

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная электроника»

В. А. Карпов, О. М. Ростокина

**СХЕМОТЕХНИКА НА ОСНОВЕ
ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

Практикум

**по курсу «Преобразовательная техника»
для студентов специальности 1-36 04 02
«Промышленная электроника»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2009

УДК 621.38.061(075.8)
ББК 32.844я73
К26

*Рекомендовано научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 16.06.2007 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, ст. преподаватель каф. «Информационные технологии»
ГГТУ им. П. О. Сухого *А. В. Ковалев*

Карпов, В. А.
К26 Схемотехника на основе операционных усилителей : практикум по курсу «Преобразовательная техника» для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» днев. и заоч. форм обучения / В. А. Карпов, О. М. Ростоккина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 25 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Мб RAM ; свободное место на HDD 16 Мб ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-830-5.

Представлено 40 задач по схемотехнике на основе операционных усилителей, решение которых необходимо для приобретения навыков анализа, расчета и составления функционально законченных элементов на основе аналоговой схемотехники.

Для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» дневной и заочной форм обучения.

**УДК 574(075.8)
ББК 20.1я73**

ISBN 978-985-420-830-5

© Карпов В. А., Ростоккина О. М., 2009
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2009

Настоящее пособие предназначено для развития навыков и формирования умений анализировать аналоговые электронные схемы, содержащие операционные усилители, у студентов, обучающихся по специальности «Промышленная электроника». Оно также может быть полезно для учащихся других специальностей, в программах которых присутствуют элементы аналоговой электроники.

Данное практическое пособие содержит 40 задач, посвященных анализу схем с использованием операционных усилителей. При решении задач полагать, что все схемы «рабочие», а операционный усилитель идеальный, т. е. коэффициент усиления равен бесконечности, входное сопротивление равно бесконечности, погрешности отсутствуют. По умолчанию напряжение питания операционных усилителей равно ± 15 В.

Задача 1

Предполагая, что у транзистора VT сопротивление сток-исток очень мало, по сравнению с R_4 , когда VT открыт ($U_{упр} = 0$), определить коэффициент усиления. Определить коэффициент усиления, когда транзистор закрыт.

При $R_{си} < 100$ Ом (VT – открыт) найти значение сопротивления R_4 , чтобы погрешность в коэффициенте усиления была меньше 1 %.

Отметить преимущества и недостатки при замене полевого транзистора на биполярный транзистор.

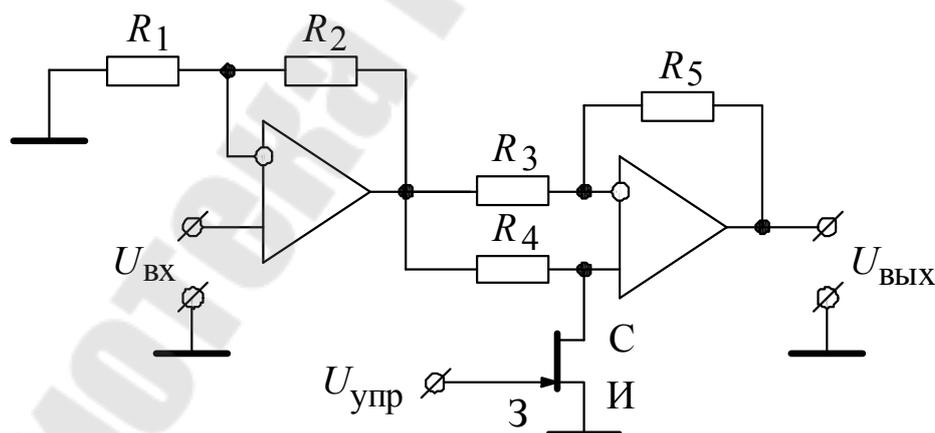


Рис. 1. Схема переключения полярности коэффициента усиления, управляемая напряжением

Задача 2

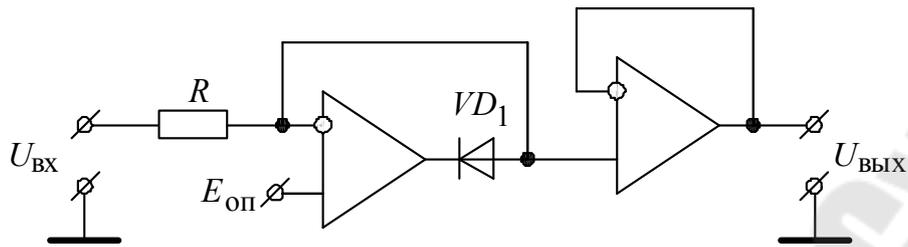


Рис. 2. Прецизионная схема ограничения, управляемая напряжением

1. Нарисуйте график передаточной характеристики $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$ и покажите, что $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}$, при $U_{\text{ВХ}} \leq E_{\text{оп}}$ и $U_{\text{ВЫХ}} = E_{\text{оп}}$, при $U_{\text{ВХ}} \geq E_{\text{оп}}$.
2. Нарисуйте $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$ для обратной полярности включения диода VD_1 .
3. Нарисуйте схему двухстороннего ограничения тока с уровнями ограничения $E_{\text{оп1}}$, $E_{\text{оп2}}$.
4. Почему данная схема называется прецизионной схемой ограничения?

Задача 3

Покажите, что при комнатной температуре $U_{\text{ВЫХ}} = (1,0) \lg \frac{U_2 \cdot R_1}{U_1 \cdot R_2}$.

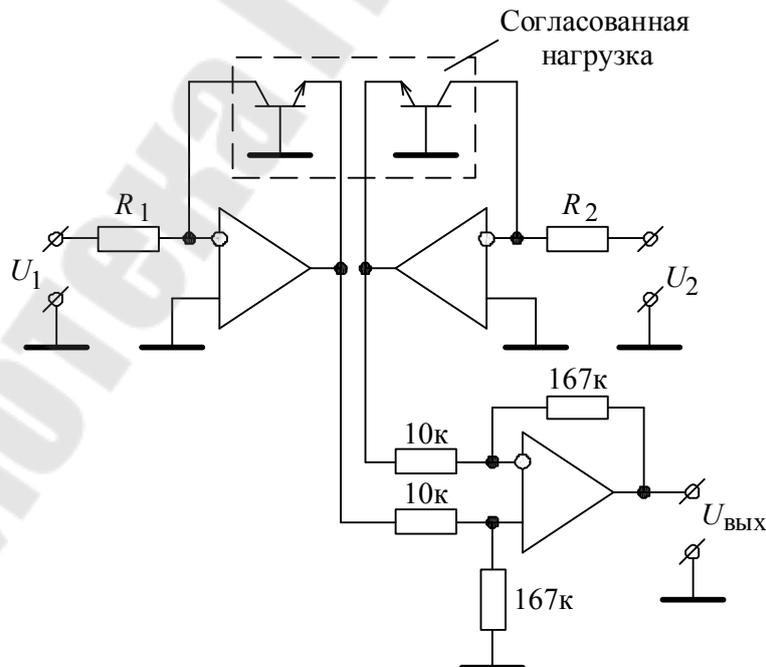


Рис.3. Логарифмический преобразователь

Задача 4

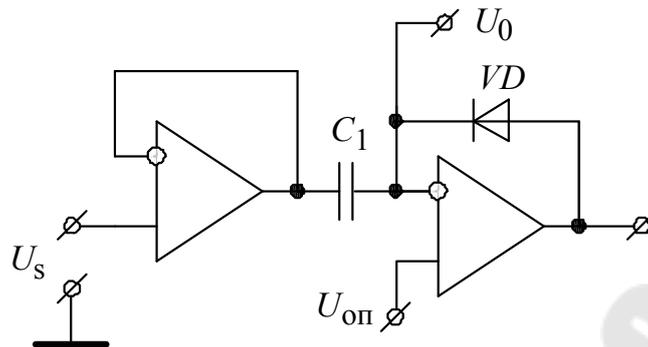


Рис. 4. Прецизионная схема восстановления постоянной составляющей, управляемая напряжением

Показать, что переменные составляющие выходного напряжения U_0 и входного U_s одинаковы, а уровень постоянной составляющей сдвинут так, что он никогда не опускается ниже $U_{оп}$:

- 1) $U_s = 10 \cdot \sin(\omega t)$, $U_{оп} = 5 \text{ В}$, ($U_0 = 10 \cdot \sin(\omega t) + 15$);
- 2) $U_s = 10 \cdot \sin(\omega t)$, $U_{оп} = 0 \text{ В}$, ($U_0 = 10 \cdot \sin(\omega t) + 10$);
- 3) $U_s = 10 \cdot \sin(\omega t)$, $U_{оп} = -5 \text{ В}$, ($U_0 = 10 \cdot \sin(\omega t) + 5$).

Найти U_0 .

Показать, что при изменении полярности диода VD переменная составляющая выходного напряжения U_0 будет такой же, как у входного напряжения U_s , а постоянная составляющая будет сдвинута так, что выходное напряжение никогда не превысит напряжение $U_{оп}$.

