

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО  
Институт компьютерных наук и технологий

*Ю.Н. Дьяченко*

# **Разновидности усилителей с обратными связями**

**Методические указания к лабораторным работам**

**Санкт-Петербург**

**2017**

Методические указания содержат описания лабораторных работ, целью которых является обучение студентов знанию основных характеристик и параметров некоторых разновидностей усилителей с обратными связями и умению их определять в процессе компьютерного моделирования и экспериментального исследования.

## Описание представленных в лабораторных работах схем

Линейные аналоговые вычислительные схемы на основе операционных усилителей (ОУ) с обратной связью используют в различных преобразователях сигналов, особенно в тех случаях, когда допустимая погрешность составляет 0,1% и более. Так же, их можно использовать для решения уравнений и формирования пропорционального управления в схемах регулирования. В работах исследуются схемы, используемые в аналоговых цепях для реализации простых математических операций:

1. Преобразователь тока в напряжение.
2. Инвертирующий и неинвертирующий сумматоры напряжения.
3. Вычитатель напряжения на основе простого дифференциального усилителя.
4. Сумматор-вычитатель напряжения.

### *Преобразователь тока в напряжение (усилитель с токовым входом)*

Схема с токовым входом используется для преобразования постоянного или переменного тока в напряжение. Большинство способов преобразования тока в напряжение основано на законе Ома: ток пропускают через резистор с известным сопротивлением и измеряют падение напряжения на нем. При измерении малых токов требуется резистор с большим номиналом сопротивления что приводит:

- к увеличению помех наводящихся на вход цепи, в которой производится измерение,
- к увеличению погрешности от влияния паразитных емкостей соединительной линии на переменном токе.

Избавиться от этих недостатков позволяет применение усилителя с токовым входом на основе ОУ. Простейший такой усилитель – преобразователь тока в напряжение [3,4], представляет собой модификацию инвертирующего усилителя (рис. 13.1).

Рассмотрим работу схемы усилителя построенного на идеальном ОУ с бесконечно большим коэффициентом усиления  $k \rightarrow \infty$ , нулевыми входными токами и напряжением смещения. На вход подключен источник преобразуемого тока ИТ, с внутренним эквивалентным сопротивлением  $r_i$ .

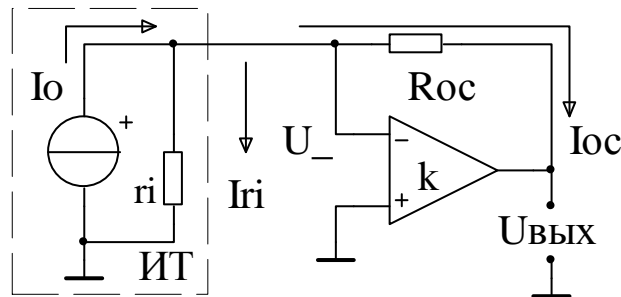


Рис. 13.1 Схема преобразователя ток-напряжение

При наличии отрицательной обратной связи (ООС) за счет резистора  $R_{oc}$ , инвертирующий вход усилителя представляет собой «виртуальный ноль»: напряжение на нем и его сопротивление на узел земли равны нулю:

$$U_- = 0, \quad R_- = 0$$

Следовательно, ток ИТ  $I_0$  не ответвляется в его внутреннее сопротивление  $r_i$  и полностью поступает в сопротивление  $R_{oc}$

$$I_{ri} = 0, \quad I_{oc} = I_0.$$

Выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  идеального преобразователя тока в напряжение:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -I_0 R_{oc}, \quad (13.1)$$

Значение сопротивления обратной связи  $R_{oc}$  представляет собой размерный коэффициент преобразования.

Знак минус в (13.1) обусловлен тем, что схема построена на основе инвертирующего усилителя и при расчете параметров схемы его не учитывают.

В практической схеме преобразователя необходимо учитывать реальные параметры элементов, определяющие его погрешности, которые обычно подразделяют на мультипликативные и аддитивные составляющие.

#### *Основные мультипликативные составляющие погрешности*

Первая составляющая вызвана погрешностью сопротивления обратной

связи  $R_{oc}$ , ее относительное значение:

$$\delta_R = \frac{\Delta R_{oc}}{R_{oc}} \cdot 100\%$$

При выполнении моделирования схемы данная составляющая отсутствует, т.к. номиналы сопротивлений задаются точно.

Вторая составляющая вызвана конечным значением коэффициента усиления ОУ  $k \neq \infty$ , что приводит к отличию от нуля напряжения инвертирующего входа ОУ  $U_- \neq 0$ , которое суммируется с падением напряжения на  $R_{oc}$ .

Третья составляющая возникает из-за конечного значения внутреннего сопротивления ИТ  $r_i \neq \infty$ , при условии, что  $k \neq \infty$  и, следовательно,  $U_- \neq 0$ . В результате, часть тока ИТ  $I_0$  ответвляется в  $r_i$ , т.е.  $I_{r_i} \neq 0$  и ток, протекающий через сопротивление  $R_{oc}$  не равен входному току  $I_{oc} \neq I_0$ .

Выходное напряжение преобразователя с учетом второй и третьей составляющих погрешности:

$$U_{вых} = -I_0 R_{oc} \left( 1 - \frac{1}{k} - \frac{R_{oc}}{kr_i} \right)$$

Относительная погрешность:

$$\delta = -\frac{1}{k} \left( 1 + \frac{R_{oc}}{r_i} \right) \cdot 100\%$$

Знак минус означает, что реальное значение  $U_{вых}$  меньше чем расчетное.

При типовых величинах:

$$k = (10^5 \div 10^7), R_{oc} = (10^3 \div 10^6) \text{ Ом}, r_i = (10^4 \div 10^6) \text{ Ом},$$

численное значение погрешности составит  $\delta = (10^{-2} \div 10^{-5})\%$ .

Исходя из заданной погрешности и параметров схемы, можно рассчитать необходимое значение коэффициента усиления ОУ:

$$k \geq \frac{100\%}{\delta_{max}} \cdot \left( 1 + \frac{R_{oc}}{r_i} \right) \quad (13.2)$$

где  $\delta_{max}[\%]$  – допустимое значение относительной погрешности.

### Основные аддитивные составляющие погрешности

Эти составляющие определяются в основном напряжением смещения и входным током ОУ. Суммарное выходное напряжение смещения преобразователя, равное абсолютному значению аддитивной погрешности, рассчитывается по формуле аналогичной формуле для расчета погрешности инвертирующего и неинвертирующего усилителей [3]

$$U_{\text{ВЫХ см}} = u_{\text{см}} \cdot \left(1 + \frac{R_{\text{ос}}}{r_i}\right) + i_{\text{вх}} \cdot R_{\text{ос}} \quad (13.3)$$

где  $u_{\text{см}}$  и  $i_{\text{вх}}$  - напряжение смещения и входной ток ОУ.

Приведенное значение аддитивной погрешности не должно превышать заданного максимального значения

$$\gamma = \frac{U_{\text{ВЫХ см}}}{U_{\text{ВЫХ max}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ см}}}{I_{0\text{max}} \cdot R_{\text{ос}}} = \gamma_{\text{см}} + \gamma_i \leq \gamma_{\text{max}}, \quad (13.4)$$

где  $U_{\text{ВЫХ max}}$  – максимальное выходное напряжение схемы,

$I_{0\text{max}}$  – максимальное значение тока ИТ,

$\gamma_{\text{см}}$  – составляющая погрешности от  $u_{\text{см}}$ ,

$\gamma_i$  – составляющая погрешности от  $i_{\text{вх}}$ .

