Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

Д.Э. ПОСТНОВ

Рабочая тетрадь

по курсу

ОСНОВЫ СХЕМОТЕХНИКИ

Учебно-методическое пособие
для студентов 4 курса физического факультета

Студента _____ , группа __0–12__ , 7 семестр _____ г.

СОДЕРЖАНИЕ

Вводные замечания_____3

Раздел 1. Схемы включения биполярных и полевых транзисторов_____14

Раздел 2. Применение операционных усилителей_____20

Раздел 3. Схемы источников тока и напряжения_____28

Раздел 4. Усилители_____36

Раздел 5. Фильтры_____47

Раздел 6. Генераторы_____52

Раздел 7. Схемы математических операций и аналогового моделирования_____64

Раздел 8. Цифро-аналоговые преобразователи_____73

Раздел 9. Аналого-цифровые преобразователи_____81

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

О пособии

Данное учебно методическое пособие создано в рамках работ по мероприятию 1.2.9 Инновационно-Образовательной программы СГУ, этап 2008г. Оно предназначено в помощь студентам при освоении ими дисциплины "Основы схемотехники" (специальная дисциплина по специальностям 013800-радиофизика и 014200 - биохимическая физика). Пособие предназаначено для распространения в электронном виде (PDF-файл) и самостоятельной распечатки его студентами в начале семестра.

Как работать с тетрадью

Пособие доступно по адресу: **http://chaos.ssu.runnet.ru** в разделах "Студентам-радиофизикам" и "Студентам-биофизикам". При скачивании и распечатке пособия следует выбрать между двумя доступными форматами: файл **shemo_a4.pdf**, содержит прямую последовательность страниц в формате А4. При двусторонней печати вам потребуется 46 листов бумаги. Файл **shemo_booklet.pdf** содержит набор страниц, отсортированных и расположенных на листах А4 таким образом, чтобы при правильной распечатке их можно было перегнуть пополам и скрепить в виде книжечки. Этот формат компактней, требует вдвое меньше бумаги, но распечатать и собрать его немного сложнее. При выборе формата учитывайте особенности своего почерка, а также типичную для вас детальность составления конспекта (первый вариант оставляет больше места для записей).

Главное назначение пособия - избавить от нудной зарисовки схем во время лекций, тем самым сохранив время и силы для осмысления материала. *Пособие само по себе недостаточно для подготовки к зачету по курсу.*
Это сделано намеренно - только собственноручно внесенные комментарии по работе схем, расчетные соотношения и другие пометки сделают "Рабочую тетрадь ..." самодостаточным источником информации по данной дисциплине.

Саратовский государственный университет, кафедра радиофизики и нелинейной динамики,
Автор - проф. Постнов Дмитрий Энгелевич.
Компьютерная отрисовка схем - Малова Светлана Юрьевна.

2008г.

Рекомендуемая литература:

[1] П.Хоровиц, У. Хилл, Искусство схемотехники, в 2 том 1, М:Мир, 1986.
Знаменитая книга по схемотехнике, выдержавшая много изданий на русском языке. Она содержит много объясняющего текста и не похожа на обычные учебники. Акцент сделан на понимание того, что происходит в электронных схемах и почему хороши или плохи те или иные решения. Несмотря на "ненаучную" форму изложения, в книге обсуждается много тонких и неочевидных ньюансов работы электронных устройств.

[2] Г.И.Волович, Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств, М: Издательский дом Додэка-XXI, 2005.-528с.
Современное и информативное издание, охватывающее широкий спектр вопросов использования операционных усилителей. Рассматриваются самые разные их приложения, от простейших до построения схем АЦП и ЦАП. Много несложных поясняющих схем. Легко понять принцип работы того или иного класса устройств. В то же время, сами схемы не всегда поясняются детально. Предполагается, что читатель неплохо знаком с основами электроники. Книга скорее справочная и расширяющая кругозор, нежели обучающая.

[3] М.Мэндл, 200 избранных схем электроники, М: Мир, 1985.
Несколько устаревшая с точки зрения элементной базы (первое издание на английском - 1978 год), но "объясняющая" книга. Удачное сочетание свойств справочника и развернутого комментария по работе классических схемных решений. Рекомендуется для изучения вопросов применения биполярных транзисторов.

[4] М.Х.Джонс, Электроника – практический курс, М: ПОСТМАРКЕТ, 1999.
Хороший учебник для начала "с нуля". Подробно разбирается принцип работы биполярного и полевого транзисторов. Не забыты такие базовые вещи как действие обратных связей и вопросы согласования сопротивлений. В то же время, разбираются и "продвинутые" схемные решения.

[5] Граф Р. , Шиитс В., Энциклоперия электронных схем том 7 часть 1, М: ДМК, 2000.
Огромная коллекция разнообразных практических схем, ориентированная на радиолюбителей. К этой книге имеет смысл обращаться в поисках конкретных решений по определенной теме, предварительно освоив принципы их работы с помощью других книг.

[6] Шелестов И.П. Радиолюбителям: полезные схемы, книга 5, М.:СОЛОН-пресс, 2003, 240с.:илл.
Подобно предыдущей, книга ориентирована на радиолюбителей. Детально рассматриваются вопросы применения микросхемы таймера 555.

[7] Григорьев Б.И. Элементная база и устройства аналоговой электроники. Учебное пособие: СПб: СПбГУ ИТМО, 2008, 94с.

Таблица основных условных обозначений элементов электрических схем.

Обозначение	***Значение***	***Обозначение***	***Значение***
	Пересечение проводов, электрически соединенных, несоединенных		*Трансформатор с ферритовым магнитопроводом*
	Промежуточная точка подключения внешних цепей		Операционный усилитель (общее обозначение)
	Электрическое соединение с корпусом (массой)		Биполярный транзистор проводимости n-p-n
	Резистор		Биполярный транзистор проводимости p-n-p
	Переменный резистор		Транзистор полевой с изолированным затвором, P-типа
	Подстроечный резистор		Транзистор полевой с изолированным затвором, N-типа
	Конденсатор		Транзистор полевой с каналом N-типа
	Электролитический конденсатор (поляризованный)		Транзистор полевой с каналом P-типа
	Полупроводниковый диод (общее обозначение)		Кварцевый резонатор
	Стабилитрон односторонний		Источник тока

Обозначение	*Значение*	*Обозначение*	*Значение*
	Диод тунельный		Источник напряжения
	Катушка индуктивности		Измеритель напряжения (вольтметр)
	Катушка индуктивности с отводом		Измеритель тока (амперметр)

Использование возможностей среды *MULTISIM* для компьютерного моделирования работы схем

Практически все изучаемые в рамках курса схемы могут быть успешно смоделированы с помощью современных средств компьютерного моделирования. Одно из самых известных средств для этой цели - это программные продукты компании **Electronic Workbench**. На 2008 год продается 10-я версия программы **Multisim**. Ниже мы рассмотрим основы использования 9-й версии, как более распространенной.

Вид основного интерактивного окна программы показан на рисунке 1. Основную площадь окна занимает поле, на котором пользователь конструирует схему, используя набор виртуальных электронных элементов и средства, которые предоставляют различные меню программы. Создание и тестирование электронной схемы в среде Multisim включает несколько последовательных шагов.

Шаг 1. Запуск программы и создание пустой схемы (или выбор существующей в качестве шаблона с помощью меню "File").

Шаг 2. Выбор и размещение необходимых электронных элементов.

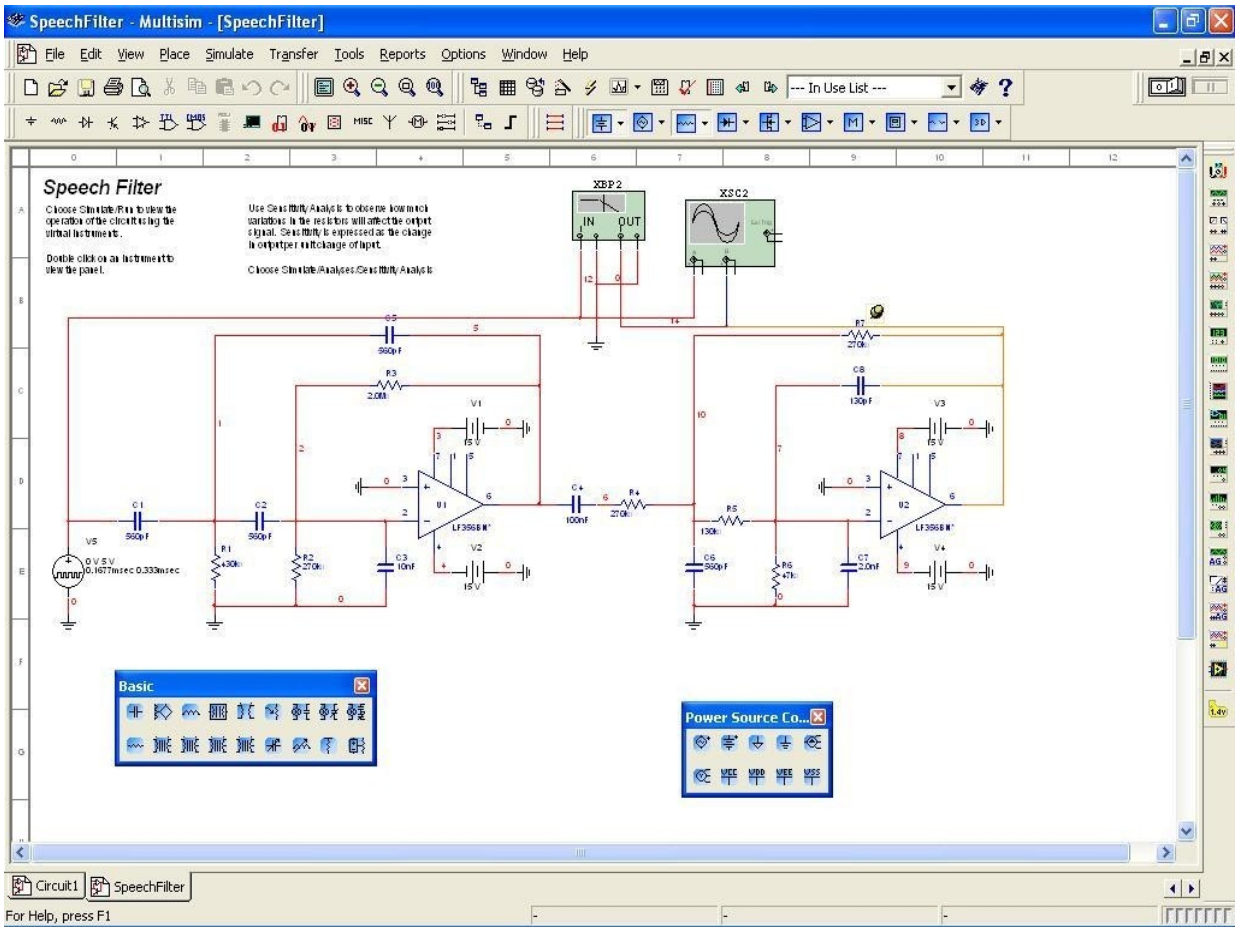


Рисунок 1. Интерфейс программы Multisim.