Задача 5

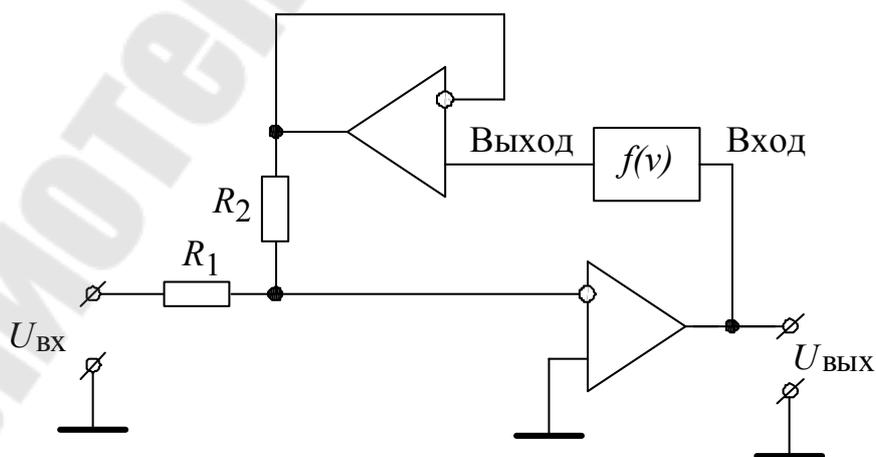


Рис. 5. Функциональный преобразователь

Показать, что если $f(v) = a \cdot v^n$, то для $U_{\text{ВЫХ}}$ справедливо соотношение $U_{\text{ВЫХ}} = \left(-\frac{R_2 \cdot U_{\text{ВХ}}}{a \cdot R_1} \right)^{\frac{1}{n}}$.

Задача 6

Найти значение резисторов, если $U_{\text{ВХ}}$ изменяется в диапазоне $(-3 \div +3)$ В, $U_{\text{ОП}} = 2,5$ В, а $U_{\text{ВЫХ}}$ должно изменяться в диапазоне $(0,1 \div 2,4)$ В.

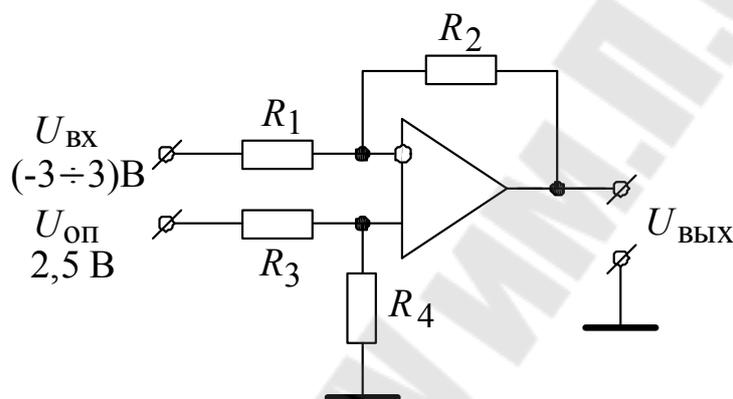


Рис. 6. Схема согласования уровня входного напряжения с напряжением АЦП (0÷2,5) В

Задача 7

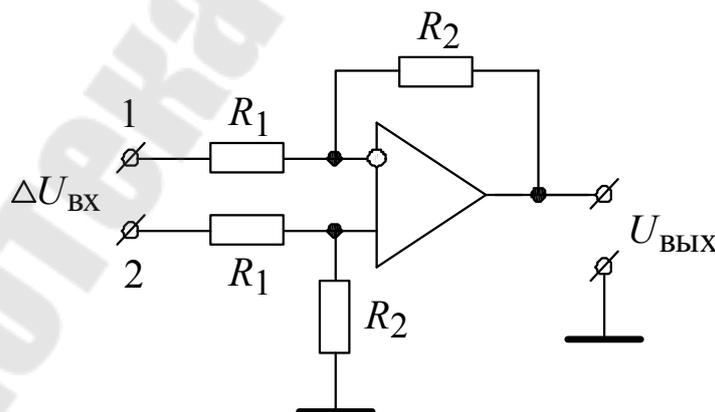


Рис. 7. Дифференциальный усилитель (погрешности)

Найти погрешность дифференциального усилителя, если разброс резисторов равен δ_R .

Задача 8

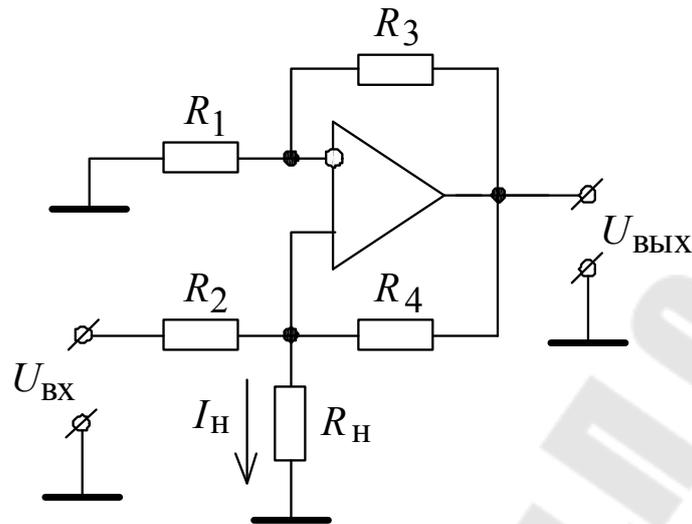


Рис. 8. Преобразователь напряжение-ток

Оценить изменение тока в нагрузке при наихудшем соотношении сопротивлений резисторов от значения сопротивления нагрузки: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0 \cdot (1 \pm \delta_R)$.

Задача 9

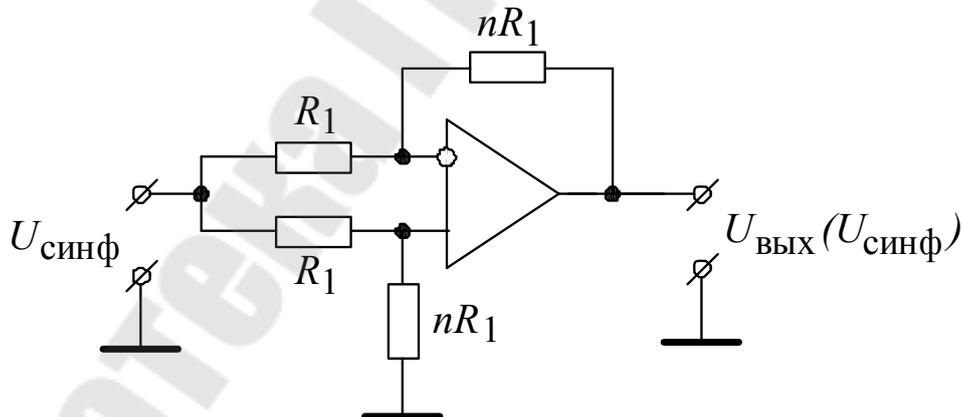


Рис. 9. Погрешность дифференциального усилителя от синфазной составляющей

$$R_1 = R \cdot (1 \pm \delta_R),$$

где δ_R – отклонение значения сопротивления от номинального; n – коэффициент усиления.

Оценить максимальное значение $U_{\text{вых}}$ от $U_{\text{сиф}}$ с учетом наилучшего соотношения резисторов.

Задача 10

Дано: $E_{\text{оп}} = 2,5 \text{ В}$; $R_1 \div R_4$ – определенные номиналы; ОУ, $U_{\text{вх}}$ изменяется в пределах $U_{\text{вх}} = (-3 \div +2) \text{ В}$, а выходное напряжение должно изменяться в пределах $U_{\text{вых}} = (0 \div 2,5) \text{ В}$.

Составить схему и рассчитать номинальные значения резисторов R_1, R_2, R_3, R_4 .

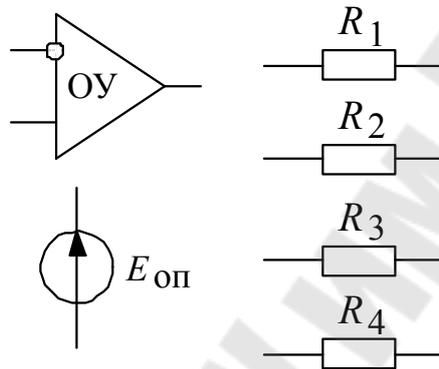


Рис. 10. Масштабный преобразователь

Задача 11

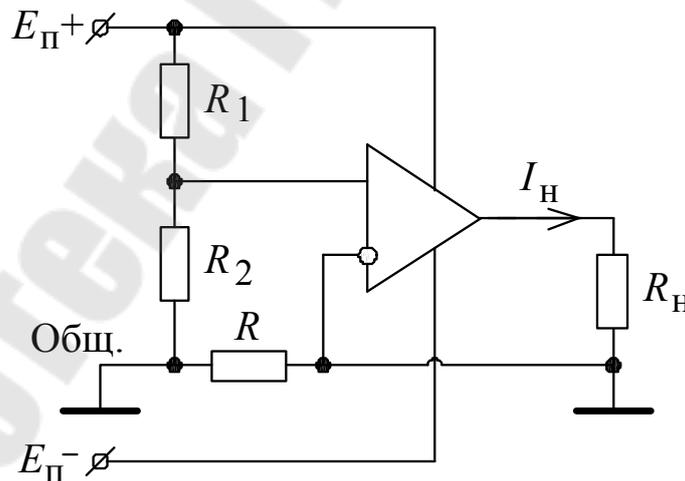


Рис. 11. Источник тока с заземленной нагрузкой и «плавающим» питанием

Показать, что данная схема является источником тока. Найти ток нагрузки $I_{\text{н}}$.