Составляющие погрешности, пересчитанные в процентах, равны

$$\gamma_{\text{см}} = \frac{u_{\text{см}}}{U_{\text{ВЫХ max}}} \left(1 + \frac{R_{\text{ос}}}{r_i}\right) \cdot 100\%, \quad (13.5)$$

$$\gamma_i = \frac{i_{\text{вх}} \cdot R_{\text{ос}}}{U_{\text{ВЫХ max}}} \cdot 100\% = \frac{i_{\text{вх}}}{I_{0\text{max}}} \cdot 100\%. \quad (13.6)$$

Анализ формул (13.4 – 13.6) позволяет заключить, что уменьшение предела измеряемого тока  $I_{0\text{max}}$  приводит к росту погрешности. Составляющая  $\gamma_i$  возрастает т.к.  $i_{\text{вх}}$  ОУ непосредственно суммируется с  $I_0$ . Следовательно, при измерении и преобразовании малых токов необходимо использовать ОУ с низким  $i_{\text{вх}}$ , например, с полевыми транзисторами на входе.

Рост  $\gamma_{\text{см}}$  обусловлен тем, что при уменьшении  $I_{0\text{max}}$  пропорционально уменьшается  $U_{\text{ВЫХ max}}$ . В случае, если задано фиксированное значение  $U_{\text{ВЫХ max}}$  при уменьшении  $I_{0\text{max}}$  необходимо увеличивать сопротивление  $R_{\text{ос}}$ .

Чувствительность преобразователя будет расти пропорционально  $R_{oc}$ , но одновременно возрастает и аддитивная погрешность за счет дополнительного усиления  $u_{см}$ .

### ***Инвертирующий сумматор напряжений***

Инвертирующий сумматор [1,2,4] построен на основе инвертирующего усилителя, в котором за счет дополнительных входов, можно реализовать суммирование нескольких напряжений с разными коэффициентами.

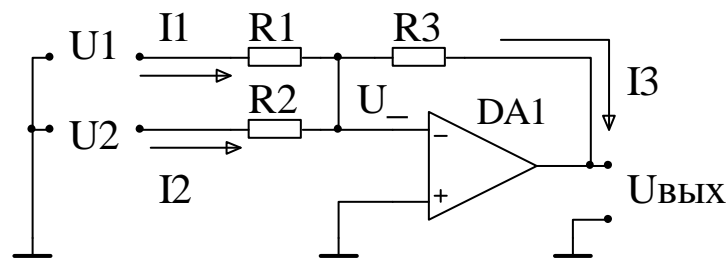


Рис. 13.2 Схема двухвходового инвертирующего сумматора

В двухвходовом сумматоре (рис. 13.2) напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  преобразуются в токи  $I_1$ ,  $I_2$  протекающие через сопротивления  $R1$ ,  $R2$ . Эти токи суммируются на инвертирующем входе ОУ, образуя ток  $I_3$  через сопротивление обратной связи  $R3$ :

$$I_3 = I_1 + I_2$$

Инвертирующий вход ОУ представляет собой «виртуальную землю» с напряжением  $U_- = 0$ , следовательно, токи  $I_1$ ,  $I_2$  определяются по формулам:

$$I_1 = \frac{U_1}{R1}, \quad I_2 = \frac{U_2}{R2},$$

а выходное напряжение сумматора равно инверсии падения напряжения на сопротивлении  $R3$ :

$$U_{\text{вых}} = -I_3 R3 = -U_1 \frac{R3}{R1} - U_2 \frac{R3}{R2} = -(K_1 U_1 + K_2 U_2) \quad (13.7)$$

Из формулы (13.7) видно, что в  $U_{\text{вых}}$  напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  входят с коэффициентами усиления или коэффициентами суммирования  $K_1$  и  $K_2$ , которые могут быть установлены независимо друг от друга и иметь значения

как больше, так и меньше единицы. Аналогичным образом строится схема сумматора с большим количеством входных напряжений и индивидуальными коэффициентами усиления по всем входам.

### ***Неинвертирующий сумматор напряжений***

Неинвертирующий сумматор [2] с двумя входами (рис. 13.3), представляет собой соединенные последовательно двухвходовой резистивный делитель, осуществляющий суммирование входных напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  и неинвертирующий усилитель на ОУ DA1.

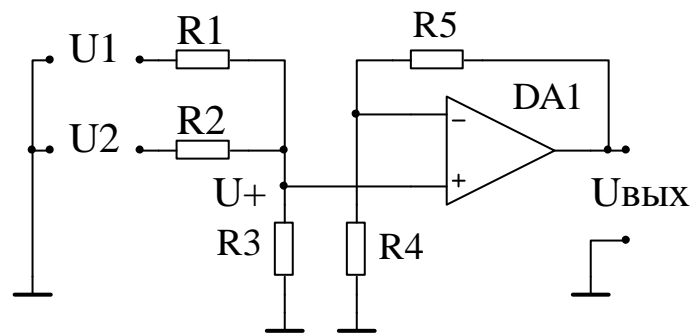


Рис. 13.3. Схема неинвертирующего сумматора

Выходное напряжение данной схемы рассчитывают по формуле

$$U_{\text{вых}} = (K_1 \cdot U_1 + K_2 \cdot U_2)K_{\text{ус}} = U_+ K_{\text{ус}} \quad (13.8)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты передачи резистивного делителя,  $K_{\text{ус}}$  – коэффициент усиления неинвертирующего усилителя.

Значения коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  равны

$$\begin{cases} K_1 = \frac{R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \\ K_2 = \frac{R_1 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \end{cases}$$

При условии, что  $R_3 = 10\text{кОм}$ , решение этой системы уравнений имеет вид

$$\begin{cases} R_1 = 10 \left( \frac{1}{K_1} - \frac{K_2}{K_1} - 1 \right) \\ R_2 = 10 \left( \frac{1}{K_2} - \frac{K_1}{K_2} - 1 \right) \end{cases}, \quad (13.9)$$

где значения  $R_1$  и  $R_2$  определяются в килоомах.



$$K_{yc} = 1 + \frac{R_5}{R_4}. \quad (13.10)$$

### *Дифференциальный усилитель (схема вычитания напряжений)*

Выходное напряжение дифференциального усилителя (ДУ) пропорционально разности двух входных напряжений, следовательно, он выполняет функцию вычитания:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K(U_2 - U_1) \quad (13.11)$$

где  $K$  – коэффициент усиления ДУ.

Схема простейшего ДУ [1,2,3,4] изображена на рис. 13.4.

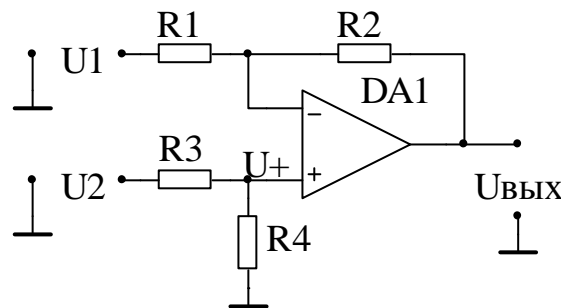


Рис. 13.4 Схема простейшего ДУ.