В Multisim различают реальные и виртуальные электронные компоненты. Первые - это по возможности точные аналоги настоящих элементов. Вторые - это идеализированный компьютерный образ. Например, виртуальному резистору или конденсатору можно присвоить любое значение сопротивления или емкости, тогда как "в физическом мире" и резисторы и конденсаторы выпускаются в рамках определенной шкалы номиналов. Виртуальные компоненты удобнее при изучении, разработке и тестировании схем, тогда как реальные - полезны при макетировании, когда по результатам программных проверок должно быть спаяно физическое устройство. Кроме того, часть схемных элементов Multisim интерактивна, то есть способна реагировать на действия пользователя.

Выбрать и разместить в окне разработки нужный элемент просто: для этого нужно найти его в одном из меню *Components Browser* вверху окна разработки. После двойного щелчка мышью курсор принимает форму схемного элемента. После выбора нужного места в окне разработки, компонент размещается кликом мыши. При установке компоненты можно поворачивать.

Шаг 3. Соединение компонентов схемы виртуальными проводами и кабелями. В Multisim используется так называемый безрежимный принцип работы: назначение кнопок мыши зависит от положения курсора. Когда курсор расположен над разъемом или выводом компонента, левым щелчком мыши можно присоединиться к нему и начать прокладку провода. Доведя курсор до нужного места - можно присоединиться к нему опять-таки кликом мыши. Присоединяться можно и к проводу.

Другой способ соединения заключается в размещении элемента так, чтобы его разьемы касались существующих соединений, или наложить элемент (например, резистор) на существующий провод - он автоматически включится в него.

Шаг 4. Выбрать и разместить виртуальные измерительные приборы. Как правило, для тестирования и демонстрации работы реальных схем требуются источники питания, генераторы сигналов различной формы и измерительная аппаратура, которая в зависимости от сложности задачи может включать как просто мультиметр или осциллограф, так и специализированные измерители (например, анализатор спектра). В Multisim есть как абстрактные измерительные приборы, так и имитация конкретной аппаратуры известных фирм. Для разработки и тестирования схем достаточно и первых. Приборы второго типа удобны при имитации лабораторной работы с аппаратурой, или если вы к ним привыкли в реальном мире.

Часто используемый набор приборов включает:

1. Мультиметр. Он предназначен для измерения переменного или постоянного тока или напряжения, сопротивления или затухания между двумя узлами схемы.

Диапазон измерений мультиметра подбирается автоматически. Его внутреннее сопротивление и ток близки к идеальным значениям, но их можно изменить.

2. Генератор сигналов (function generator). Это источник напряжения, который может генерировать синусоидальные, пилообразные и прямоугольные импульсы. Можно изменить форму сигнала, его частоту, амплитуду, коэффициент заполнения и постоянный сдвиг. Диапазон генератора достаточен, чтобы воспроизвести сигналы с частотами от нескольких герц до аудио- и радиочастотных. У генератора сигналов есть три терминала источника импульсов. Общий центральный терминал определяет положение нуля.

3. Осциллографы. В Multisim имеются различные модификации осциллографов с различной степенью сходства с настоящими. Они позволяют устанавливать параметры развертки и входного напряжения, выбирать тип и уровень синхронизации запуска.

4. Анализатор спектра. Этот прибор полезен при анализе спектрального состава сигнала или при оценке степени нелинейных искажений, вносимых устройством.

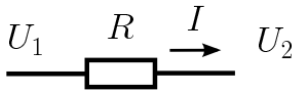
В набор программных средств Multisim входят и другие приборы.

Шаг 5. Эмуляция работы схемы. Собрав схему и подсоединив необходимые измерительные приборы, можно включить виртуальный выключатель питания и анализировать результаты.

Описанные выше 5 шагов дают дишь самое общее представление о работе с Multisim. Для использования всего разнообразия предоставляемых возможностей необходимо изучать руководство к программе и активно экспериментировать: в отличие от реальной жизни, замена сгоревшего виртуального операционного усилителя или светодиода здесь ничего не стоит!

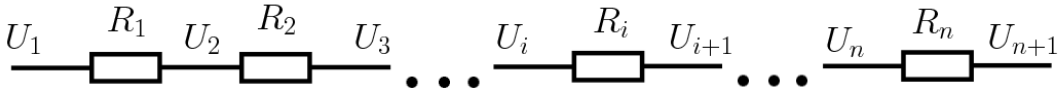
НЕКОТОРЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Закон Ома для участка цепи



$$\Delta U = U_1 - U_2$$
$$I = \Delta U / R = \sigma \Delta U$$
$$\sigma = 1/R$$

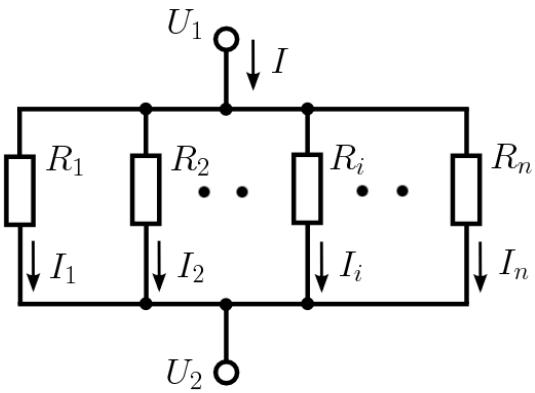
Последовательное соединение сопротивлений



$$U_i - U_{i+1} = R_i I$$
$$\sum_{i=1}^{n} (U_i - U_{i+1}) = U_1 - U_n = I \sum_{i=1}^{n} R_i$$

$$R_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} R_i$$

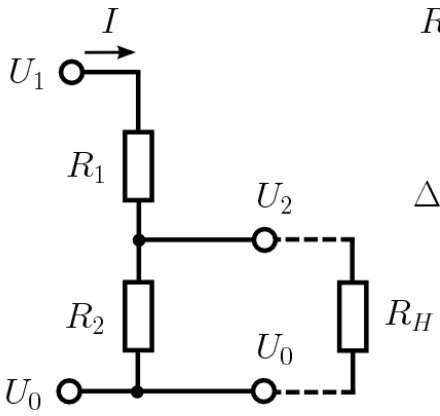
Параллельное соединение сопротивлений



$$\sigma_i = \frac{1}{R_i}$$
$$I_i = \sigma_i (U_1 - U_2)$$

$$I = \sum_{i=1}^{n} I_i = (U_1 - U_2) \sum_{i=1}^{n} \sigma_i$$
$$\sigma_\Sigma = \frac{1}{R_\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} \sigma_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}$$

Делитель напряжения



$$R_H = \infty, \quad \Delta U_1 = U_1 - U_0 \quad \Delta U_2 = U_2 - U_0$$

$$I = \Delta U_1/(R_1 + R_2) \qquad (a)$$

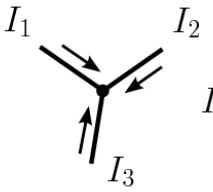
$$\Delta U_2 = R_2 I = \frac{R_2}{R_1 + R_2}\Delta U_1 = \frac{1}{1 + R_1/R_2}\Delta U_1$$

$$R_H \neq \infty, \quad R_{2||H} = \frac{R_2\, R_H}{R_2 + R_H}$$

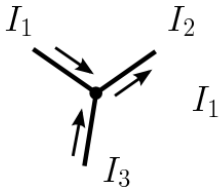
$$I = \Delta U_1/(R_1 + R_{2||H}) \qquad (b)$$

$$\Delta U_2 = R_{2||H}\, I = \frac{1}{1 + R_1/R_2 + R_1/R_H}\Delta U_1$$

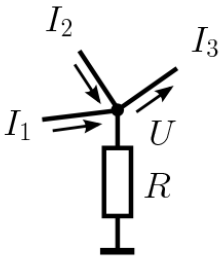
Законы Кирхгофа



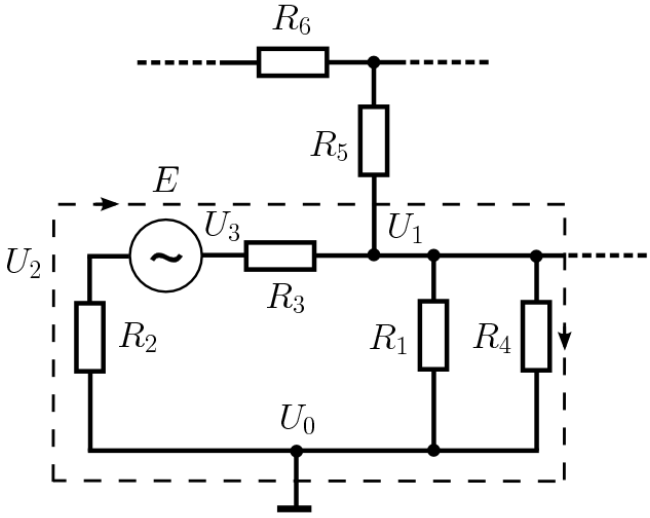
$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$