Задача 12

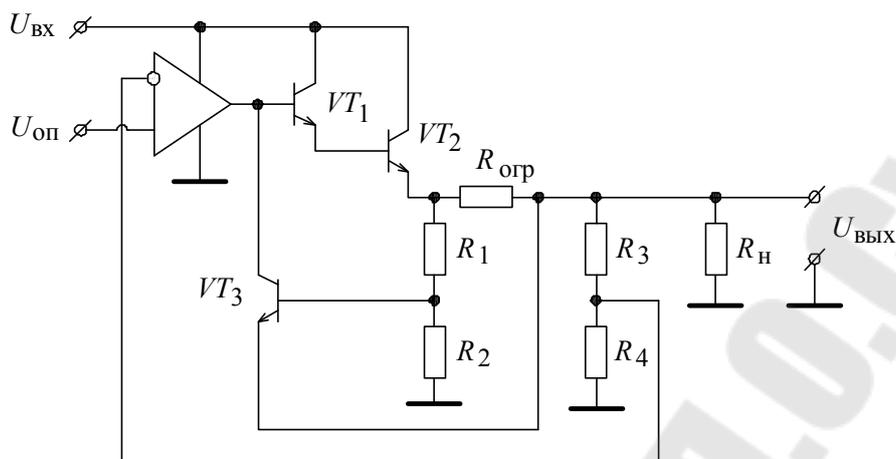


Рис. 12. Стабилизатор напряжения с токовой петлей

Покажите, что ограничение тока происходит, когда

$$\frac{I_{\text{н}} \cdot R_{\text{огр}} \cdot R_2}{R_1 + R_2} - \frac{U_{\text{н}} \cdot R_1}{R_1 + R_2} \approx 0,6 \text{ В.}$$

Учитывая, что для транзистора VT_2 $P_{\text{max}} = 0,5 \text{ Вт}$, а $U_{\text{вх}} = 15 \text{ В}$, найдите $I_{\text{н max}}$ при $U_{\text{н}} = 10 \text{ В}$ и при $U_{\text{н}} = 0 \text{ В}$.

При условии $R_1 + R_2 = 100 \text{ кОм}$ найдите такие R_1 , R_2 и $R_{\text{огр}}$, при которых наступит ограничение тока.

Нарисуйте вольт-амперную характеристику $U_{\text{н}}(I_{\text{н}})$ стабилизированного напряжения, соответствующую заданным условиям.

Для $R_3 + R_4 = 2 \text{ кОм}$ и $U_{\text{оп}} = 1,8 \text{ В}$ найдите R_3 и R_4 при стабилизированном входном напряжении 10 В .

Задача 13

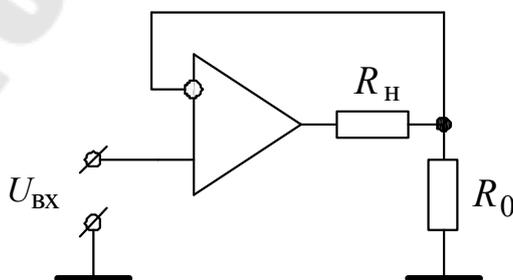


Рис. 13. Преобразователь напряжение-ток

Чему будет равен ток нагрузки при $K_u = \infty$ и $K_u \neq \infty$?

Задача 14

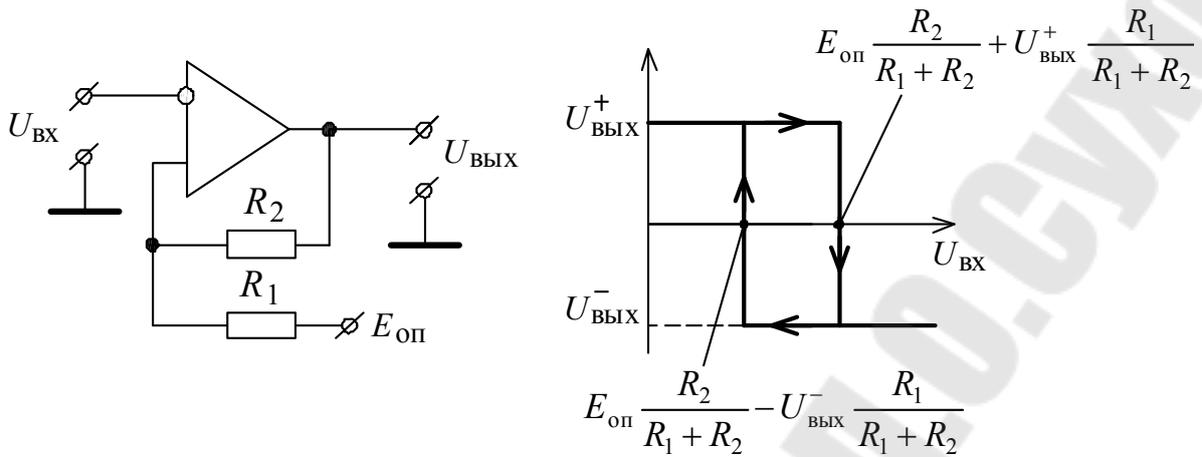


Рис. 14. Триггер Шмитта

Покажите, что передаточная характеристика получена для данной схемы, причем $U_{вых}^+$ и $U_{вых}^-$ – уровни насыщения входного напряжения ОУ.

Задача 15

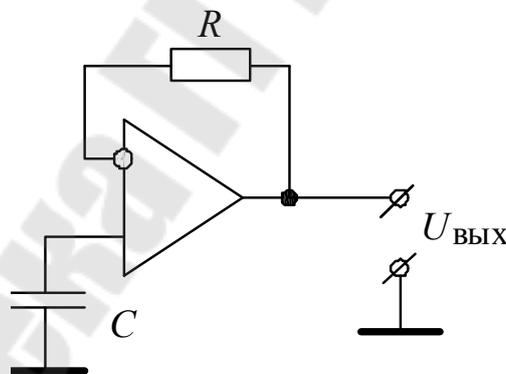


Рис. 15. Схема определения входного тока ОУ

Нарисовать в масштабе зависимость выходного напряжения от времени $U_c(t=0)=0$, $C=10$ нФ, $I_{вх}=10$ нА, $R=1$ МОм. До каких пор будет изменяться выходное напряжение?

Задача 16

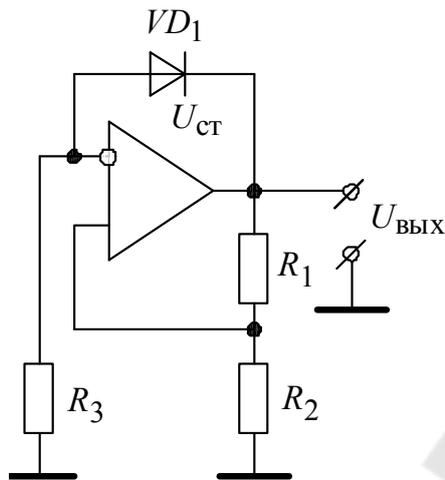


Рис. 16. Стабилизатор положительного напряжения

При условии, что $U_{\text{ВЫХ}} > U_{\text{ст}}$, покажите, что $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ст}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$.

Найти ток через стабилитрон.

Задача 17

1. Показать, что I_{H} задается формулой

$$I_{\text{H}} = \frac{U_1 - U_2}{R_1}$$

и не зависит от R_{H} , т. е. данная схема работает как источник тока.