В общем виде выходное напряжение двухвходового усилителя определяется формулой:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_1 U_1 + K_2 U_2$$

где  $K_1$  и  $K_2$  - коэффициенты усиления по входам.

Для расчета схемы ДУ можно применить принцип суперпозиции. Считаем, что  $U_2 = 0$  (вход заземлен), тогда для  $U_1 \neq 0$  схема работает как инвертирующий усилитель, следовательно

$$U_{\text{ВЫХ1}} = -U_1 \frac{R_2}{R_1} \quad (13.12)$$

При  $U_1 = 0$  (вход заземлен),  $U_2 \neq 0$  схема работает как неинвертирующий усилитель с делителем напряжения на входе. Соответственно получаем на неинвертирующем входе и выходе

$$U_+ = U_2 \frac{R_4}{R_3 + R_4}, \quad U_{\text{ВЫХ2}} = U_+ \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = U_2 \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{1 + R_2/R_1}{1 + R_4/R_3}.$$

Результирующее выходное напряжение

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ1}} + U_{\text{ВЫХ2}} = -U_1 \frac{R_2}{R_1} + U_2 \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{1 + R_2/R_1}{1 + R_4/R_3} \quad (13.13)$$

В соответствии с (13.11) ДУ должен иметь коэффициенты усиления по входам, имеющие одинаковое абсолютное значение и противоположный знак, что выполняется при определенном соотношении номиналов резисторов

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \quad (13.14)$$

В практических схемах удобно взять

$$R_3 = R_1, \quad R_4 = R_2$$

Тогда окончательная формула для  $U_{\text{ВЫХ}}$

$$U_{\text{ВЫХ}} = (U_2 - U_1) \frac{R_2}{R_1} = (U_2 - U_1)K \quad (13.15)$$

Точность реализации операции вычитания зависит от точности выполнения условия (13.14), определяющего соотношение сопротивлений резисторов.

### Сумматор-вычитатель напряжений

Схему устройства [1,2,3] можно представить как комбинацию инвертирующего и неинвертирующего сумматоров. На его выходе формируется напряжение в виде линейной комбинации нескольких входных напряжений.

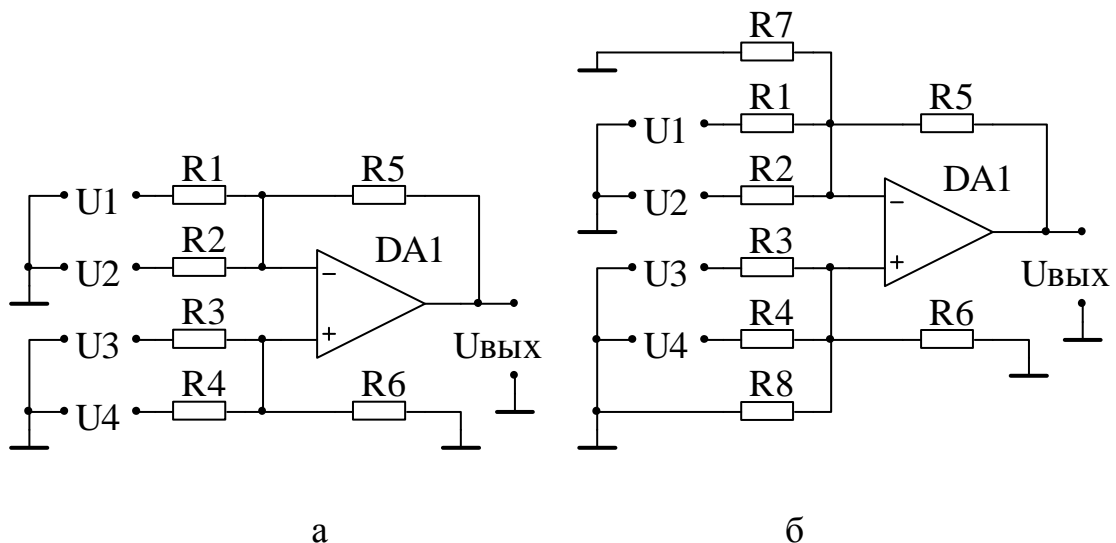


Рис. 13.5. Схемы сумматоров-вычитателей с четырьмя входами.

Рассмотрим варианты схем (рис. 13.5) с двумя суммирующими  $U_3$ ,  $U_4$  и с двумя вычитающими  $U_1$ ,  $U_2$  входами. Результаты анализа справедливы и для схем с большим количеством входов. Выражение для выходного напряжения схем:

$$U_{\text{вых}} = U_3 K_3 + U_4 K_4 - U_1 K_1 - U_2 K_2 \quad (13.16)$$

где  $K_n$  – коэффициенты усиления по соответствующим входам.

Коэффициенты усиления в (13.16) рассчитывают по формулам

$$K_1 = \frac{R5}{R1}, \quad K_2 = \frac{R5}{R2}, \quad K_3 = \frac{R6}{R3}, \quad K_4 = \frac{R6}{R4}. \quad (13.17)$$

Однако, формулы (13.17) справедливы для схемы рис. 13.5а только в частном случае при выполнении условия *сбалансированности* ее коэффициентов: сумма коэффициентов усиления на инвертирующем входе равна сумме коэффициентов усиления на неинвертирующем входе

$$\frac{R5}{R1} + \frac{R5}{R2} = \frac{R6}{R3} + \frac{R6}{R4} \quad (13.18)$$

Из формулы (13.18) следует, что на выбор коэффициентов суммирования и вычитания наложены ограничения, которые не позволяют выбирать любые значения и комбинации этих коэффициентов.

Ограничения могут быть устранены в *универсальной* схеме (рис. 13.5б) [2, 3], в которой всегда может быть обеспечен баланс коэффициентов усиления как в формуле (13.18). Для этого к той половине усилителя, суммарный коэффициент усиления которой меньше, добавляют дополнительный «фиктивный» вход, на который подается нулевое напряжение, т.е. подключается земля.

Так, если  $K_{\Sigma} = K_3 + K_4 - K_1 - K_2 > 0$ , то  $R8$  не устанавливают, а между инвертирующим входом ОУ и землей добавляют резистор с сопротивлением

$$R7 = \frac{R5}{K_{\Sigma}} \quad (13.19)$$

Если  $K_{\Sigma} < 0$ , то  $R7$  не устанавливают, а между неинвертирующим входом ОУ и землей добавляют резистор с сопротивлением

$$R8 = \frac{R6}{|K_{\Sigma}|} \quad (13.20)$$

## Работа 13.1

### Исследование преобразователя тока в напряжение и сумматоров-вычитателей в программе Multisim

**Цель работы** – знание принципов функционирования усилителей с обратными связями, предназначенных для выполнения простых арифметических операций, умение их рассчитывать и определять их параметры с использованием программы компьютерного моделирования Multisim.

#### Программа работы

1. Исследование схемы преобразователя ток-напряжение.