$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$



$$U = R(I_1 + I_2 - I_3)$$



$$(U_1 - U_0) + (U_0 - U_2) + (U_2 - U_3) + (U_3 - U_1) = 0$$

Реактивные элементы и закон Ома в комплексной форме

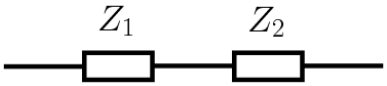
$$X_C = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}$$

$$|X_C| = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$X_L = j\omega L$$

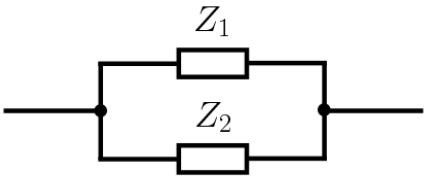
$$|X_L| = \omega L = 2\pi f L$$

$\bar{U} \quad \bar{I} \quad Z = \{X_C, X_L, R\}$



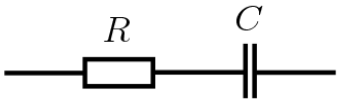
$$Z_\Sigma = Z_1 + Z_2$$

$$\bar{U} = Z\bar{I}$$



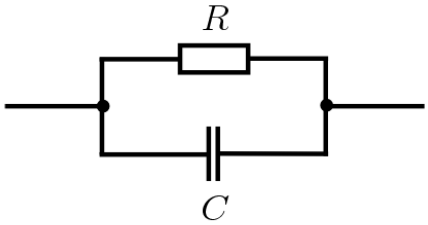
$$Z_{||} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Модуль сопротивления реактивных элементов на разных частотах

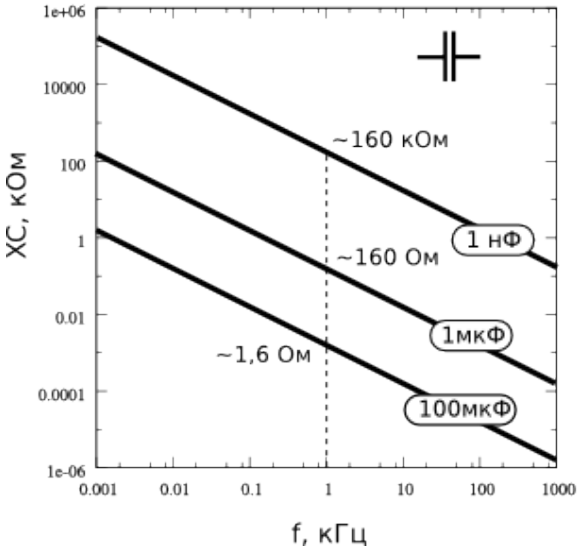


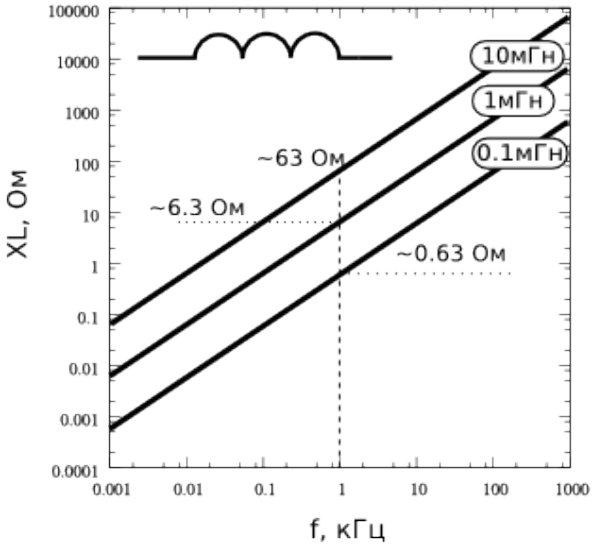
$$|Z| = \sqrt{R^2 + |X_C|^2}$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + |X_L|^2}$$



$$|Z| = \frac{R|X_C|}{\sqrt{R^2 + |X_C|^2}}$$

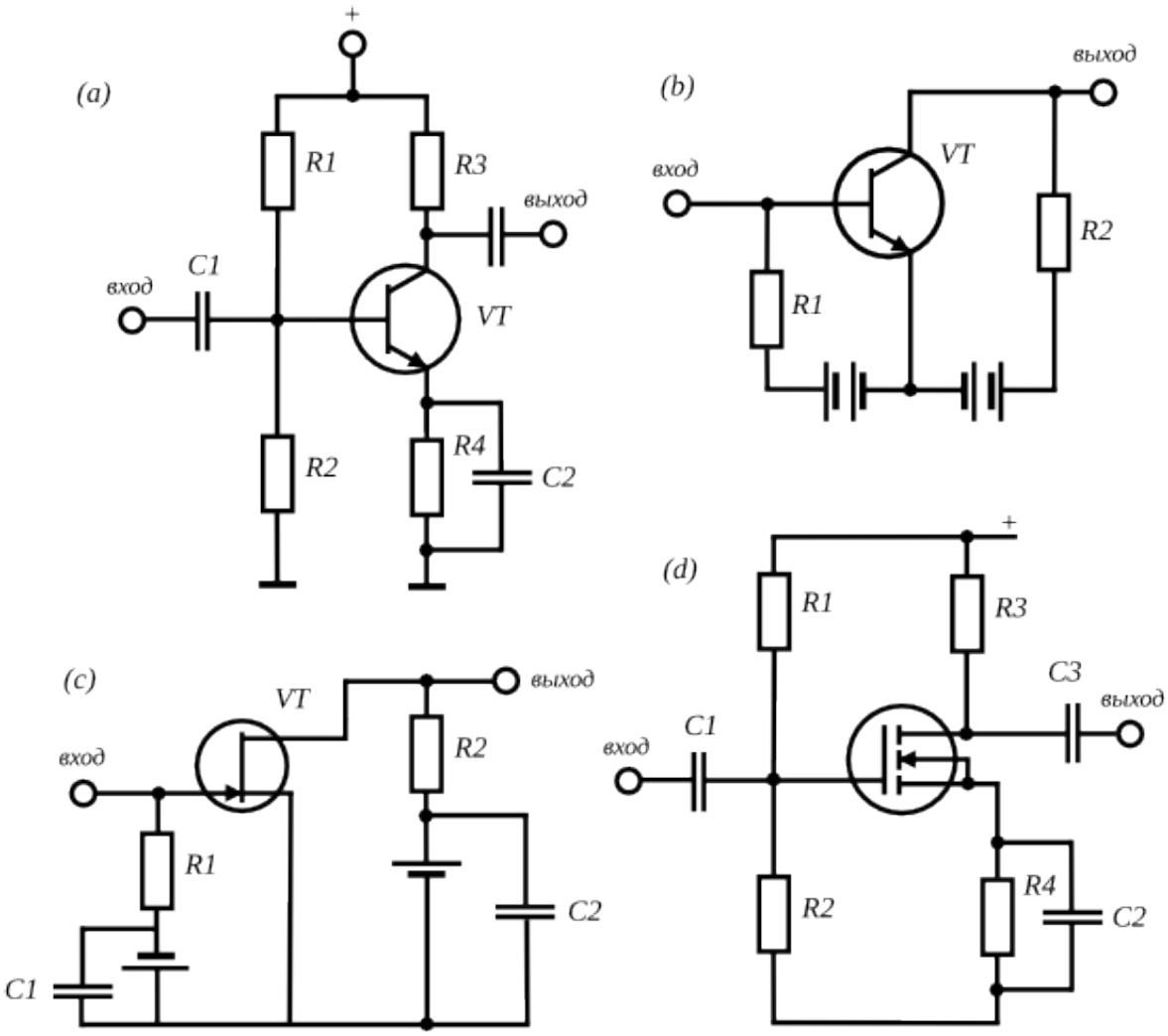

1e+06
10000
100
1
0.01
0.0001
1e-06
XC, кОм
~160 кОм
~160 Ом
~1,6 Ом
1 нФ
1мкФ
100мкФ
0.001
0.01
0.1
1
10
100
1000
f, кГц


100000
10000
1000
100
10
1
0.1
0.01
0.001
0.0001
XL, Ом
10мГн
1мГн
0.1мГн
~63 Ом
~6.3 Ом
~0.63 Ом
0.001
0.01
0.1
1
10
100
1000
f, кГц

Для заметок

РАЗДЕЛ 1
СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ БИПОЛЯРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Для заметок



Для заметок

Схема 1.1 (слева)	Типовые схемы включения биполярных и полевых транзисторов (a) – биполярный транзистор, схема с общим эмиттером (б) - биполярный транзистор, упрощенная схема ОЭ с отдельным источником смещения (c) – полевой транзистор с *pn*-переходом, схема с общим истоком (d) – полевой транзистор с изолированным затвором, схема с общим истоком

Контрольные вопросы	
1	Что понимают под терминами "инжекция" и "экстракция" применительно к *pn*-переходу? Где это имеет место в биполярном транзисторе?
2	Каков типичный коэффициент передачи тока при включении биполярного транзистора по схеме с общим эмиттером?
3	Чем определяется рабочая полярность напряжения затвора у полевого транзистора?
4	Каково назначение резисторов R1 и R2 в схеме (a)?