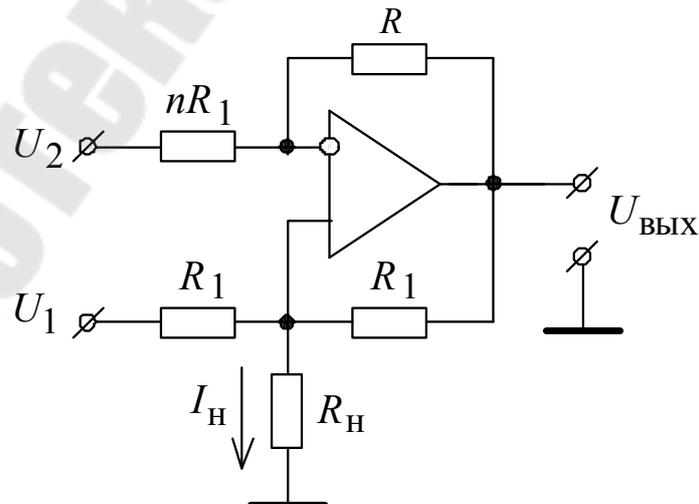


Рис. 17. Источник тока с заземленной нагрузкой

2. Пусть $R_1 = 1 \text{ кОм}$, $R_2 = 250 \text{ кОм}$, $U_2 = 0$, выходное напряжение ОУ может измениться в пределах $\pm 10 \text{ В}$. Найти рабочий диапазон напряжений. (Рабочий диапазон напряжений – диапазон напряжений на нагрузке, при которых схема работает как источник тока.)

3. Входное напряжение U_1 лежит в диапазоне $\pm 10 \text{ В}$. Найти диапазон изменения выходного тока I_n .

Задача 18

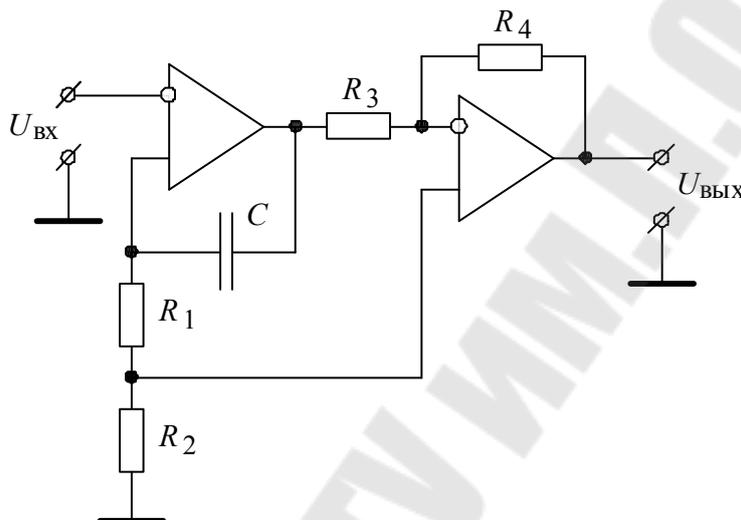


Рис. 18. Интегратор с высокоомным входом

1. При каких соотношениях резисторов данная схема выполняет роль интегратора?

2. Почему у интегратора высокоомный вход?

Задача 19

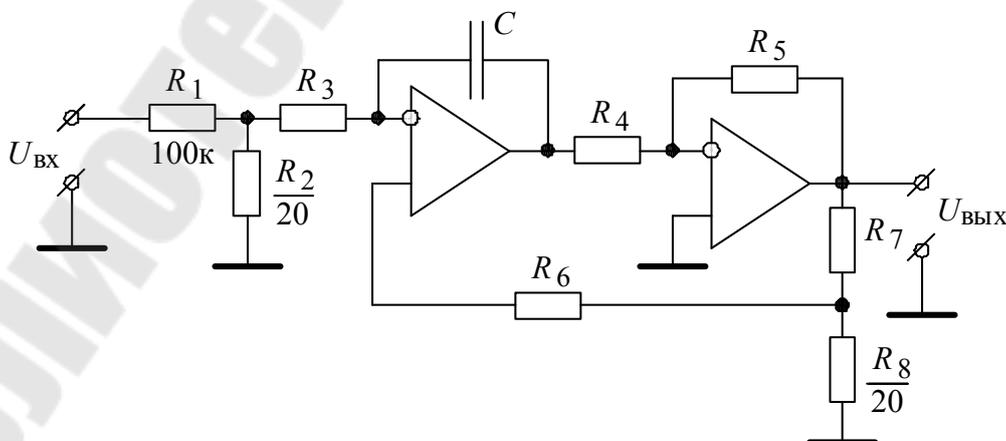


Рис. 19. Схема увеличения постоянной времени RC-цепи

Показать, что постоянная времени R_3C -цепи интегратора увеличена в данной схеме (с учетом номинальных значений) в 5000 раз. Полагать, что $R_4 = R_5$, резистор R_6 – необязателен, $R_2, R_8 \ll R_7, R_3$.

Задача 20

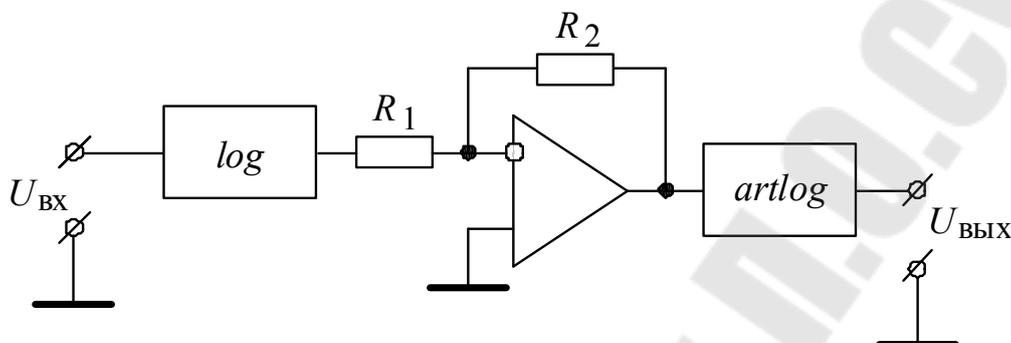


Рис. 20. Схема возведения в степень на основе логарифмирования

Дано: для логарифмирующего преобразователя
 $U_{\text{ВЫХ}} = (1,0 \text{ В}) \lg \frac{U_{\text{ВХ}}}{(1,0 \text{ В})}$, для антилогарифмирующего преобразователя
 $U_{\text{ВЫХ}} = (1,0 \text{ В}) 10^{\frac{U_{\text{ВХ}}}{(1,0 \text{ В})}}$. Показать, что $U_{\text{ВЫХ}} = (U_{\text{ВХ}})^{\frac{R_2}{R_1}}$.

Задача 21

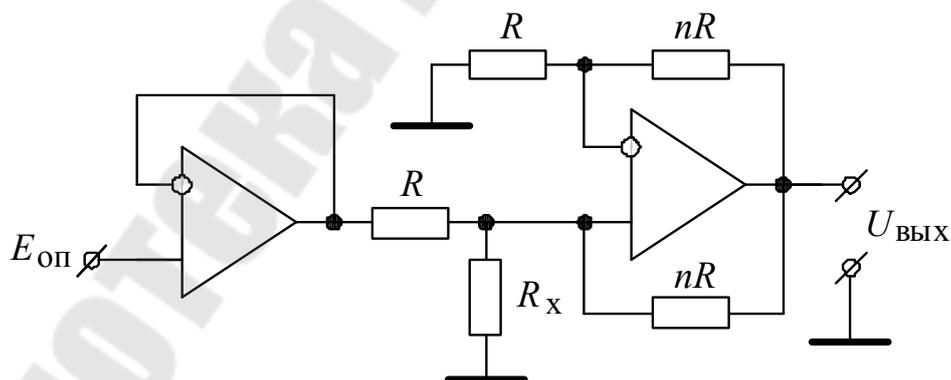


Рис. 21. Схема для измерения сопротивления

Показать, что $U_{\text{ВЫХ}} \equiv R_x$.

Задача 22

VT_1, VT_2 – согласованы, $I_k = I_0 \cdot e^{\frac{U_{бэ}}{\varphi_t}}$.

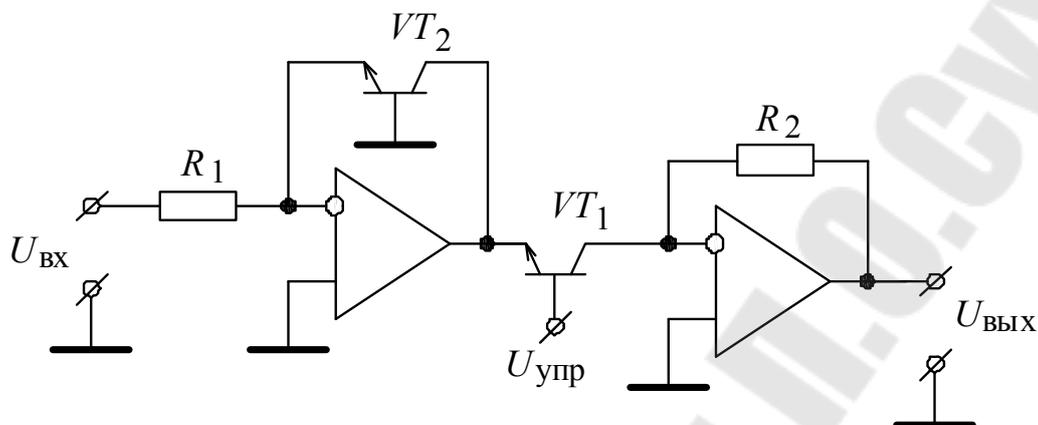


Рис. 22. Усилитель с экспоненциальным управлением коэффициентом усиления

1. Показать, что $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \exp \frac{U_{\text{упр}}}{\varphi_t}$, т. е. коэффициент усиления по напряжению экспоненциально зависит от $U_{\text{упр}}$.
2. Найти диапазон изменения коэффициента усиления по напряжению при $R_1 = R_2 = 10 \text{ МОм}$ и изменении $U_{\text{упр}}$ от 0 до 200 мВ.