1.1. Расчет схемы преобразователя ток-напряжение:

расчет сопротивления обратной связи  $R_{oc}$ ;

расчет требуемого коэффициента усиления ОУ;

расчет допустимых значений входного тока и напряжения смещения ОУ;

1.2. Моделирование схемы преобразователя ток-напряжение:

задание параметров модели ОУ;

снятие передаточной характеристики преобразователя;

снятие передаточной характеристики преобразователя при измененных параметрах ОУ;

1.3. Оценка результатов моделирования работы преобразователя.

2. Исследование схем сбалансированного и универсального сумматора-вычитателя.

2.1. Расчет значений сопротивлений и выходных напряжений схем;

2.2. Определение в процессе моделирования коэффициентов усиления схем по отдельным входам.

2.3. Измерение в процессе моделирования выходных напряжений схем.

2.4. Оценка результатов моделирования работы схем.

## Методические указания по проведению расчетов и моделированию работы схем

### 1. Исследование схемы преобразователя тока в напряжение

#### *1.1. Расчёт основных параметров и погрешностей преобразователя*

Варианты заданий по моделированию преобразователя ток-напряжение приведены в табл. 13.1 Приложения, где использованы следующие обозначения:

- $I_{0max}$  – максимальное значение тока источника тока,
- $U_{вых max}$  – максимальное выходное напряжение схемы при  $I_{0max}$ ,
- $r_i$  – выходное сопротивление источника тока,
- $\gamma_{max}$  – допустимое значение приведенной аддитивной погрешности,
- $\delta_{max}$  – допустимое значение относительной мультипликативной погрешности.

Номинал сопротивления обратной связи  $R_{oc}$  рассчитывают, используя формулу (13.1), исходя из максимальных значений выходного напряжения  $U_{вых max}$  и входного тока  $I_{0max}$ . Значение  $R_{oc}$  следует брать точное, округление с погрешностью не более 100 Ом.

Требуемый коэффициент усиления ОУ  $k$  рассчитывают по формуле (13.2), исходя из заданной погрешности  $\delta_{max}$ .

Для расчета предельных значений входного тока  $i_{вх}$  и напряжения смещения  $u_{см}$  ОУ используют формулы (13.5) и (13.6). При этом считают, что составляющие аддитивной погрешности имеют одинаковое допустимое значение:

$$\gamma_{см} = \gamma_i = 0,5 \gamma_{max}$$

#### *1.2. Моделирование работы схемы преобразователя тока в напряжение*

На рис.13.6 изображена схема преобразователя, где в качестве операционного усилителя использован виртуальный ОУ с выводами питания

(OPAMP\_5T\_VIRTUAL), к которым подключают источники с напряжением  $\pm(14\div 15)$ В. Источник тока изображен с внутренним сопротивлением  $r_i$ , номинал сопротивления  $R_{oc}$  устанавливают в соответствии с расчетом.

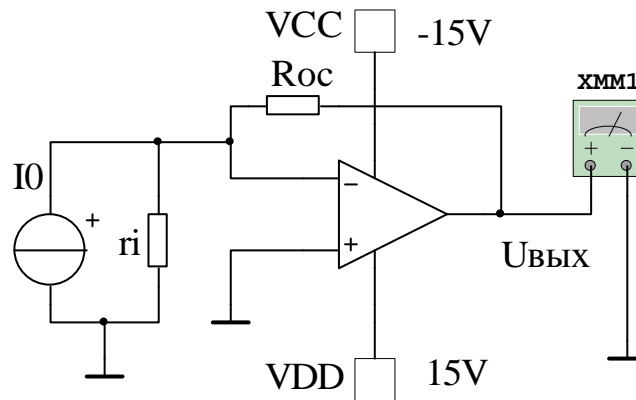


Рис.13.6. Схема преобразователя ток-напряжение

В разделе Properties для виртуального ОУ (рис. 13.7) устанавливают расчетные значения аддитивных параметров –  $u_{см}$  (VOS),  $i_{вх}$  (IBS) и нулевое значение тока смещения  $i_{см}$  (IOS). При установке значения  $k$  (Differential Mode Voltage Gain) следует учитывать, что в таблице для коэффициента предусмотрены разные масштабные множители –  $V/V$ ,  $kV/V$ ,  $MV/V$ .

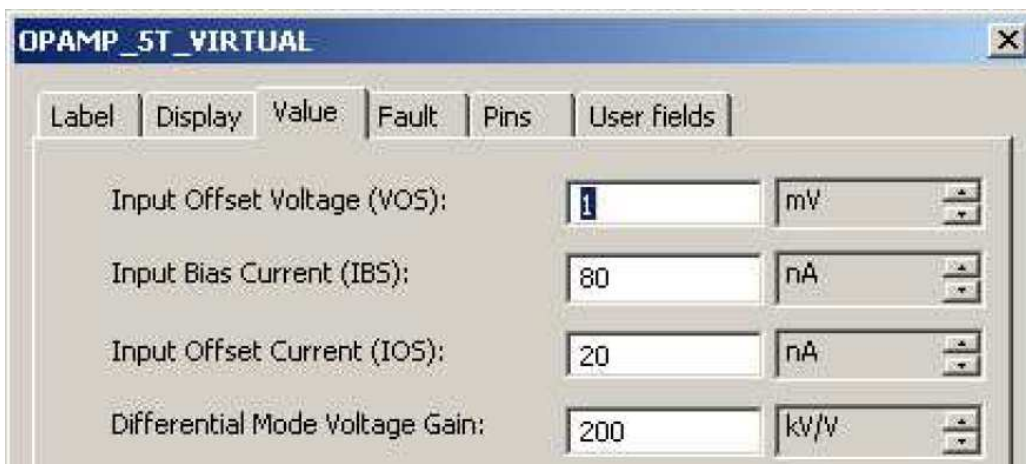


Рис 13.7. Меню настраиваемых параметров операционного усилителя

*Снятие передаточной характеристики преобразователя с расчетными параметрами ОУ*

Передаточную характеристику в виде зависимости  $U_{вых} = f(I_0)$  снимают в режиме *Simulate/Analyses/DCsweep*. В параметрах анализа указывают

пределы изменения тока источника от  $-I_{0max}$  до  $I_{0max}$  с приращением не более  $0,1I_{0max}$ . График передаточной характеристики приводят в отчете. Необходимо определить  $U_{\text{ВЫХ}0}$ ,  $U_{\text{ВЫХ}max-}$  и  $U_{\text{ВЫХ}max+}$  при значениях тока  $I_0$  равных соответственно 0,  $-I_{0max}$  и  $I_{0max}$ . Измерения можно провести по графику используя маркеры, но удобнее использовать мультиметр. Погрешности полученной характеристики схемы, рассчитывают по формулам:  
 приведенное значение аддитивной погрешности

$$\gamma' = \frac{U_{\text{ВЫХ}0}}{U_{\text{ВЫХ}max}} \cdot 100\%, \quad (13.21)$$

относительное значение мультипликативной погрешности

$$\delta' = \left( \frac{|U_{\text{ВЫХ}max+}| + |U_{\text{ВЫХ}max-}|}{2U_{\text{ВЫХ}max}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (13.22)$$

### *Снятие передаточных характеристик преобразователя с измененными параметрами ОУ*

Моделирование проводят для определения влияния параметров ОУ –  $k$ ,  $i_{\text{ВХ}}$ ,  $u_{\text{СМ}}$  на погрешности преобразователя  $\delta$  и  $\gamma$ . В ходе моделирования каждый раз изменяют один из параметров, другие оставляют равными расчетным значениям. При этом  $k$  уменьшают, а  $i_{\text{ВХ}}$  и  $u_{\text{СМ}}$  увеличивают в 10 раз относительно расчетных значений. По полученным графикам передаточных характеристик или показаниям мультиметра, используя формулы (13.21) и (13.22), определяют аддитивную и мультипликативную погрешности преобразователя.

