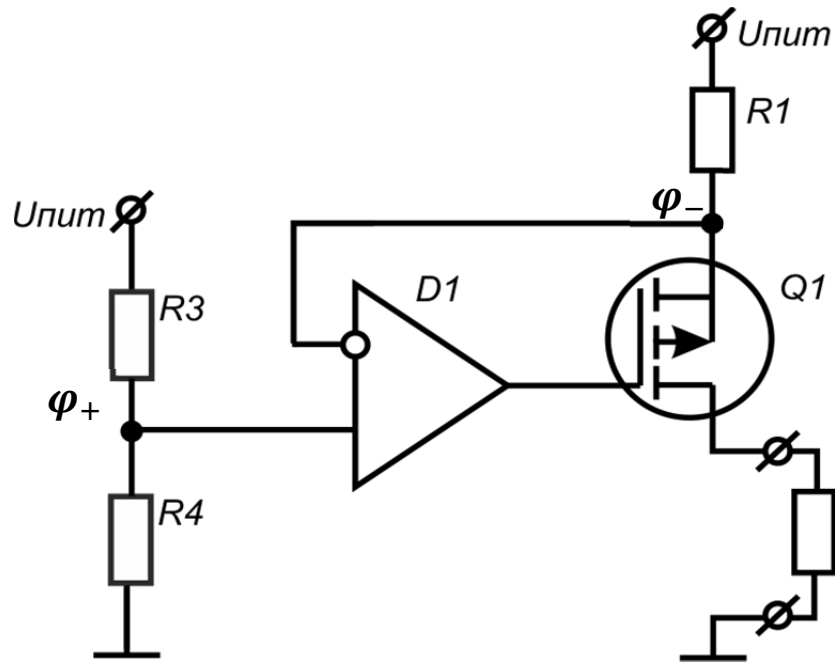


Рис. 6. Источник тока

Для расчета данной схемы применим концепцию идеального ОУ.

- 1)  $\varphi_+ = \varphi_-$  (находится из схемы делителя  $R3R4$ )
- 2) По первому закону Кирхгофа ток через резистор  $R1$  разделяется на входной ток ОУ  $I_{вх+}$  и ток нагрузки  $I_{load}$ .

$$I_{R1} = I_{вх+} + I_{load}$$

Согласно концепции идеального ОУ  $I_{вх+} = 0$ . Тогда

$$I_{load} = I_{R1}$$

#### 5. Однополярное питание ОУ

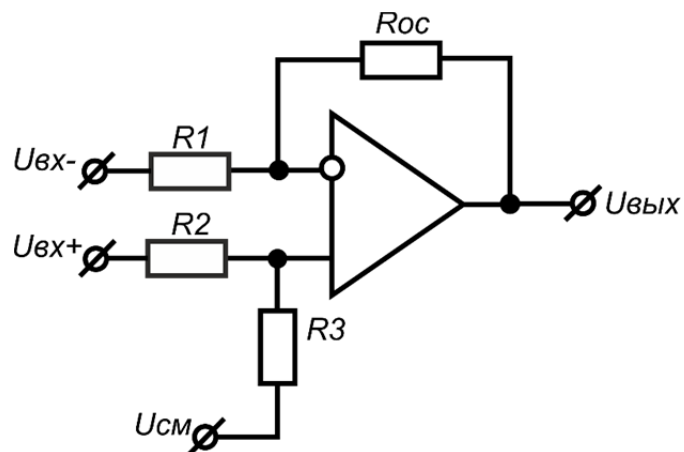


Рис. 7. Смещение нуля при однополярном питании ОУ

Операционный усилитель может работать от одного источника питания, например, только положительного. В этом случае второй вывод питания заземляется и выходное напряжение ограничивается диапазоном

$$U_{вых} = 0 \dots +U_{пит.}$$

При таком включении, в случае, если на выходе теоретически должно быть сформировано отрицательное напряжение, фактически получится

$$U_{вых} = 0$$

В то же время положительные напряжения будут обрабатываться корректно.

Для усиления сигналов отрицательной полярности можно сместить рабочую точку усилителя из нуля на величину  $U_{см}$ . (Рис. 7). Тогда выходной сигнал будет симметричен относительно  $U_{см}$  и все его значения можно разместить в положительной области (Рис.8).