Задача 23

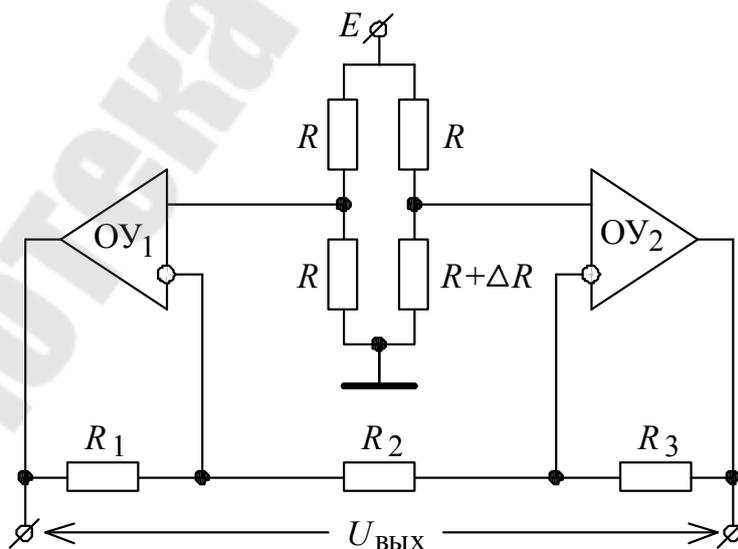


Рис. 23. Измерительная схема для моста

1. Определить выходное напряжение в общем виде.
2. Рассчитать схему при условии: $E = 10\text{ В}$, $U_{\text{вых}} (0 \div 10)\text{ В}$, $R = 200\text{ Ом}$, $\Delta R_{\text{max}} = 1\text{ Ом}$.
3. Оценить нелинейность преобразования.

Задача 24

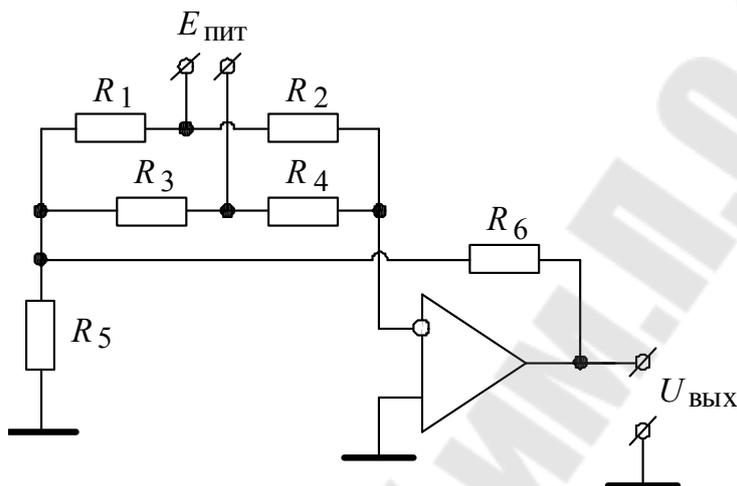


Рис. 24. Схема для мостового источника сигнала

1. Полагая, что $R_1 = R_4 = R_0 \cdot (1 + \delta_R)$, $R_2 = R_3 = R_0 \cdot (1 - \delta_R)$, найти выходное напряжение.
2. Рассчитать элементы схемы при условии, что $E_{\text{пит}} = 10\text{ В}$, $U_{\text{вых}}(\delta_R) = \pm 10\text{ В}$, $R_0 = 100$, $\delta_R = 0,1$.
3. Определить нелинейность функции преобразования.

Задача 25

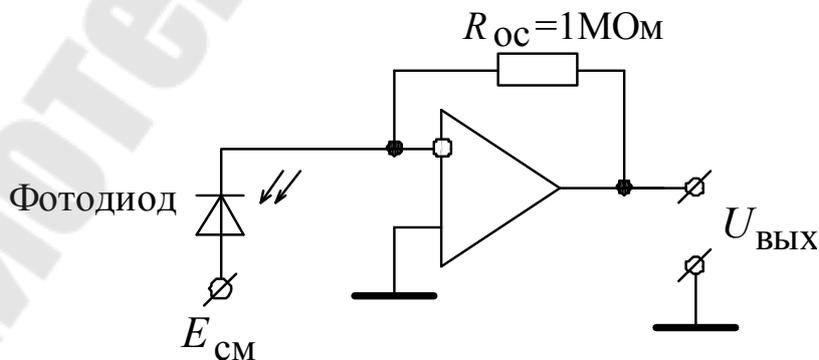


Рис. 25. Оптоэлектронный датчик

Фотодиод имеет активную площадь 10 мм^2 , а чувствительность по току (отношение выходного тока к оптической мощности света) равна 5 А/Вт . Найдите выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$, если плотность оптической мощности света 100 нВт/см^2 .

Задача 26

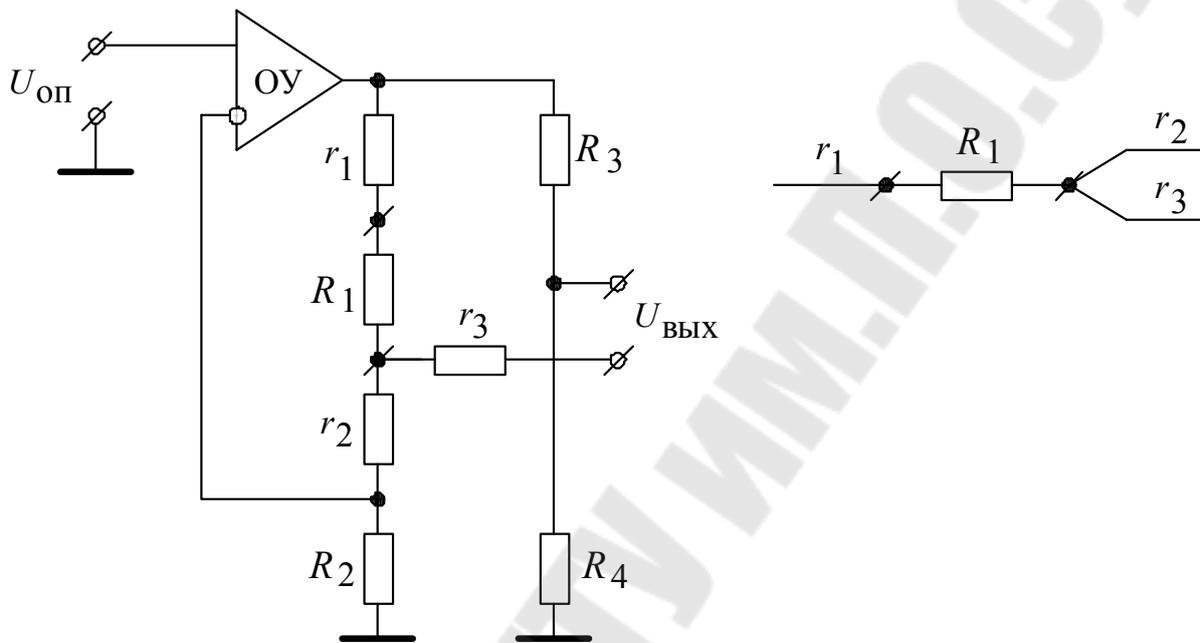


Рис. 26. Мостовой преобразователь сопротивления в напряжения

Схема преобразует сопротивление R_1 в напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$. Показать, что напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ не зависит от сопротивлений линии связи r_1, r_2, r_3 .