Биполярные и полевые транзисторы

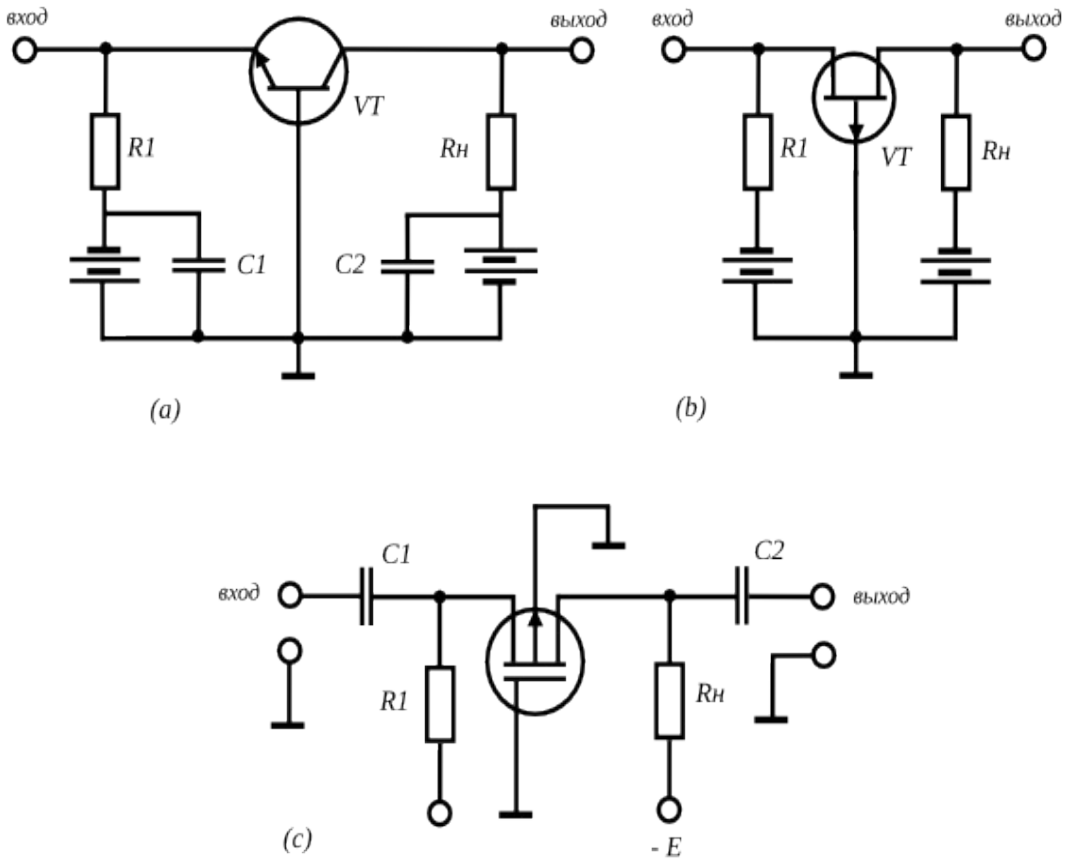


Схема 1.2	Типовые схемы включения биполярных и полевых транзисторов (a) – биполярный транзистор, схема с общей базой (б) – полевой транзистор с *pn*-переходом, схема с общим затвором (d) – полевой транзистор с изолированным затвором, усилитель переменного тока по схеме с общим истоком
Контрольные вопросы	
1	Чем определяется коэффициент усиления схем (a), (b) и (c) по току и по напряжению ?
2	Для чего служит резистор R1 во всех трех схемах? Какова должны быть его величина?
3	Какова роль конденсаторов C1 и C2 в схеме (a) ?
4	Какова роль конденсаторов C1 и C2 в схеме (c) ?

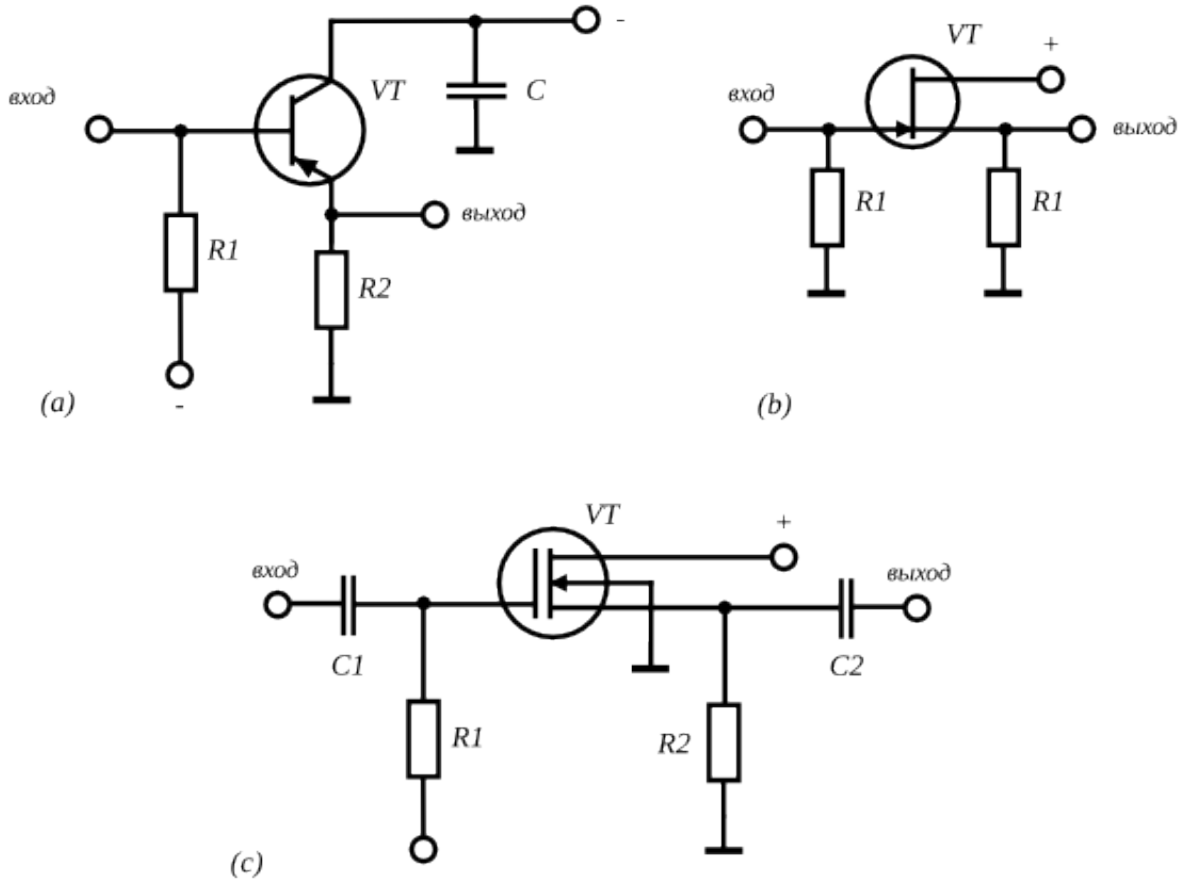


Схема 1.3	Типовые схемы включения биполярных и полевых транзисторов (а) – биполярный транзистор, схема с общим коллектором (эмиттерный повторитель) (б) – полевой транзистор с pn-переходом, схема с общим стоком (с) – полевой транзистор с изолированным затвором, схема с общим стоком
Контрольные вопросы	
1	Как связаны ток через R2 и ток базы транзистора в схеме (а) ?
2	Чем определяется величина коэффициента усиления по напряжению в схемах рисунка ?
3	Каково выходное сопротивление представленных схем ? Дайте объяснение.
4	Каково назначение конденсаторов C1 и C2, а также резисторов R1, R2 в схеме ?