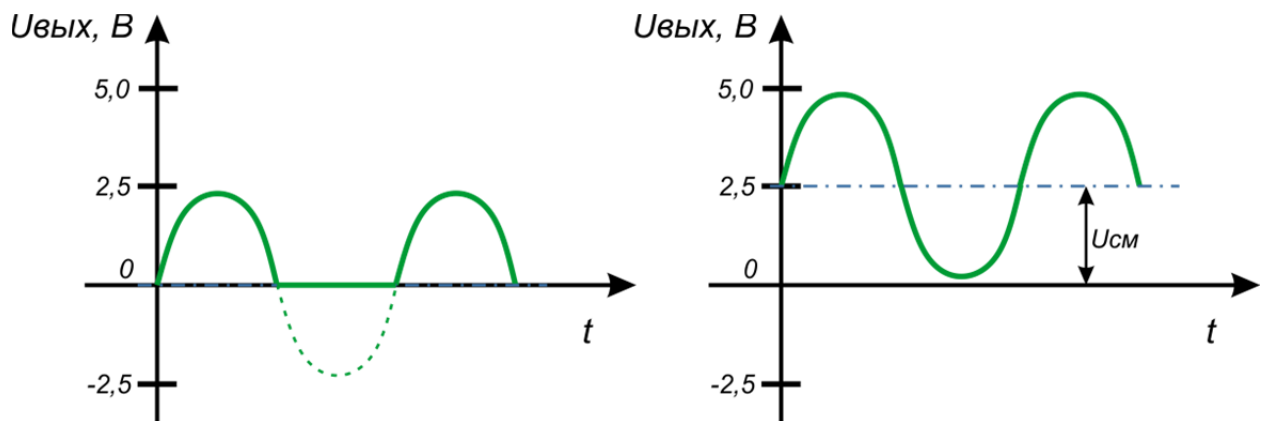


Рис. 8. Смещение рабочей точки усилителя

## Разработка схемы измерения сопротивления по четырехпроводной схеме подключения.

Функциональная схема четырехпроводного измерителя сопротивления показана на рисунке 9. Она состоит из следующих функциональных блоков:

1. Стабилизатор напряжения;
2. Источник постоянного тока;
3. Схема измерителя напряжения;
4. Усилитель;
5. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Рассмотрим все блоки по отдельности, кроме АЦП (в рамках данного курса реализация преобразователей информации не рассматривается).

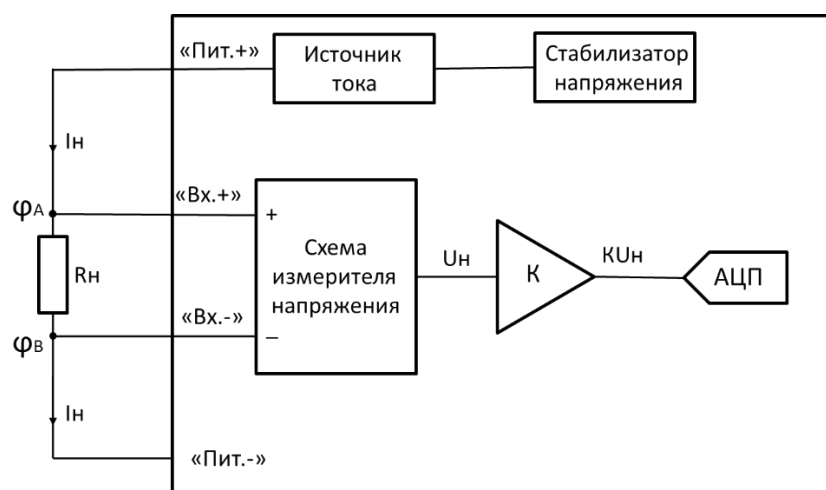


Рис. 9 Функциональная схема измерителя сопротивления

### Стабилизатор напряжения

Так как напряжение питания устройства может изменяться в достаточно широком диапазоне, напряжение питания схемы измерителя сопротивления ( $V_{CC}$ ) необходимо поддерживать постоянным. Для этого воспользуемся линейным стабилизатором. Нам нужно определить выходное напряжение стабилизатора. С одной стороны, чем выше выходное напряжение к напряжению питания, тем выше КПД схемы. С другой стороны, необходимо учитывать, что это напряжение является напряжением питания операционных усилителей и источника тока.



## Источник тока

На рисунке 10 показана схема стабилизатора напряжения с источником тока, нагруженным на  $R_{load}$ .