### ***1.3. Оценка результатов моделирования работы преобразователя***

Оценивают соответствие значений заданных и полученных составляющих погрешностей преобразования при расчетных значениях параметров ОУ. Также оценивают влияние изменения параметров ОУ на различные составляющие погрешности. Выводы по оценкам приводят в отчете по работе.

## 2. Исследование схемы сумматора-вычитателя

### 2.1 Расчет схем сумматора-вычитателя

Исходные данные для расчета схем приведены в табл. 13.2 и 13.3 Приложения. По формулам (13.16) и (13.17) определяют выходные напряжения  $U_{\text{вых } i}$  при различных комбинациях входных напряжений  $U_i$  и номиналы сопротивлений на входах и в обратной связи схемы (рекомендуется задать  $R_6 = R_5$ ). Для универсальной схемы по формулам (13.19) и 13.20 дополнительно рассчитывают сопротивление  $R_7$  или  $R_8$ .

### 2.2 Моделирование работы схем сумматора-вычитателя

Схему (рис. 13.7) собирают на основе виртуального ОУ с выводами питания. В схеме имеющей сбалансированные коэффициенты усиления резисторы  $R_7$  и  $R_8$  отсутствуют, в универсальной схеме добавляют резистор  $R_7$  или  $R_8$ . В ОУ устанавливают такие значения параметров, которые обеспечивают незначительную погрешность преобразования:

$$u_{\text{см}} = 0, i_{\text{вх}} = 0, i_{\text{см}} = 0, k = 10^6.$$

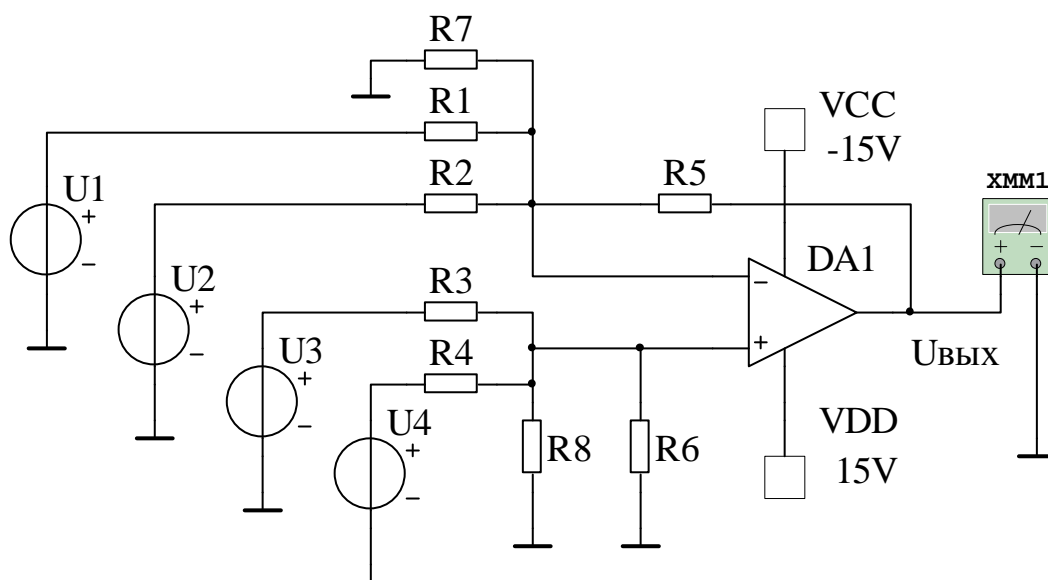


Рис. 13.7 Схема сумматора-вычитателя

В ходе определения коэффициентов усиления схем по отдельным входам, на один из них подают напряжение  $U_n$ , а на остальных устанавливают напряжения



равные нулю, причем значение  $U_n$  выбирают таким, чтобы устройство по выходу *не входило в режим насыщения*. По результатам моделирования рассчитывают  $K_n$ .

При дальнейшем моделировании на вход схемы подают заданные комбинации входных напряжений  $U_{ni}$  и измеряют соответствующие выходные напряжения  $U_{изм i}$ .

### 2.3. Оценка результатов моделирования

Проводят сравнение результатов моделирования – выходных напряжений  $U_{изм i}$  с данными теоретического расчета –  $U_{вых i}$  и делают заключение о правильной работе сумматоров-вычитателей. Количественную оценку результатов дают на основе их погрешностей. Абсолютную погрешность рассчитывают по формуле

$$\Delta U_i = |U_{вых i} - U_{изм i}|,$$

а относительную погрешность – по формуле

$$\delta_i = \frac{\Delta U_i}{U_{вых i}} \cdot 100\%.$$

Относительная погрешность увеличивается при низких значениях  $U_{вых i}$  за счет аддитивной составляющей. Окончательные результаты представляют в виде табл. 13.5. Приложения.

## **Работа 13.2**

### **Экспериментальное исследование инвертирующего и неинвертирующего сумматоров и схемы вычитания напряжений**

**Цель работы** – знание принципов функционирования усилителей с обратными связями, предназначенных для выполнения простых арифметических операций, умение их рассчитывать и определять их параметры.

#### **Программа работы**

1. Расчет схем исследуемых устройств.
2. Экспериментальное определение коэффициентов усиления схем по отдельным входам.
3. Экспериментальное определение выходных напряжений схем.
4. Оценка результатов работы схем исследуемых устройств.

## Методические указания по проведению лабораторной работы

### 1. Расчет схем

В табл. 13.4 Приложения для схем исследуемых устройств приведены значения коэффициентов и сопротивлений резисторов, необходимые для расчета, а также, входные напряжения  $U_{1i}, U_{2i}$  для разных вариантов заданий.

В ходе расчета схем, необходимо определить недостающие номиналы сопротивлений и значения выходных напряжений при разных комбинациях входных напряжений. Используют формулы (13.7) – для инвертирующего сумматора; (13.8), (13.9) и (13.10) – для неинвертирующего сумматора ( $R3 = 10\text{кОм}$ ,  $R5 > 5\text{кОм}$ ); (13.14) и (13.15) – для вычитателя ( $R1 \geq 1\text{кОм}$ ).

Для построения схем окончательно выбирают сопротивления с номиналами, имеющимися на стенде и наиболее близкими к расчетным значениям.

Расчитанные напряжения используют для предварительной оценки достоверности результатов эксперимента.