Биполярные и полевые транзисторы

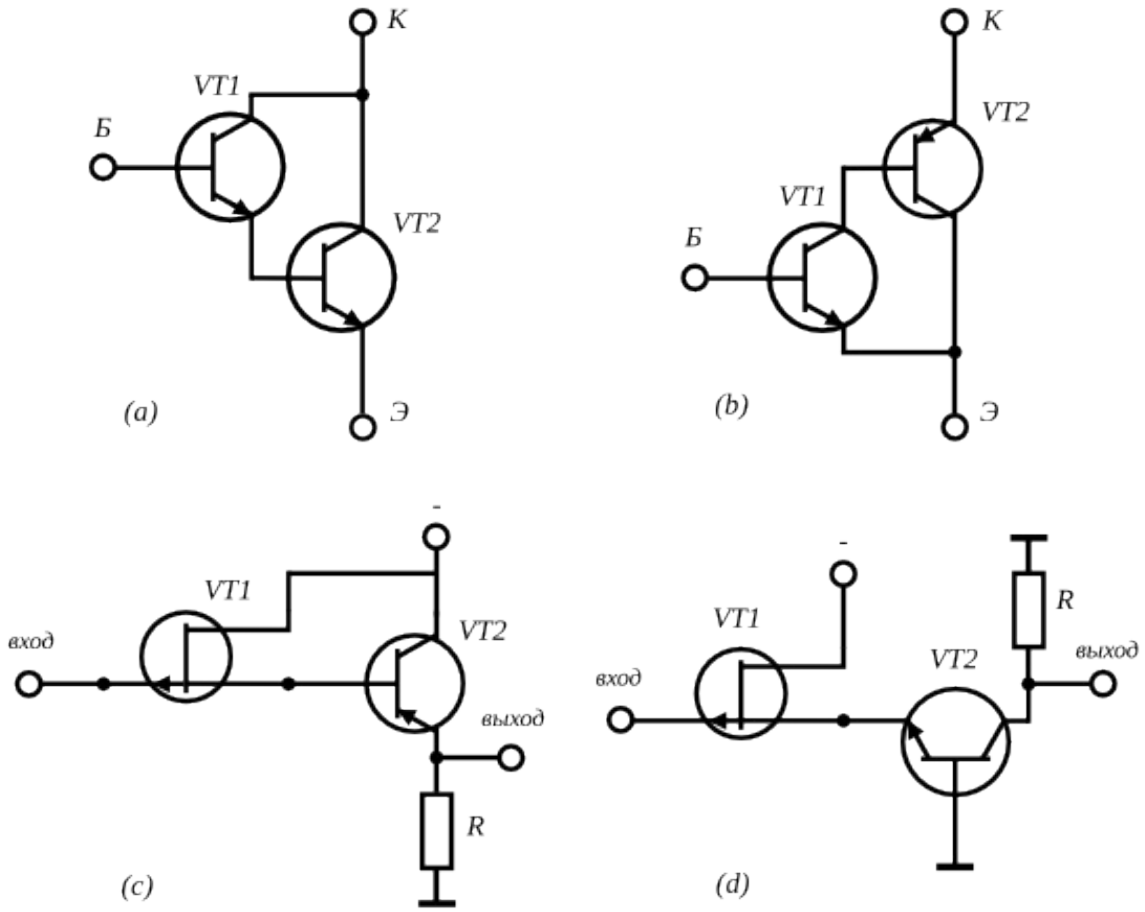
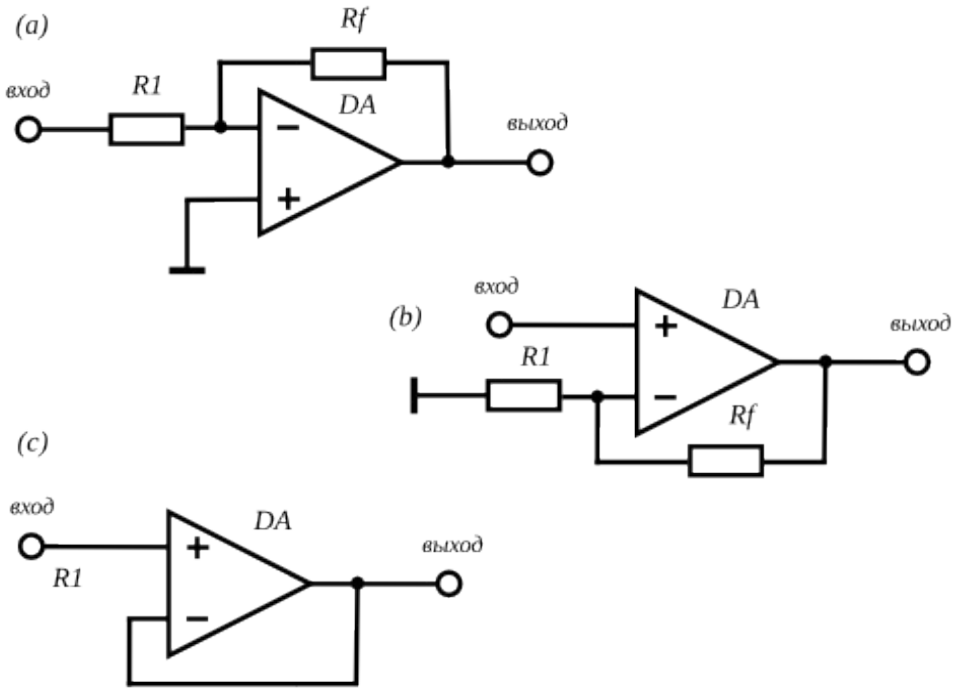


Схема 1.4	Схемы включения составных транзисторов (a) - схема Дарлингтона; (b) - схема Шиклаи; (c) - двойной повторитель: каскад с общим истоком, нагруженный на эмиттерный повторитель; (d) - истоковый повторитель со схемой ОБ в качестве нагрузки
Контрольные вопросы и задания	
1	Каков коэффициент передачи тока составного транзистора (a) при включении по схеме ОЭ ?
2	Объясните различие схем (a) и (b) с точки зрения их характеристик.
3	Имеется ли обратная связь в усилительном каскаде (c) ? Каков коэффициент усиления такого каскада по току и по напряженю ?
4	Рассчитайте коэффициент усиления по напряжению схемы (d).

Для заметок

РАЗДЕЛ 2
ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Для заметок



Для заметок

Схема 2.1	Типовые схемы включения операционного усилителя (ОУ) (a) – инвертирующее включение; (b) – неинвертирующее включение; (c) – повторитель на ОУ

Контрольные вопросы и задания	
1	Что такое дифференциальное напряжение операционного усилителя?
2	Какие соотношения включают модель идеального ОУ в линейном режиме ?
3	Выведите формулу для коэффициента усиления по напряжению схемы (a). Каков физический смысл знака "-" в полученном результате ?
4	Выведите формулу для коэффициента усиления по напряжению схемы (b). В каком соотношении находятся характеристики схем (b) и (c) ?

Схемы на ОУ

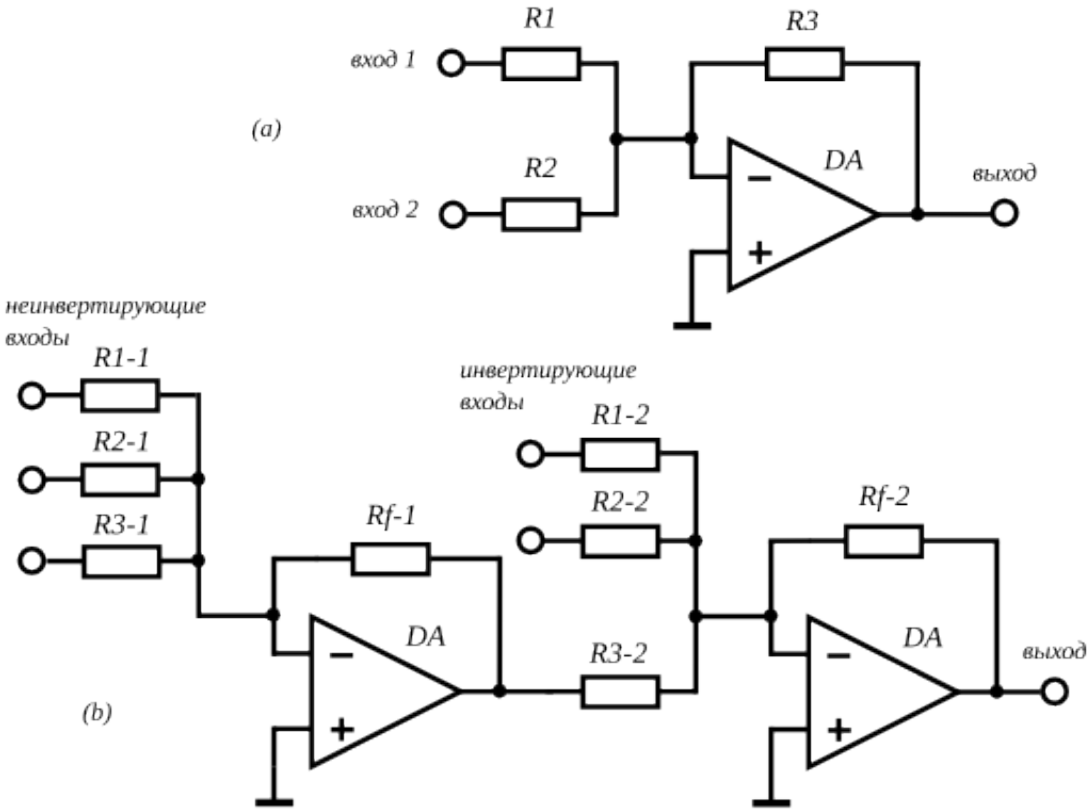


Схема 2.2	Схемы сумматоров входных сигналов на операционных усилителях (a) – двухвходовый инвертирующий сумматор; (b) – составной сумматор с тремя неинвертирующими и двумя инвертирующими входами.
Контрольные вопросы и задания	
1	Каковы 1) потенциал и 2) баланс токов в точке соединения R1, R2 и R3 схемы (a)?
2	Каков эффект от последовательного включения суммирующих каскадов по схеме (b)?
3	Рассчитайте коэффициент усиления схемы (b) относительно среднего из неинвертирующих входов.
4	Что произойдет, если выбрать R1-1 = R1-2 и подать на соответствующие входы сумматора (b) одинаковое напряжение?

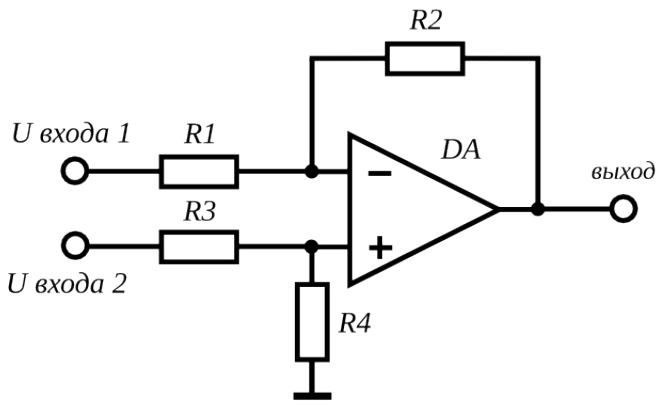


Схема 2.3	Схема дифференциального усилителя на ОУ
Контрольные вопросы и задания	
1	Какова разность потенциалов между точками соединения R1, R2 и R3, R4 ?
2	Каков будет коэффициент усиления схемы по второму входу, если первый вход (вывод резистора R1) заземлить?
3	Сопоставьте входное сопротивление схемы по первому и второму входам. При каких условиях оно будет одинаковым ?
4	Как изменятся свойства схемы, если удалить из нее R4?