Задача 27

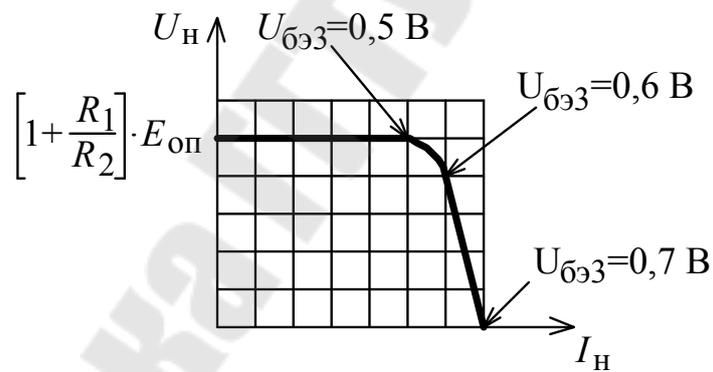
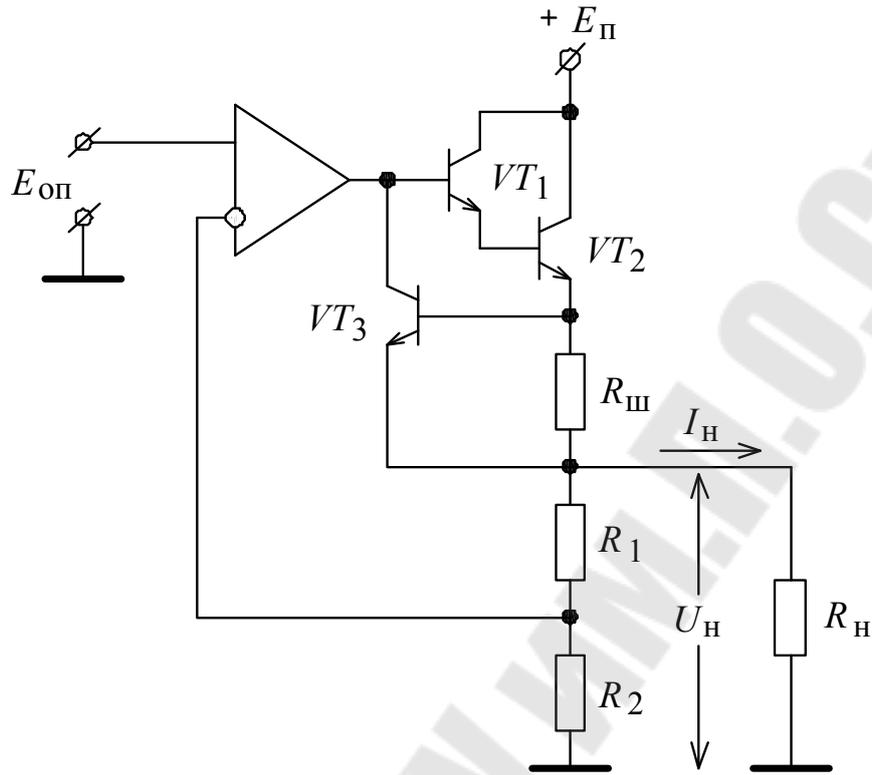


Рис. 27. Стабилизатор напряжения с повышенной нагрузочной способностью и ограничением по току

Покажите, что

- 1) $U_{\text{н}} = E_{\text{оп}} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$;
- 2) $U_{\text{н max}} = E_{\text{п}}^+ - 0,9 \text{ В}$;
- 3) $I_{\text{н max}} = \frac{0,6 \text{ В}}{R_{\text{ш}}}$;

4) Для $E_{\text{п}}^+ = 20 \text{ В (max)}$ и $P_{\text{доп max}} = 50 \text{ Вт}$ транзистора VT_2 принимаемое значение тока нагрузки $I_{\text{н max}}$.

Задача 28

Мостовая схема R_1, R_2, R_3, R_4 установлена на удалении от преобразователя сопротивления в напряжение.

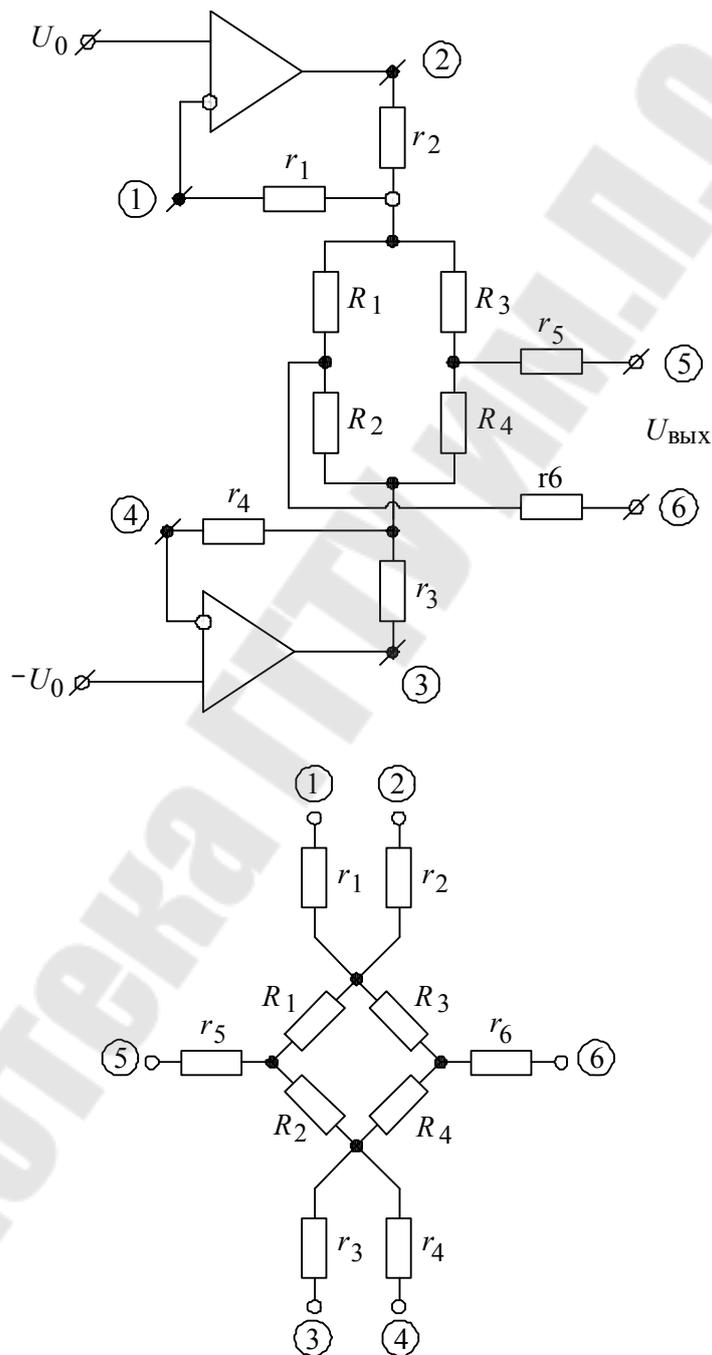


Рис. 28. Преобразователь сопротивления в напряжение с использованием шестипроводной соединительной линии связи

Найти напряжение $U_{\text{ВЫХ}}(\Delta R)$ и показать, что оно не зависит от сопротивлений линии связи $r_1 \div r_6$. Считать, что $R_1 = R_2 = R_3 = R$, $R_4 = R + \Delta R = R_0 \cdot (1 + \delta_R)$.

Задача 29

Дано: $U_{\text{ВЫХ}} = 2,2$ мВ, $R_1 = R_2 = 0$; $U_{\text{ВЫХ}} = 20$ мВ, $R_1 = R_2 = 100$ МОм; $U_{\text{ВЫХ}} = -120$ мВ, $R_1 = 0$, $R_2 = 100$ МОм.

Определить $E_{\text{СМ}}$, $I_{\text{ВХ}}$, $\Delta I_{\text{ВХ}}$.

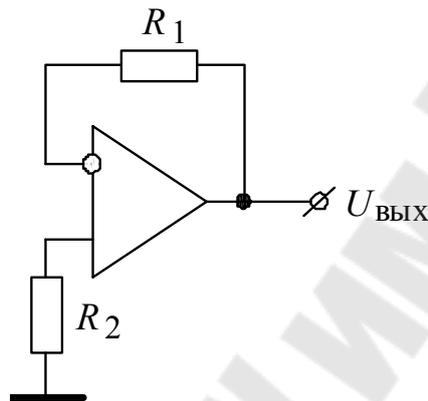


Рис. 29. Схема для определения $E_{\text{СМ}}$, $I_{\text{ВХ}}$, $\Delta I_{\text{ВХ}}$

Задача 30

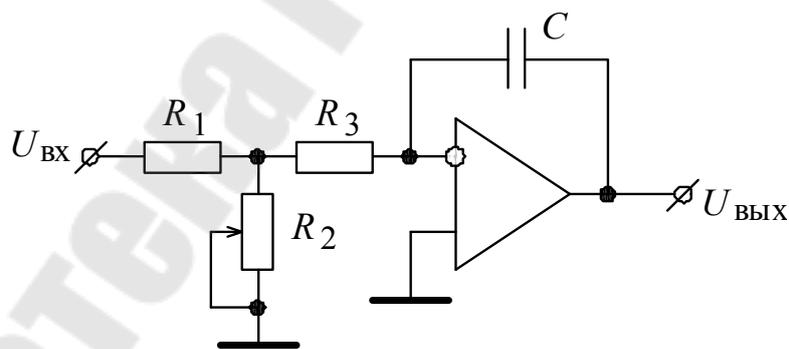


Рис. 30. Интегратор с изменяемой постоянной времени

Найти значение резисторов, при которых постоянная времени интегратора изменяется в 100 раз. Значение конденсатора $C = 1$ мкФ, $\tau = R_{\text{ЭКВ1}} \cdot C$ и изменяется от 0,1 до 10 секунд. Значение резисторов не более 30 кОм.