### 2. Экспериментальное исследование работы схем

Схемы исследуемых устройств изображены на рис. 13.8 – 13.10. Собственно сумматоры и вычитатель собраны на ОУ DA1. Для минимизации аддитивных погрешностей следует использовать ОУ с низкими значениями напряжения смещения  $u_{см}$  и входных токов  $i_{вх}$ , например типа 140УД17 или 140УД25. Для питания усилителей к лабораторному стенду подключают источники постоянного положительного и отрицательного напряжения  $\pm U_{п}$ , которые устанавливают равными  $\pm(14\div 15)\text{В}$ . Напряжение источников питания используют также для формирования входных напряжений устройств  $U_{ni}$  с помощью переменных резисторов  $R_{п1}$  и  $R_{п2}$ . ОУ DA2 и DA3 могут быть любого типа, т.к. выполняют вспомогательную роль буферных повторителей напряжения, обеспечивающих исключение влияния переменных сопротивлений  $R_{п1}$  и  $R_{п2}$  на коэффициенты усиления сумматоров и вычитателя.

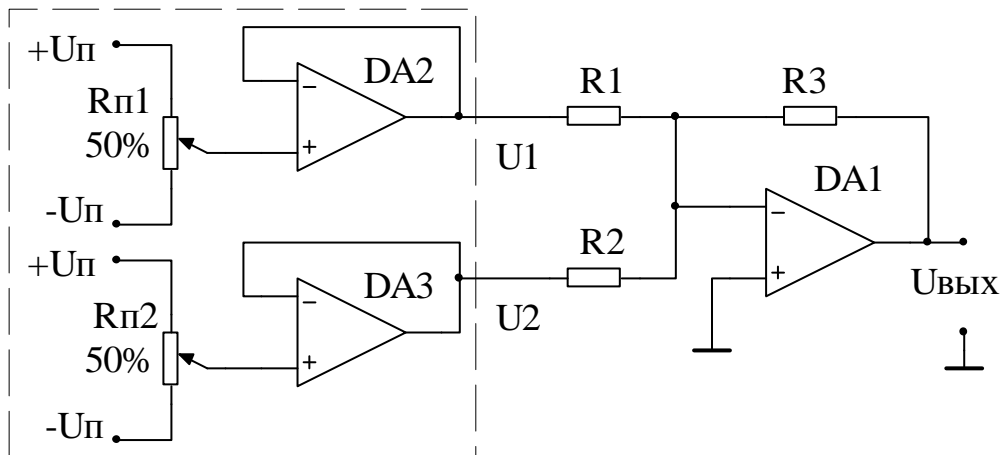


Рис. 13.8 Схема инвертирующего сумматора напряжений.

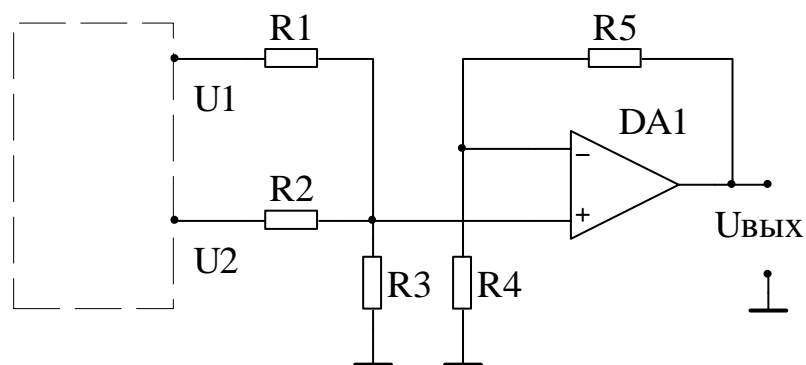


Рис 13.9 Схема неинвертирующего сумматора напряжений.

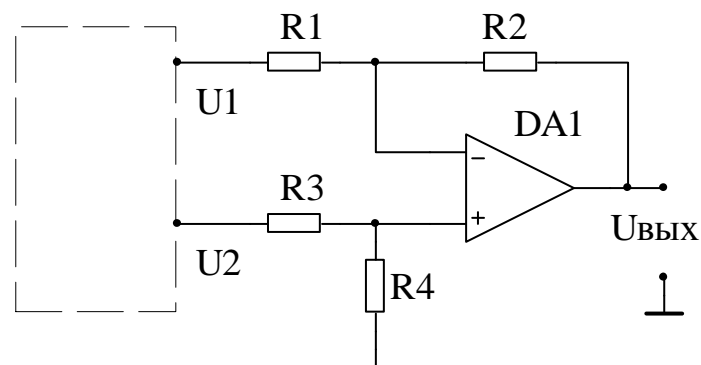


Рис. 13.10 Схема вычитателя напряжений.

Для определения коэффициентов усиления схем по отдельным входам, на один из них подают напряжение  $U_n$ , а второй вход отключают от формирователя входных напряжений (ОУ DA2 и DA3) и соединяют его с узлом земли, причем значение  $U_n$  выбирают таким, чтобы устройство по выходу *не входило в режим насыщения*. По результатам эксперимента рассчитывают  $K_n$ .

Далее на входы устройств подают указанные в табл. 13.4 Приложения

комбинации входных напряжений. Однако переменными резисторами  $R_{п1}$  и  $R_{п2}$  установить точные значения указанных напряжений практически не возможно, поэтому следует задавать напряжения по возможности близкие к приведенным в таблицах. Далее последовательно измеряют полученные  $U_{1i}$ ,  $U_{2i}$  и  $U_{вых i}$  вольтметром с точность не менее чем три значащие цифры.

### 3. Оценка полученных результатов

Оценка результатов заключается в сравнении экспериментально полученных и расчетных значений выходных напряжений схем. Данные эксперимента и расчеты заносят в таблицу 13.5 Приложения, где  $U_{1i}$ ,  $U_{2i}$ ,  $U_{изм i}$  – *измеренные значения* входных и выходного напряжений;  $U_{вых i}$  – значение выходного напряжения, рассчитанное с использованием *измеренных напряжений*  $U_{1i}$ ,  $U_{2i}$  и *реально выбранных номиналов сопротивлений*.

Абсолютную и относительную погрешности рассчитывают по формулам

$$\Delta U_i = U_{изм i} - U_{вых i}, \quad \delta_i = \frac{\Delta U_i}{U_{вых i}} \cdot 100\%$$

В случае правильного выбора входных напряжений, расчета номиналов сопротивлений и проведения измерений, относительная погрешность не должна выходить за пределы  $\pm 5\%$ . При большем значении  $\delta_i$  в отчете следует объяснить причину возникновения завышенной погрешности.

### Литература

1. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Т.1, Т.2: Пер. с нем. М.: ДМК Пресс, 2008. 809 с.
2. Мамий А.Р., Тлячев В.Б. Операционные усилители. Майкоп: АГУ, 2005. 192 с.
3. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. 2-е изд., перераб. и доп. Энергоатомиздат, 1988. 304 с.
4. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005, 528 с.

## Приложение. Варианты заданий для лабораторных работ

Таблица 13.1. Преобразователь ток-напряжение.

№	$I_{0max}$	$U_{\text{ВЫХ } max}$	$r_i$	$\gamma_{max}$	$\delta_{max}$
варианта	мкА	В	кОм	%	%
1	5	10	50	0,1	0,02
2	2,5	7,5	20	0,3	0,05
3	1,6	8	30	0,5	0,03
4	0,9	9	110	0,25	0,06
5	1,2	6	80	0,1	0,025
6	1,7	4	55	0,05	0,04
7	2	5	40	0,15	0,02
8	1,1	7	100	0,2	0,01
9	1,5	5,5	70	0,5	0,05
10	2	8,5	60	0,3	0,025
11	0,8	4	35	0,25	0,03
12	1,6	6	45	0,15	0,04
13	0,7	5	90	0,1	0,02
14	2,2	10	65	0,2	0,01
15	1,4	8	55	0,3	0,025
16	0,5	3	120	0,06	0,008

Таблица 13.2. Сбалансированный сумматор-вычитатель.