Для заметок

Схемы на ОУ

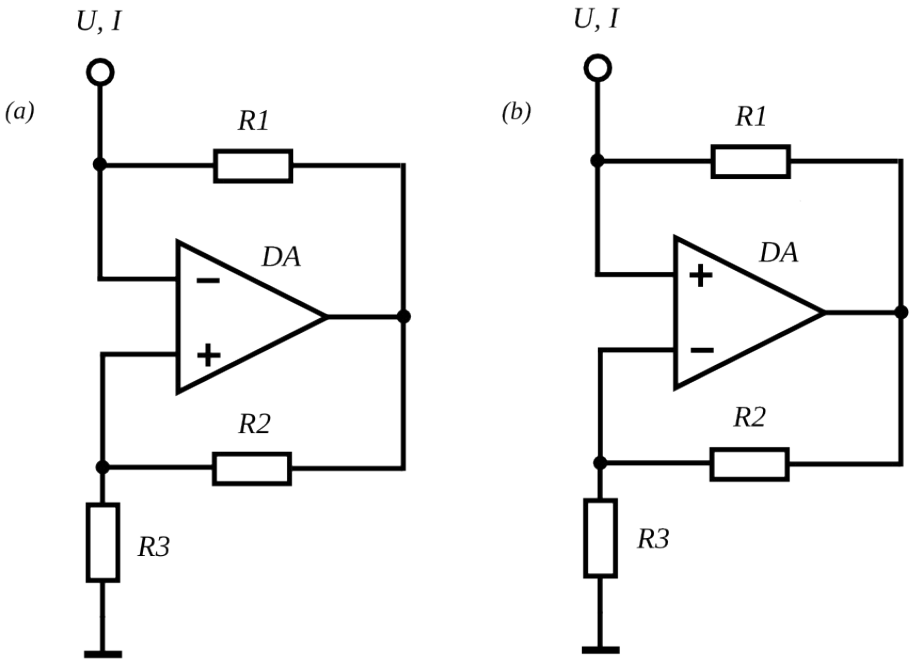


Схема 2.4	Схемы конвертеров сопротивления на ОУ. (a) – с кусочно-линейной характеристикой S-типа; (b) – с кусочно-линейной характеристикой N-типа;
Контрольные вопросы и задания	
1	Каков общий алгоритм анализа работы схемы на ОУ в нелинейном режиме?
2	Получите самостоятельно выражения для всех сегментов вольтамперных характеристик схем (a) и (b). В чем их различие?
3	Чем различаются свойства центрального сегмента вольтамперной характеристики при физической реализации схем (a) и (b)? Какие факты не учитывает модель идеального ОУ?
4	Рассчитайте характеристику для параллельно включенных конвертеров (a) и (b).

Для заметок

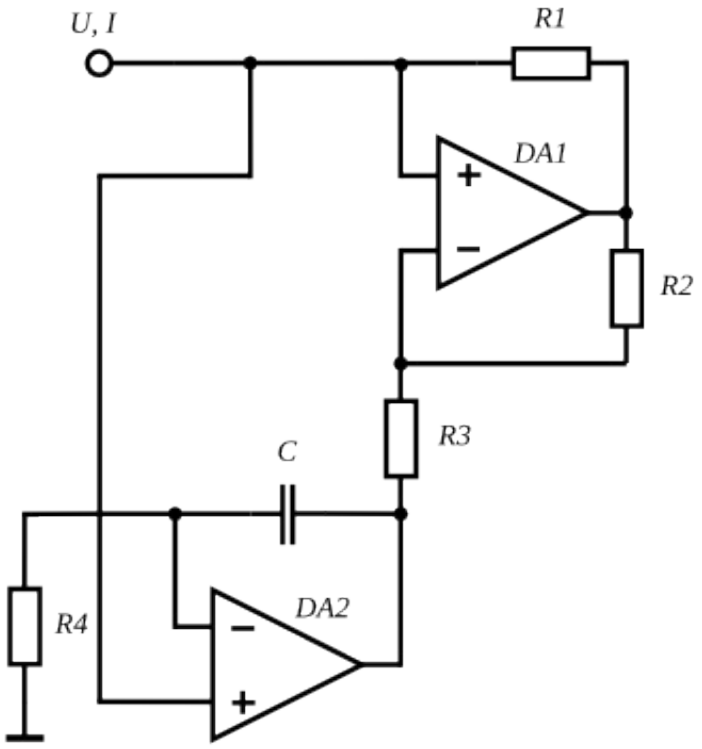


Схема 2.5	Схема гиратора на ОУ.
Контрольные вопросы	
1	Что означает термин "преобразователь отрицательных полных сопротивлений"?
2	Каково назначение DA1 и резисторов R1, R2, R3 на схеме ?
3	Каков потенциал в точке соединения конденсатора C и резистора R4?
4	Свойства какого радиотехнического элемента имитирует данная схема и в каком диапазоне входных напряжений?

Для заметок

Схемы на ОУ

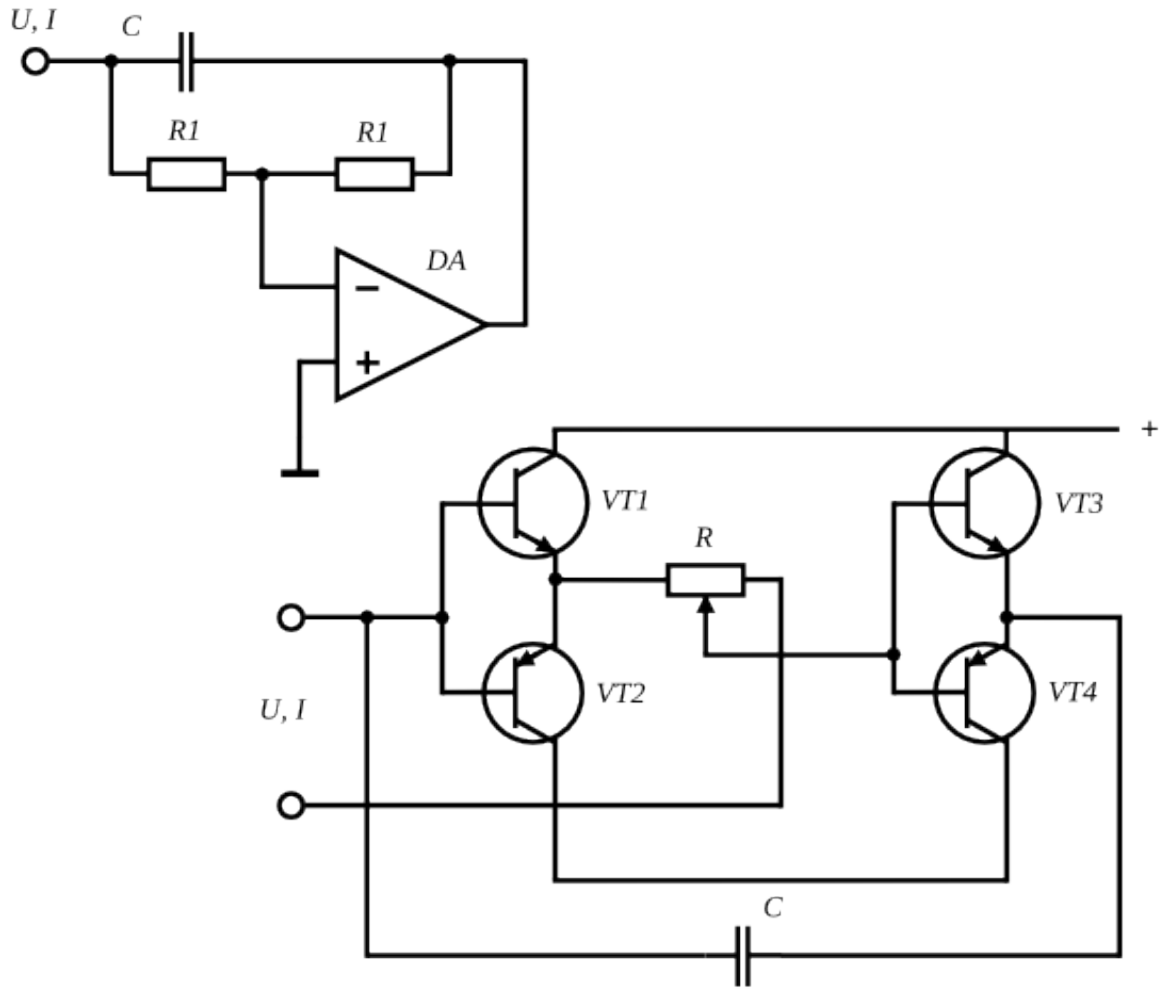


Схема 2.6	Схемы- электронные эквиваленты емкости (a) - на операционном усилителе (b) - на сдвоенных эмиттерных повторителях с применением биполярных транзисторов
Контрольные вопросы	
1	Каков потенциал в точке соединения конденсатора C и резистора R1 схемы (a)?
2	Как изменить схему (a), чтобы получить уменьшение эквивалентой емкости?
3	Для чего транзисторы на схеме (b) включены комплиментарными парами?
4	В какую сторону (по схеме) нужно сдвинуть движок резистора R схемы (b), чтобы эквивалентная емкость уменьшилась?

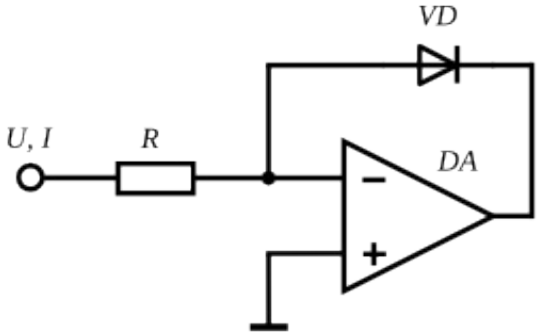


Схема 2.7	Линейный выпрямитель на ОУ
Контрольные вопросы и задания	
1	Получите расчетное соотношение, характеризующее работу схемы.
2	Как ток, протекающий через диод, зависит от напряжения на выходе?
3	Постройте вольтамперную характеристику данного устройства как двухполюсника.
4	В каких пределах изменения входного напряжения справедливы полученные соотношения?