Задача 31

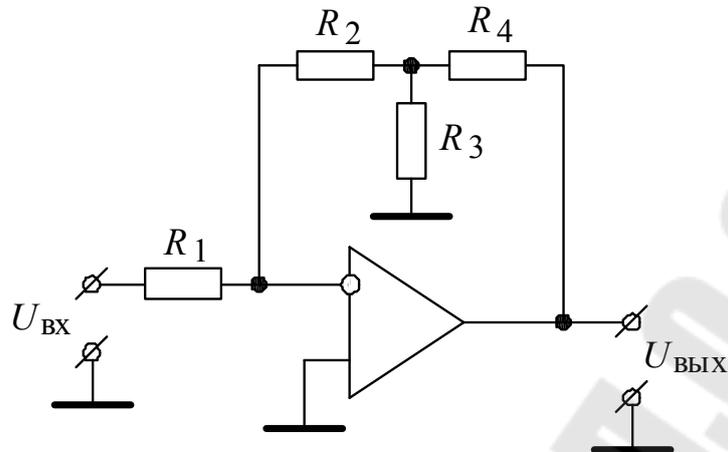


Рис. 31. Усилитель с T-образной резистивной обратной связью

Определить коэффициент усиления усилителя при $K_u = \infty$ и при отличии K_u от ∞ .

Задача 32

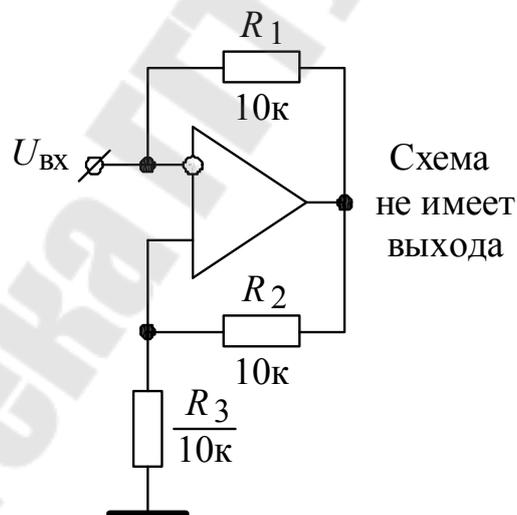


Рис. 32. Преобразователь отрицательного сопротивления

1. Чему равно входное сопротивление схемы?
2. Диапазон выходного напряжения ± 10 В, чему равен диапазон входного напряжения, в котором схема работает без насыщения?

Задача 33

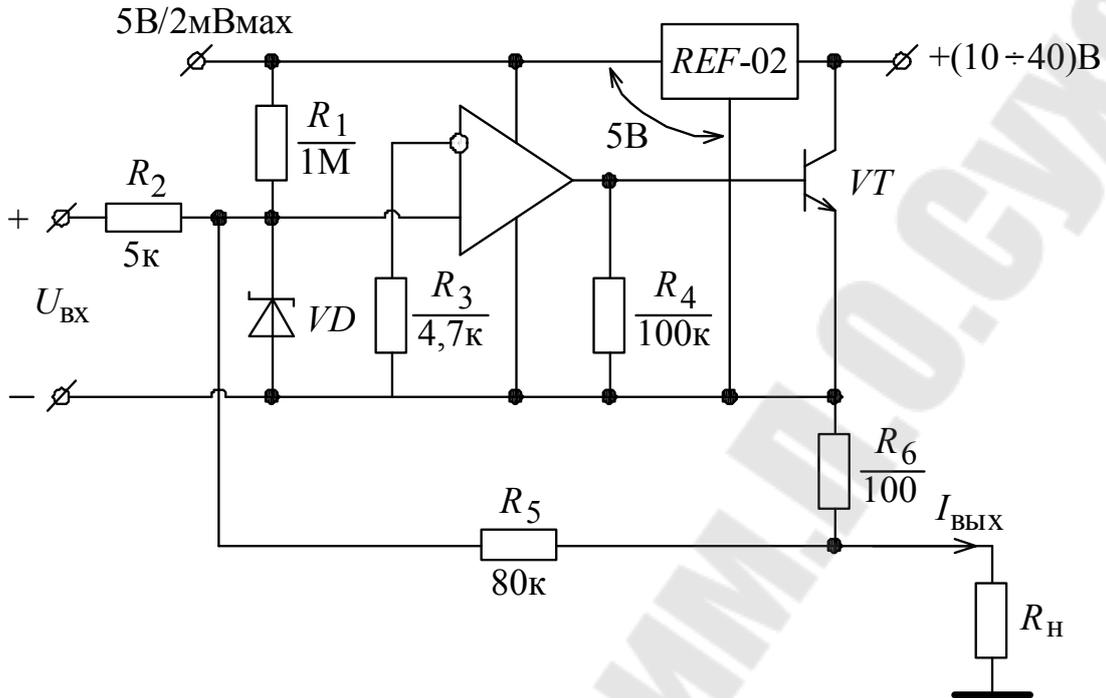


Рис. 33. Двухпроводный преобразователь напряжения в ток $4 \div 20$ мА.

Показать, что $I_{\text{вых}} = \frac{10 \cdot U_{\text{вх}}}{100 \text{ Ом}} + 4 \text{ мА}$.

Задача 34

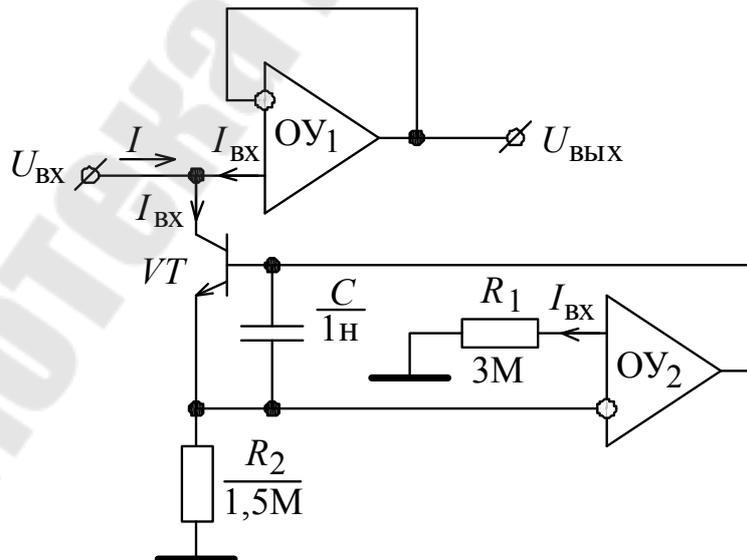


Рис. 34. Схема компенсации входного тока

Показать, что со стороны входного напряжения схема не имеет входного тока.

Задача 35

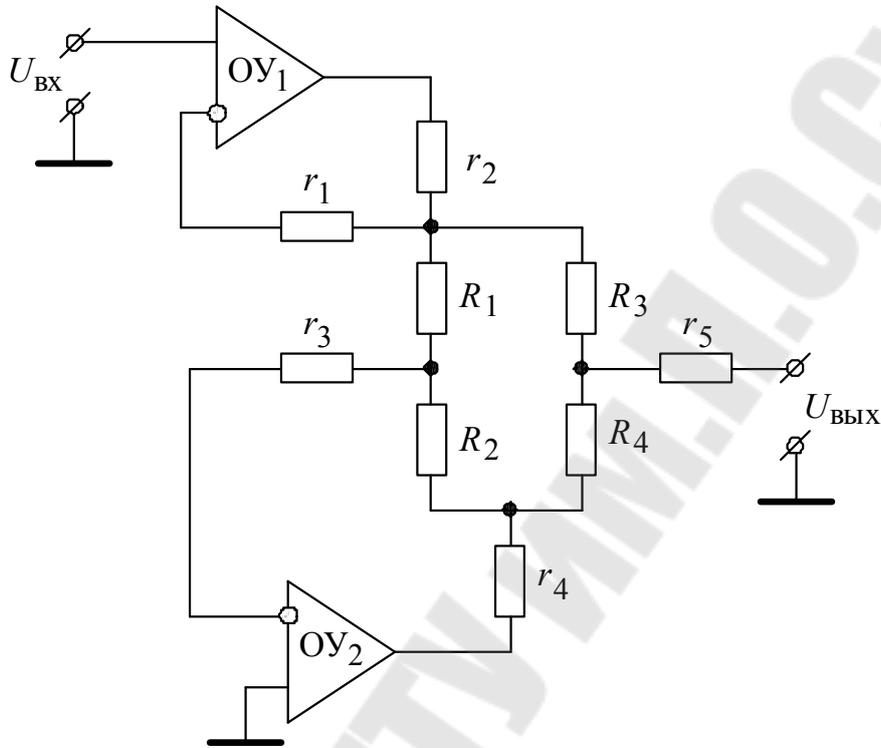


Рис. 35. Пятипроводная схема соединения преобразователя сопротивления в напряжение

Показать, что выходное напряжение не зависит от сопротивлений линии связи $r_1 \div r_5$.