	№	U1	U2	U3	U4	K1	K2	K3	K4	R1,кОм
	<b>1</b>	-1,8	2	-0,05	0,5	5	15	16	4	5
		0,4	-0,2	0,07	1,5					
		0,2	-0,25	0,17	-3					
		0,6	0,08	0,25	0,4					
	<b>2</b>	5,5	1	0,3	2	2,5	7	5	4,5	10
		2	0,5	1,2	-0,8					
		-0,8	0,2	0,8	3					
		-1	0,08	0,7	-0,4					
	<b>3</b>	-0,9	-0,45	-0,5	-0,25	11	23	16	18	20
		0,3	0,4	0,15	0,2					
		-0,2	0,25	-0,1	0,5					
		0,8	1	0,35	0,4					
	<b>4</b>	-1	2	2,2	0,2	9	4	3	10	15
		-0,8	-2,5	-1,5	-2					
		1,1	-0,4	0,5	3					
		0,3	0,7	-0,25	0,3					
	<b>5</b>	0,4	2	5	0,3	6	4	1	9	3
		-0,4	-0,2	2	-0,1					
		1	-3	8	-0,5					
		-0,3	0,8	10	-3					
	<b>6</b>	0,5	1,8	0,9	-0,7	14	2	9	7	12
		-0,6	-3	-1,2	0,4					
		-0,6	-2	0,8	0,5					
		0,15	6	0,3	1,4					
	<b>7</b>	0,4	2,2	1,1	0,2	5,5	10	12	3,5	8
		1,2	-0,4	0,25	0,7					
		-1,4	0,3	1,3	0,45					
		2	-2,7	-2,2	1,8					
	<b>8</b>	0,2	2,5	0,7	2	7,5	5	11	1,5	4
		-3,5	1,5	-1,8	4					
		0,4	-0,6	0,5	3					
		1,8	2,1	0,6	-1,5					

Таблица 13.2. Продолжение.

	№	U1	U2	U3	U4	K1	K2	K3	K4	R1(κ)
	<b>9</b>	0,5	1	-0,15	0,2	3	17	15	5	18
		0,4	-0,2	0,07	0,045	3	17	15	5	18
		0,2	-0,25	0,17	-3	3	17	15	5	18
		3,5	-0,8	0,25	0,4	3	17	15	5	18
	<b>10</b>	0,8	1	0,3	1,5	3,5	6	7	2,5	6
		2	0,7	0,6	-0,4	3,5	6	7	2,5	6
		-0,4	0,25	1,7	3	3,5	6	7	2,5	6
		-0,6	0,08	0,55	-0,4	3,5	6	7	2,5	6
	<b>11</b>	-0,1	-0,45	-0,5	-0,6	10	21	13	18	16
		0,3	-0,12	0,15	0,2	10	21	13	18	16
		-0,2	0,25	-0,17	0,8	10	21	13	18	16
		0,9	1	0,35	0,4	10	21	13	18	16
	<b>12</b>	-1	2	2,2	0,2	8	5	2	11	7
		-0,8	-2,5	-1,5	-2	8	5	2	11	7
		1,6	-0,4	0,5	2,5	8	5	2	11	7
		0,3	0,7	-0,25	0,3	8	5	2	11	7
	<b>13</b>	0,2	9	4	1,5	7	3	4	6	14
		-0,4	-0,8	2	-0,6	7	3	4	6	14
		5,5	3,5	8	-0,5	7	3	4	6	14
		-0,2	-0,4	5	-3	7	3	4	6	14
	<b>14</b>	1,5	1	0,9	0,7	12	1	9	4	9
		-0,3	-3	-1,2	0,4	12	1	9	4	9
		-0,5	-2	0,8	0,5	12	1	9	4	9
		-0,15	6	0,3	1,4	12	1	9	4	9
	<b>15</b>	0,8	1,5	1,1	0,2	4,5	13	15	2,5	13
		1,2	-0,4	0,25	0,7	4,5	13	15	2,5	13
		-1,4	0,3	1	0,4	4,5	13	15	2,5	13
		2	-2,7	-2,2	1,8	4,5	13	15	2,5	13
	<b>16</b>	0,4	1	1,5	2	5,5	7	11	1,5	11
		-1	1,5	-0,8	4	5,5	7	11	1,5	11
		0,3	-0,8	-0,5	3	5,5	7	11	1,5	11
		2	2,7	0,9	0,7	5,5	7	11	1,5	11



Таблица 13.3. Универсальный сумматор-вычитатель.

№	U1	U2	U3	U4	K1	K2	K3	K4	R1,кОм
<b>1</b>	1,7	1,8	0,3	0,2	5	12	16	4	5
	0,4	-0,2	0,5	0,05					
	-0,3	0,25	-0,17	3					
	-0,6	-0,08	-0,25	-2					
<b>2</b>	0,4	2	0,3	2	2,5	7	5	1,5	10
	2	0,7	0,6	-0,4					
	-0,2	-0,25	0,18	3					
	-0,6	0,08	3,5	1,5					
<b>3</b>	0,1	0,45	0,5	0,28	10	16	13	18	20
	0,3	-0,4	-0,15	0,43					
	-0,2	0,25	-0,6	0,3					
	1,8	0,8	0,35	0,4					
<b>4</b>	-1	2	2,2	0,2	9	4	3	8	15
	0,8	1,5	4	-0,45					
	1,6	-0,4	0,5	0,15					
	-1,8	0,7	-0,25	0,8					
<b>5</b>	1,4	2	5	0,3	5	4	1	9	3
	0,85	-0,1	2	-1,9					
	-1	0,7	-8	1,5					
	0,5	-0,9	10	-0,2					
<b>6</b>	0,5	1	0,9	-0,7	14	2	6	7	12
	0,3	-3	1,2	-0,4					
	-0,4	-2	1,1	0,6					
	0,15	6	0,3	1,4					
<b>7</b>	2,5	3	1,1	0,5	2,5	9	8	6,5	8
	1,2	-0,6	0,25	0,75					
	-1,8	0,2	-1,3	-0,45					
	0,6	0,7	-0,1	1,8					
<b>8</b>	0,2	3	0,7	2	7,5	5	9	1,5	4
	-1	1,5	-0,8	4					
	0,4	-0,4	1,6	6					
	1,2	0,3	0,9	8					

Таблица 13.3. Продолжение.