Для заметок

РАЗДЕЛ 3
СХЕМЫ ИСТОЧНИКОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

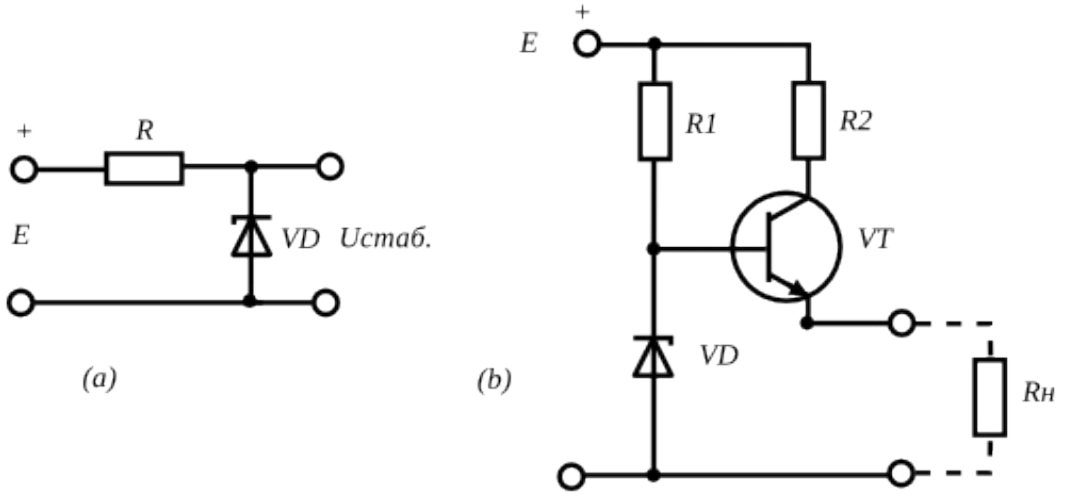


Схема 3.1	Схемы источников напряжения с использованием диодов-стабилитронов (a)—простейшая схема, состоящая из резистора и стабилитрона; (b)—усовершенствованная схема с выходным эмиттерным повторителем
Контрольные вопросы	
1	Чем определяется напряжение на выходе схемы (a)?
2	Чем определяется допустимый диапазон изменения сопротивления нагрузки схемы (a) при условии сохранения стабильности напряжения на выходе?
3	Из каких соображений выбираются значения резисторов R1 и R2 на схеме (b)?
4	По какой схеме включен транзистор на схеме (b)? Что этим достигается?

Для заметок

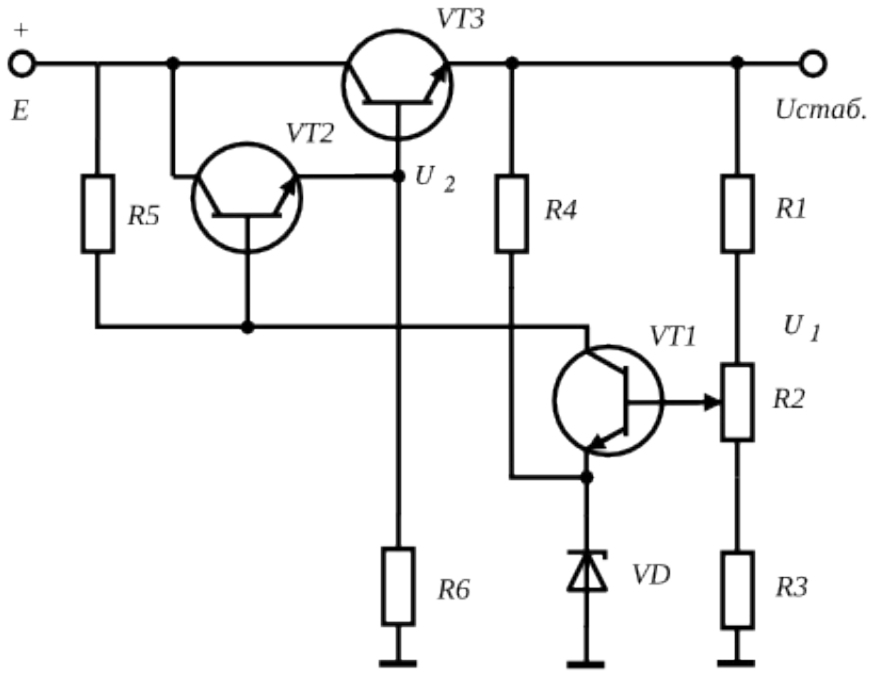


Схема 3.2	Практическая схема стабилизированного источника напряжения с контролем выходного напряжения и усилением тока.
Контрольные вопросы	
1	Каково назначение каскада на транзисторе VT1? Чем определяется его ток коллектора?
2	По какой схеме включен транзистор VT2? Его назначение?
3	По какой схеме включен транзистор VT3? Чем определяется его ток при отсутствии внешней нагрузки?
4	Как предусмотреть в данной схеме защиту от короткого замыкания на выходе?

Для заметок

Источники тока и напряжения

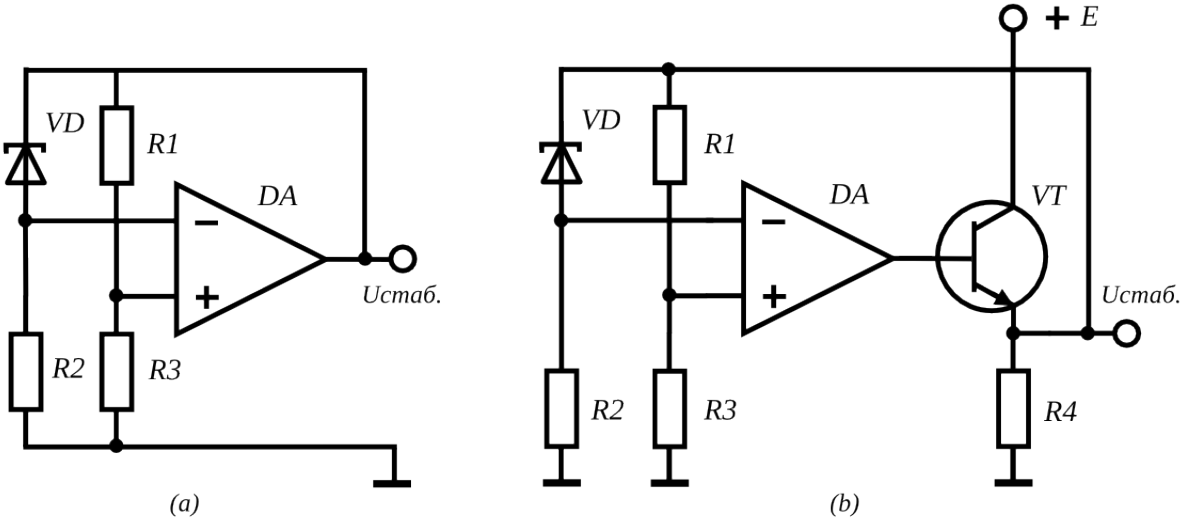


Схема 3.3	Схемы стабилизированных источников напряжения на ОУ (a)—базовая схема, сравнивающая опорное и выходное напряжения; (b)—улучшенная схема с увеличенным выходным током
Контрольные вопросы и задания	
1	Каков потенциал в точке соединения стабилитрона и R2 схемы (a)?
2	Рассчитайте самостоятельно зависимость выходного напряжения схемы (a) от величины R1.
3	Почему сигнал обратной связи в схеме (b) берется с эмиттера транзистора VT, а не с выхода операционного усилителя DA?
4	Оцените величину выходного сопротивления схемы (b).

Для заметок

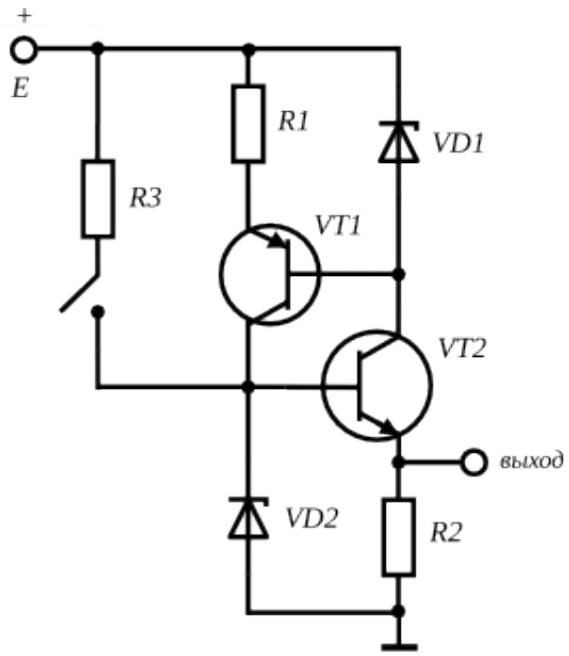


Схема 3.4	Кольцевая схема стабилизатора напряжения на паре комплиментарных биполярных транзисторов
Контрольные вопросы и задания	
1	Чем определяется коллекторный ток транзиторов VT1 и VT2 ?
2	Каково назначение цепи, состоящей из резистора R3 и ключа?
3	Как характеристики работы схемы зависят от степени идентичности параметров транзисторов и резисторов?
4	Предложите способы изменения выходного напряжения данной схемы.

Для заметок

Источники тока и напряжения

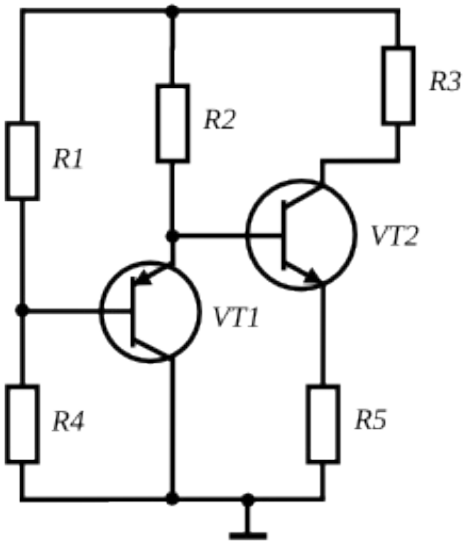


Схема 3.5	Упрощенная схема источника тока на биполярных транзисторах в виде двух каскадов с общим эмиттером.
Контрольные вопросы	
1	Что такое эффект Эрли и какое отношение он имеет к работе данной схемы?
2	Чем определяется потенциал на базе транзистора VT2?
3	Как рассчитать ток через резистор R3?
4	Как изменится стабильность данного источника тока, если из схемы исключить R5?