Задача 36

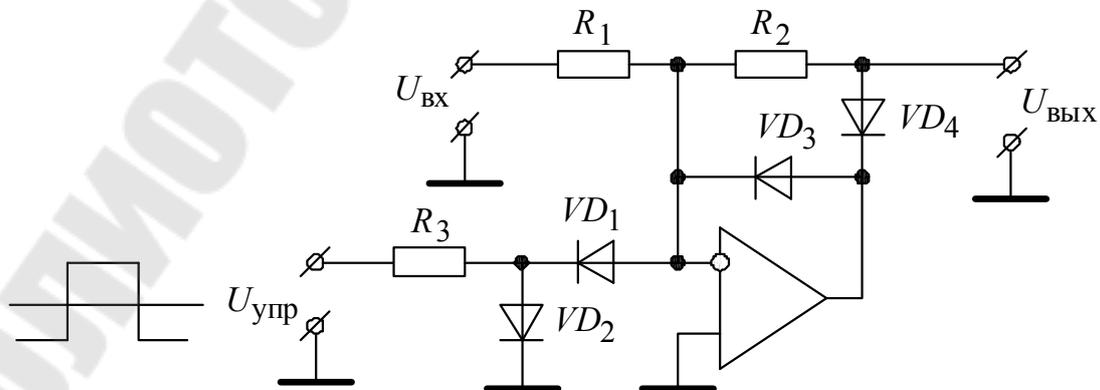


Рис. 36. Переключатель напряжения на основе ОУ

Ключ предназначен только для коммутации положительного входного напряжения. Управляющее напряжение может быть как отрицательным, так и положительным. Чему равно выходное напряжение схемы при $U_{упр} > 0$ и $U_{упр} < 0$? Какие ограничения накладываются на соотношение $U_{упр}$ и $U_{вх}$ для того, чтобы это был переключатель?

Задача 37

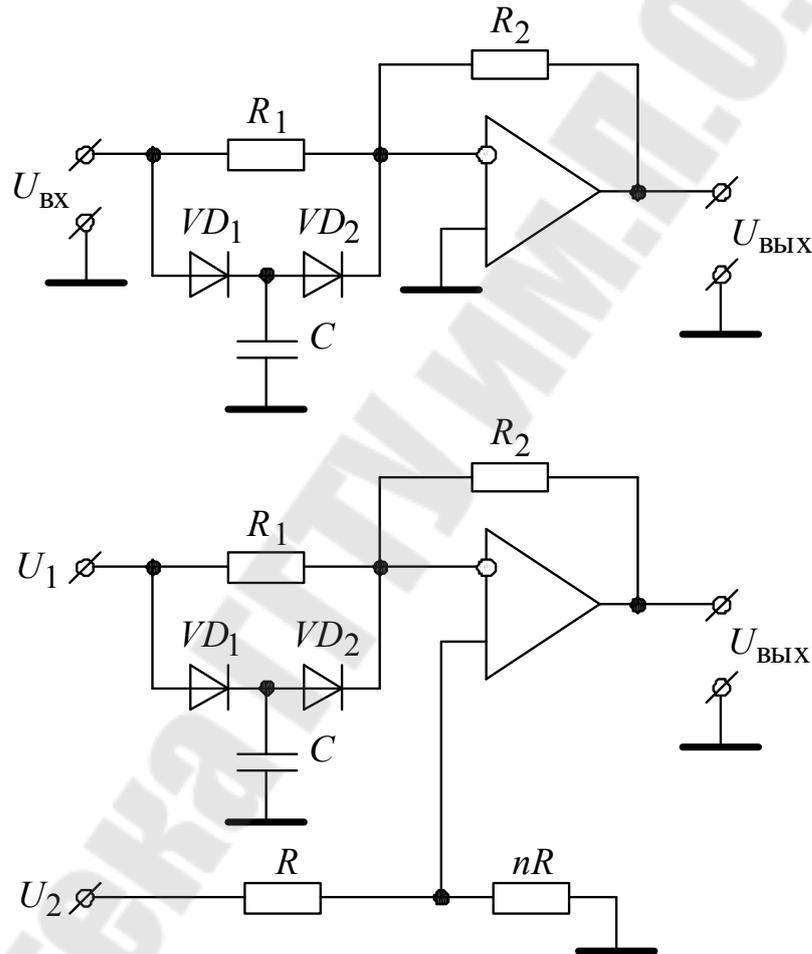


Рис. 37. Схема ограничения уровня

Построить графики $U_{вых} = f(U_{вх})$, $U_{вых} = f(U_2 - U_1)$.

Задача 38

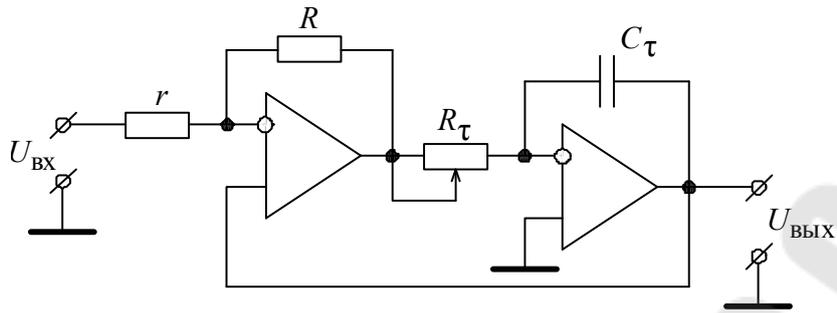


Рис. 38. Задатчик интенсивности (скорости нарастания-спада)

Нарисовать график зависимости $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$ при скачкообразном входном воздействии.

Задача 39

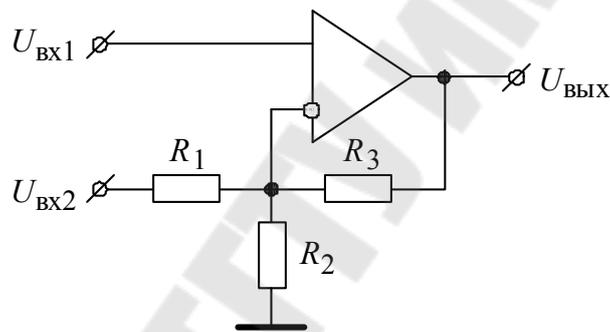


Рис. 39. Усилитель с двумя входами

Найти выходное напряжение в зависимости от входного напряжения.

Задача 40

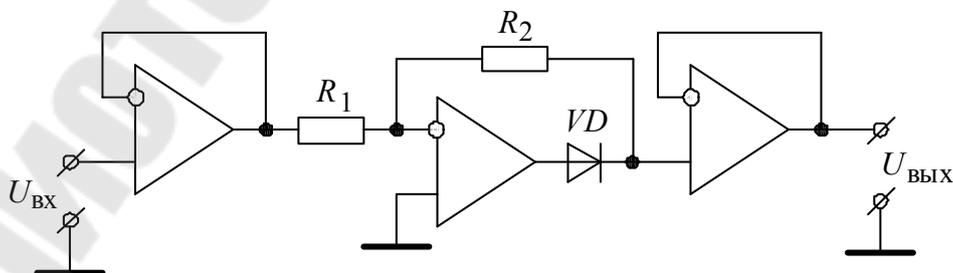


Рис. 40. Точковый выпрямитель

Показать, что $U_{\text{ВЫХ}} = |U_{\text{ВХ}}|$.

Литература

1. Алексеенко, А. Г. Применение прецизионных аналоговых микросхем / А. Г. Алексеенко, Е. А. Каламбет, Г. Н. Стародуб. – Москва : Радио и связь, 1985.
2. Гутников, В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В. С. Гутников. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1988.
3. Уитсон, Дж. 500 практических схем на ИС : пер. с англ. / Дж. Уитсон. – Москва : Мир, 1992.
4. Достал, Н. Операционные усилители : пер. с англ. / Н. Достал. – Москва : Мир, 1982.
5. Граф, Р. Электронные схемы: 1300 примеров : пер. с англ. / Р. Граф. – Москва : Мир, 1989.
6. Соклоф, С. Аналоговые интегральные схемы : пер. с англ. / С. Соклоф. – Москва : Мир, 1988.
7. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство / У. Титце, К. Шенк. – Москва : Мир, 1982.
8. Фолькенберри, Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС : пер. с англ. / Л. Фолькенберри. – Москва : Мир, 1985.
9. Хоровиц, П. Искусство схемотехники : в 3-х т. / П. Хоровиц, У. Хилл. – Москва : Мир, 1993.

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Карпов Владимир Александрович
Ростокина Ольга Михайловна

СХЕМОТЕХНИКА НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Практикум
по курсу «Преобразовательная техника»
для студентов специальности 1-36 04 02
«Промышленная электроника»
дневной и заочной форм обучения

Электронный аналог печатного издания

Редактор *С. Н. Санько*
Компьютерная верстка *Е. В. Темная*

Подписано в печать 25.02.09.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 0,97.

Изд. № 138.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.