№	U1	U2	U3	U4	K1	K2	K3	K4	R1(κ)
<b>9</b>	2	1,2	0,3	0,2	6	10	15	3	18
	0,4	-0,2	0,7	0,05	6	10	15	3	18
	-0,3	0,25	-0,17	3	6	10	15	3	18
	-0,6	-0,08	-0,5	-0,4	6	10	15	3	18
<b>10</b>	0,4	1	0,3	2	3,5	8	7	1,5	6
	2	0,7	0,6	-0,4	3,5	8	7	1,5	6
	-0,2	-0,25	0,17	3	3,5	8	7	1,5	6
	-0,6	0,08	3,5	0,4	3,5	8	7	1,5	6
<b>11</b>	0,1	-0,25	0,35	0,28	9	14	11	16	16
	0,3	-0,4	-0,15	0,22	9	14	11	16	16
	-0,2	0,25	-0,6	0,3	9	14	11	16	16
	1,8	0,8	0,35	0,4	9	14	11	16	16
<b>12</b>	-1	2	2,2	0,2	10	5	4	8	7
	0,8	1,5	4	-0,45	10	5	4	8	7
	1,4	-0,4	0,5	0,15	10	5	4	8	7
	-1,7	0,7	-0,25	0,8	10	5	4	8	7
<b>13</b>	0,2	2,5	5	0,3	6	4	3	9	14
	1,75	-0,1	2	-1,8	6	4	3	9	14
	-1	0,7	-8	1,5	6	4	3	9	14
	0,5	-0,8	4	-0,2	6	4	3	9	14
<b>14</b>	0,6	1	0,9	-0,7	13	2	5	7	9
	0,3	-3	1,2	-0,4	13	2	5	7	9
	-0,4	-2	1,4	0,5	13	2	5	7	9
	0,15	6	0,3	1,4	13	2	5	7	9
<b>15</b>	2	2,5	1,1	0,2	4,5	11	12	6,5	13
	1,2	-0,2	0,55	0,75	4,5	11	12	6,5	13
	-2,2	0,2	-1,3	-0,45	4,5	11	12	6,5	13
	0,6	0,7	-0,3	3	4,5	11	12	6,5	13
<b>16</b>	0,5	1,2	0,7	2	5,5	12	10	3,5	11
	-1	1,7	-0,8	4	5,5	12	10	3,5	11
	4	-0,4	1,6	2,5	5,5	12	10	3,5	11
	1,2	0,5	0,9	7	5,5	12	10	3,5	11

Таблица 13.4. Инвертирующий и неинвертирующий сумматоры, вычитатель.

№	Инвертир. сумматор					Неинвертир. сумматор					Вычитатель			
	В	В			кОм	В	В				В	В		кОм
	U1	U2	K1	K2	R3	U1	U2	K1	K2	Kyc	U1	U2	K	R1
<b>1</b>	2	-4,5	6,25	1,5	15	-2	7	0,563	0,352	2	-0,5	0,5	5	20
	-4	-5				-8	5				1,5	1		
	-0,5	4				3,5	-1				3	1,5		
	-1,5	1				7	10				0,5	4,5		
<b>2</b>	2	-5	1,6	2,4	2,4	-2,5	8	0,585	0,275	2,5	-0,5	0,3	10	10
	1	0,5				1,5	3				3	2,5		
	-2,5	2,5				1	-6				-2	-1,8		
	4	3				-7,5	-5,5				3	1		
<b>3</b>	-3,5	3	2,1	3,4	5,1	4,5	-5	0,495	0,252	4	-1	6	2,6	39
	2	-2,5				6	9				2	-0,5		
	1,5	-4				-7	6				3,5	2,5		
	3	6				-2	-3				-3	-1,5		
<b>4</b>	0,5	0,5	10	4,2	10	3	2	0,210	0,161	11	8	5	8	20
	4	-5				-5	3				3	1,8		
	1,5	-4,5				8	-5,5				-0,5	0,5		
	-2,5	5				-6,5	-2,5				-1	-0,5		
<b>5</b>	1,5	-2	8,3	3,9	20	10	-8	0,375	0,250	5	1,5	2,5	4	40
	-2,5	3				1,5	2,5				-2	-3,5		
	5	-9				-9	4				5	9		
	-3	1				-4,5	3				6,5	4,5		
<b>6</b>	2	-4,5	7,6	2,6	39	2	5	0,308	0,231	3	-1	2	6	5,1
	-2	3				6	-3,5				7	6		
	1	0,5				-7	3				3,5	3		
	-5	6				-10	-9				-5	-3,5		
<b>7</b>	1,5	4	8,2	2,7	82	1,5	4	0,273	0,182	9	5	9	2	10
	-2,5	7				5	-5				4	-6		
	3,5	-8				-2	-1,5				7	5		
	1	-5				-3	-7,5				-7	-4		
<b>8</b>	2	-9	6,7	2,6	100	1	2,5	0,181	0,114	17	1,5	-1	3	5,1
	4	-2				-6	5				-4,5	-5,5		
	-3	5				-4,5	-1				-8	-2		
	4,5	-10				10	-5				1	4		

Таблица 13.4. Продолжение.

	Инвертир. сумматор					Неинвертир. сумматор					Вычитатель			
	В	В			кОм	В	В				В	В		кОм
№	U1	U2	K1	K2	R3	U1	U2	K1	K2	Kyc	U1	U2	K	R1
<b>9</b>	2,5	-4,5	6,7	2	10	-3	7	0,692	0,204	6	-0,5	2,5	1,5	20
	-3	-2				-2,5	10				6	1		
	-0,5	4				1,5	-10				-3	8		
	-1,5	1				5	3				-4	-10		
<b>10</b>	2	-5	3,9	2	39	-2,5	8	0,676	0,162	9	-0,5	0,3	12	10
	1	0,5				0,5	2				3	2,5		
	-2,5	1,5				1	-6				-2	-1,5		
	4	3				-1,5	-5,5				3	1		
<b>11</b>	-3,5	8	8	3,1	120	4,5	-5	0,541	0,184	5	-0,3	0,2	16	10
	2	-2				3	9				0,5	-0,5		
	1,5	-6				-4	6				5,5	5		
	3	1,5				-2	-3				-3	-2,7		
<b>12</b>	0,5	0,5	6,2	2,1	62	1	1,5	0,429	0,143	16	4	6	8	20
	7	-5				-4	9				3	2,5		
	1,5	-6,5				2	-4,5				0,5	-0,5		
	-2,5	5				-1,5	-5				-5	-4,5		
<b>13</b>	1,5	-2	5,9	2	30	5	-5	0,333	0,167	7	1	2,5	5	20
	-2,5	3				-6	4,5				-2	-3		
	4	-9				2,5	10				5	7		
	-6	1				-3,5	3				8	4,5		
<b>14</b>	2,5	-4,5	5,5	2,1	82	1	3	0,285	0,146	13	-1	5	2,6	15
	-2	3				6	-8				6	2		
	1	0,5				-5	7				1	-1		
	-7	5				-2	-6				-6	-3,5		
<b>15</b>	1,5	4	5	3,3	100	0,5	4	0,567	0,144	11	5	7	4	10
	-2,5	6				3,5	-10				2	-3		
	3	-7				-1	-1,5				7,5	5		
	2	-5				-2	-5				-5,5	-4		
<b>16</b>	3,5	-8	6,2	2,1	62	3,5	2,5	0,347	0,133	17	1,5	-1	3	5,1
	4	-2				-4	8				6	3		
	-3	5				-1	-1,5				-7,5	-4,5		
	1,5	-7				-1	6				-2	4		

Таблица 13.5. Результаты исследований схем устройств.

Вариант №						
$U_{1i}, \text{В}$	.....	$U_{Ni}, \text{В}$	$U_{\text{ИЗМ}i}, \text{В}$	$U_{\text{ВЫХ}i}, \text{В}$	$\Delta U_i, \text{В}$	$\delta_i, \%$