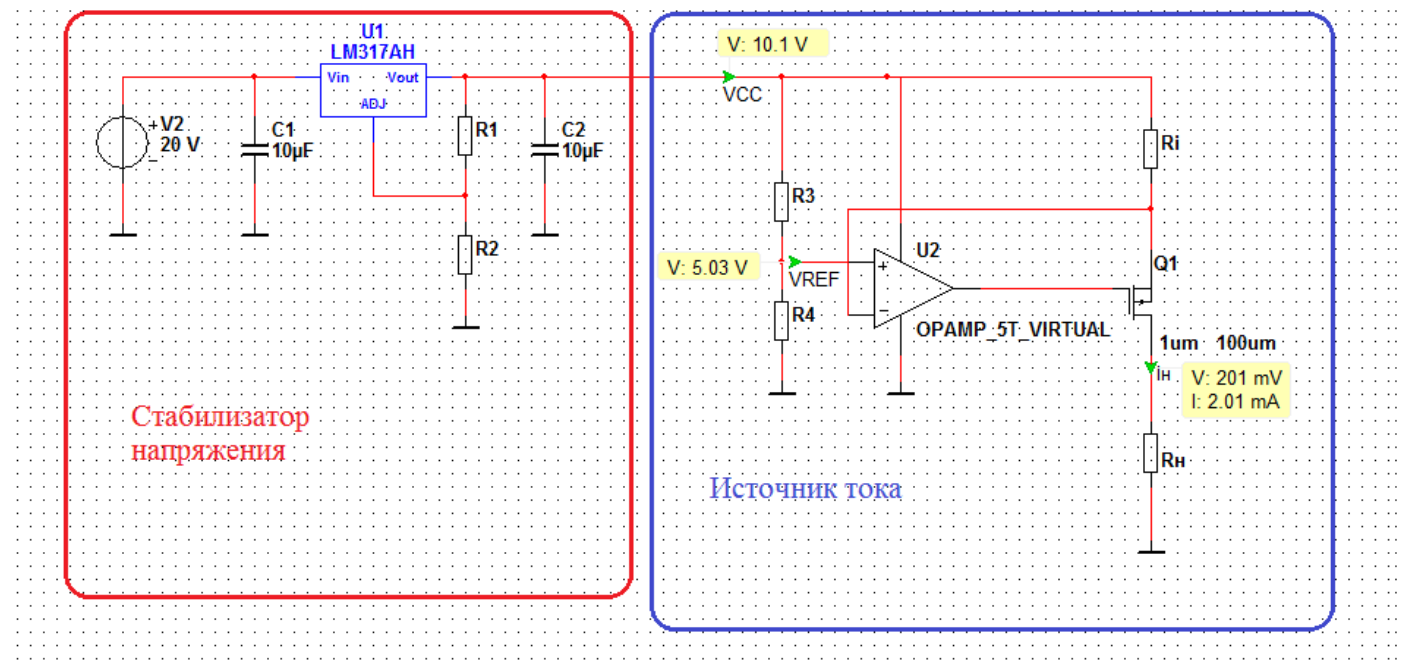


Рис.10 Стабилизатор напряжения с источником тока

Схема источника тока должна обеспечивать выходной ток  $I_n$  при сопротивлении нагрузки  $R_n$ . В данной схеме опорное напряжение  $V_{REF}$  формируется делителем напряжения на резисторах  $R_3$  и  $R_4$ , и оно задает напряжение на истоке транзистора (см. п.4), в этом случае выходной ток определяется как  $I_n = (V_{CC} - V_{REF}) / R_i$ . В схеме можно использовать как биполярный, так и полевой транзистор. Основное требование к транзистору – при падении напряжения на нагрузке  $I_n R_n$ , падение напряжения на нем не должно превышать  $V_{REF} - I_n \cdot R_n$ .

## Измеритель напряжения и усилитель

Четырехпроводная схема измерения задает определенные требования к измерителю. Измеритель должен быть включен по дифференциальной схеме, т.е. выходное напряжение должно быть пропорционально разности входных напряжений. Это требование позволит избавиться от дополнительного падения напряжения на проводах, которые идут до измеряемого сопротивления.

Использование однополярного питания накладывает определенные требования на ОУ: для корректной работы схемы измерителя напряжения необходимо, чтобы

входные и выходные напряжения для всех ОУ, применяемых в измерителе, отступали от значений напряжений на выводах питания на несколько сотен милливольт. Это необходимо для того, чтобы усилитель находился в линейном режиме. Для этого в схеме используется резистор  $R_{op}$ , который поднимает потенциал точки  $V_L$  над «землей» примерно на 0,25В, и источник опорного напряжения  $V_{op}$ , образованные R9, R10 и буферным повторителем U6.

Так же для решения этой проблемы можно использовать более дорогие rail-to-rail ОУ, которые могут работать в линейном режиме практически во всем диапазоне напряжения питания.

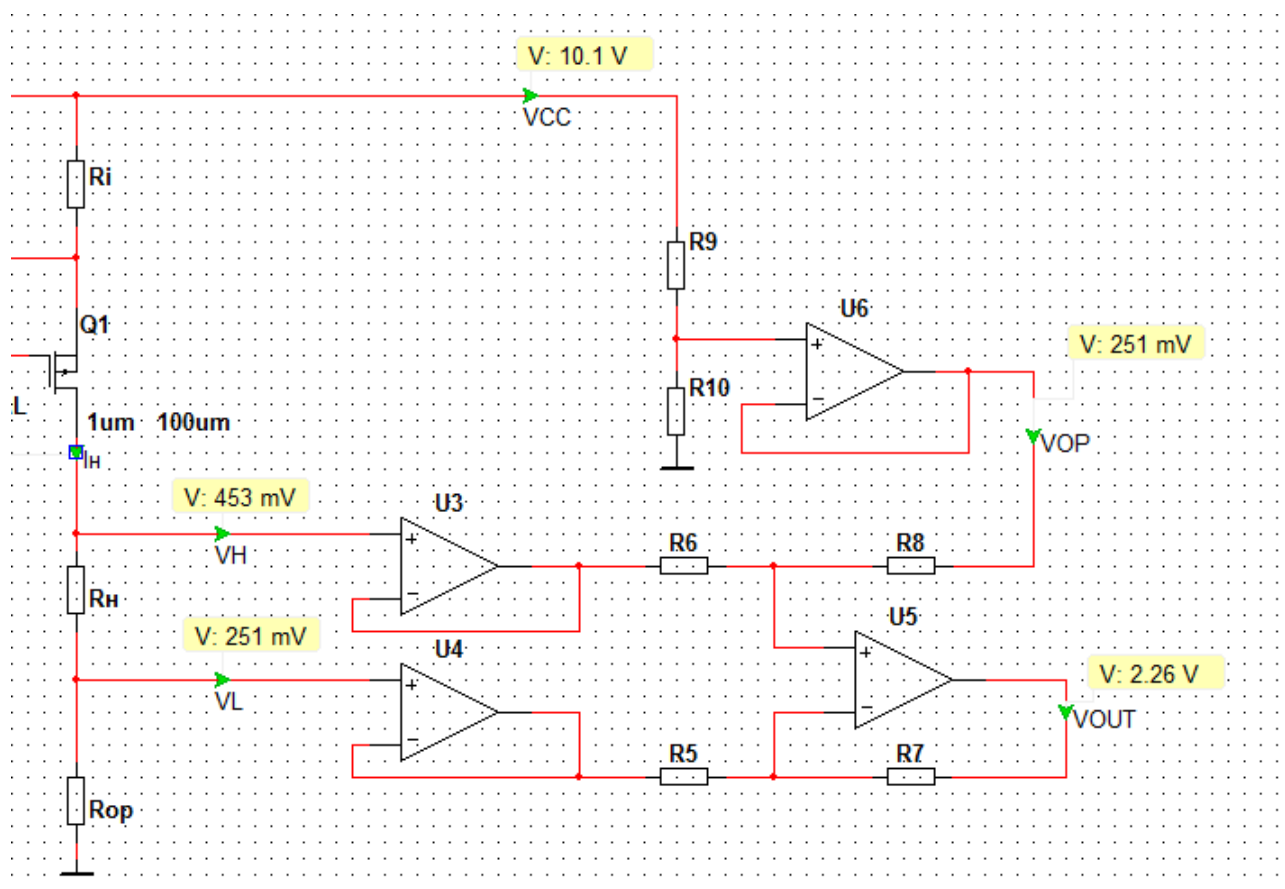


Рис.11 Схема измерителя напряжения

Выходное напряжение измерителя определяется следующим выражением:

$$V_{OUT} = K(V_H - V_L) + V_{OP},$$

где  $K$  является коэффициентом усиления измерителя и определяется сопротивлениями резисторов R5, R6, R7, R8.

## Задание

1. Разработать схему стабилизатора напряжения и источника тока, обеспечивающие напряжение питания и ток нагрузки согласно варианту.
2. Разработать схему измерителя напряжения, обеспечивающего усиление  $K$  и напряжение смещения  $V_{op}$ .
3. Вывести зависимость выходного напряжения  $V_{out}$  от  $R_n$  для своего варианта, проверить ее с помощью моделирования.
4. Ответить на вопросы преподавателя.

Таблица 1. Варианты заданий

| Вариант | $R_n$ , Ом | $I_n$ , мА | Напряжение питания, В | $K$ | $V_{op}$ , В |
|---------|------------|------------|-----------------------|-----|--------------|
| 1       | 90         | 1,2        | 9                     | 5   | 2,3          |
| 2       | 310        | 2,1        | 10                    | 7   | 3,5          |
| 3       | 250        | 1,5        | 11                    | 3   | 2,5          |
| 4       | 170        | 1,8        | 12                    | 6   | 4,0          |
| 5       | 125        | 2,5        | 15                    | 9   | 2,1          |
| 6       | 220        | 1,1        | 8                     | 10  | 3,4          |
| 7       | 340        | 0,9        | 7                     | 11  | 1,9          |
| 8       | 190        | 1,5        | 13                    | 8   | 2,2          |
| 9       | 270        | 0,8        | 14                    | 12  | 3,1          |
| 0       | 180        | 2,3        | 16                    | 13  | 2,8          |