Для заметок

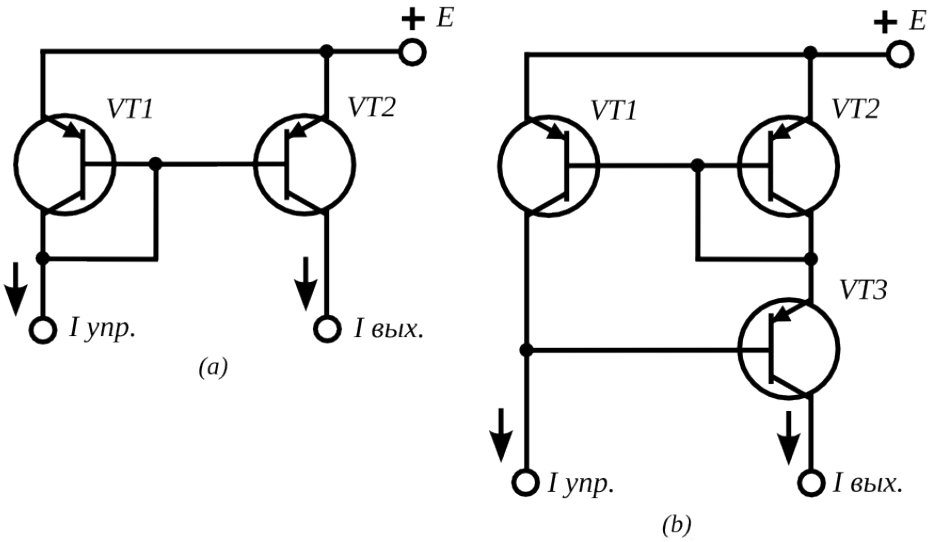


Схема 3.6	Схемы токовых зеркал (a)-- базовая схема; (b)-- токовое зеркало Уилсона.
Контрольные вопросы и задания	
1	Поясните принцип работы схемы (a). Какова точность "отражения" тока ?
2	Предложите варианты схем для задания управляющего тока зеркала.
3	Поясните отличия принципа работы токового зеркала Уилсона от классической схемы.
4	Имея в наличии пару транзисторов на одном кристале и один - отдельно, на какие места в токовом зеркале Уилсона вы их поставите?

Для заметок

Источники тока и напряжения

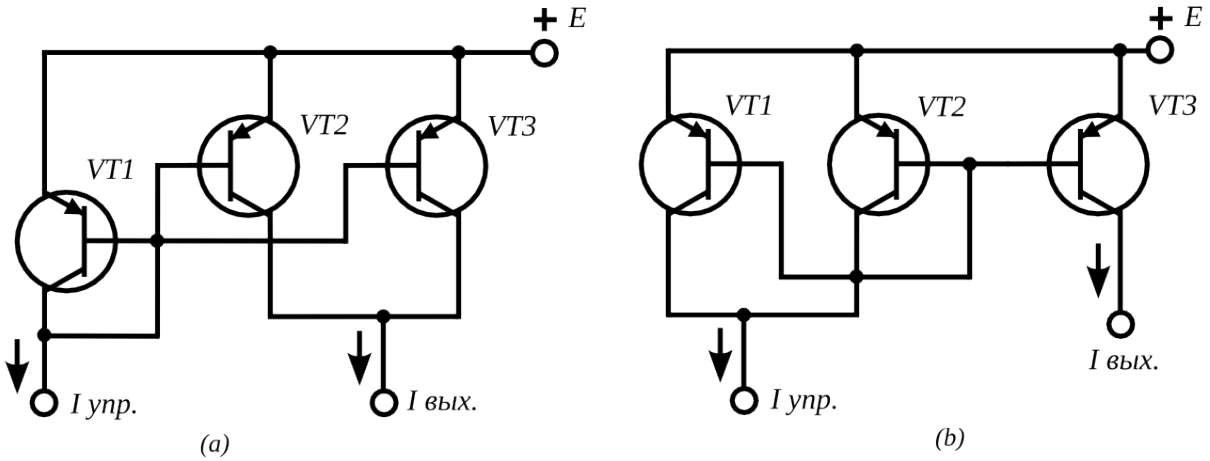


Схема 3.7	Схемы токовых зеркал (a)-- схема с удвоением тока; (b)-- схема с делением тока пополам.
Контрольные вопросы и задания	
1	Чем определяется число транзисторов, которые можно включить параллельно по схеме (a)?
2	Предложите вариант схемы (a), увеличивающий управляющий ток в 1,5 раза.
3	Как использовать токовое зеркало в качестве нагрузки усилительного каскада?
4	Получите расчетные соотношения для простейшего токового зеркала с использованием закона Эберса-Молла.

Для заметок

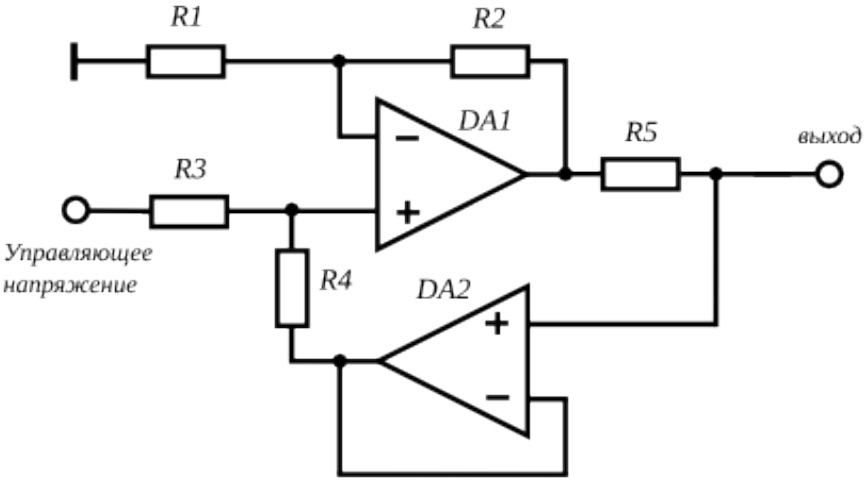
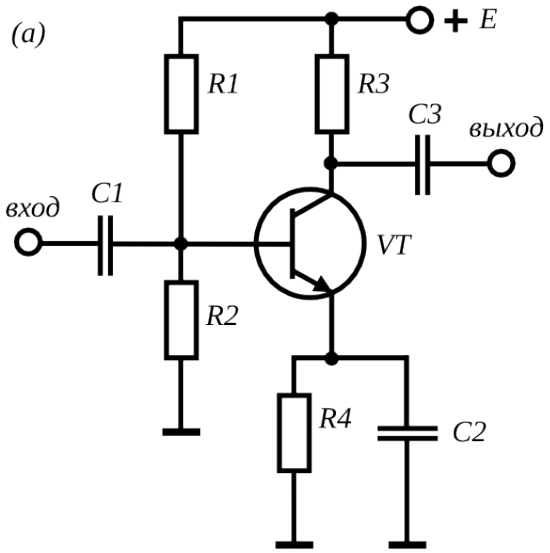


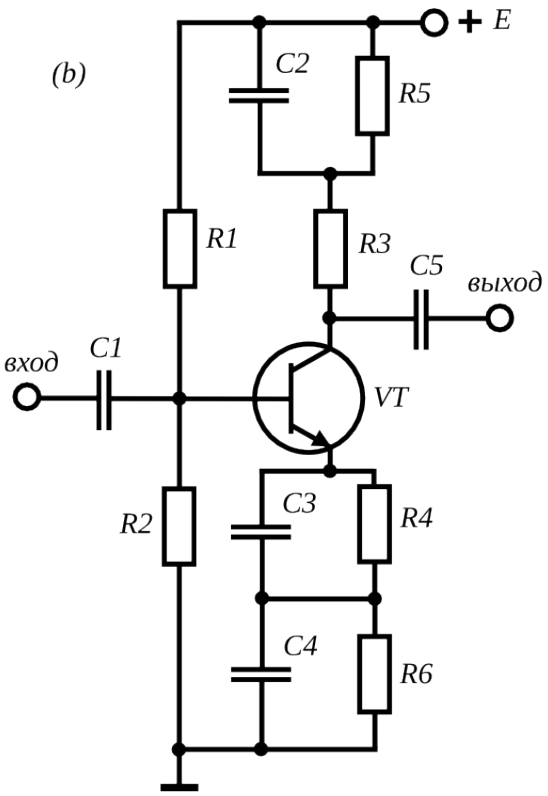
Схема 3.8	Кольцевая схема источника тока на ОУ
Контрольные вопросы и задания	
1	По какой схеме включен операционный усилитель DA1?
2	Для чего используется сопротивление R5? Какова должна быть его величина?
3	Что произойдет, если исключить из схемы сопротивление R4?
4	Получите самостоятельно расчетное соотношение для выходного напряжения в зависимости от выходного тока схемы.

Для заметок

РАЗДЕЛ 4
УСИЛИТЕЛИ

Для заметок





Для заметок

Схема 4.1 (слева)	Усилительные каскады с общим эмиттером (a)—базовая схема каскада усиления переменного тока по схеме с общим эмиттером; (b)—схема каскада с цепями коррекциии усиления со стороны эмиттера и коллектора.
Контрольные вопросы	
1	Какую роль играют конденсаторы C1 и C3 в схеме (a)?
2	Каково назначение цепочки R4, C2?
3	Чем определяется амплитудно-частотная характеристика схемы (b) в области низших частот?
4	Чем определяется амплитудно-частотная характеристика схемы (b) в области высших частот?

Усилители

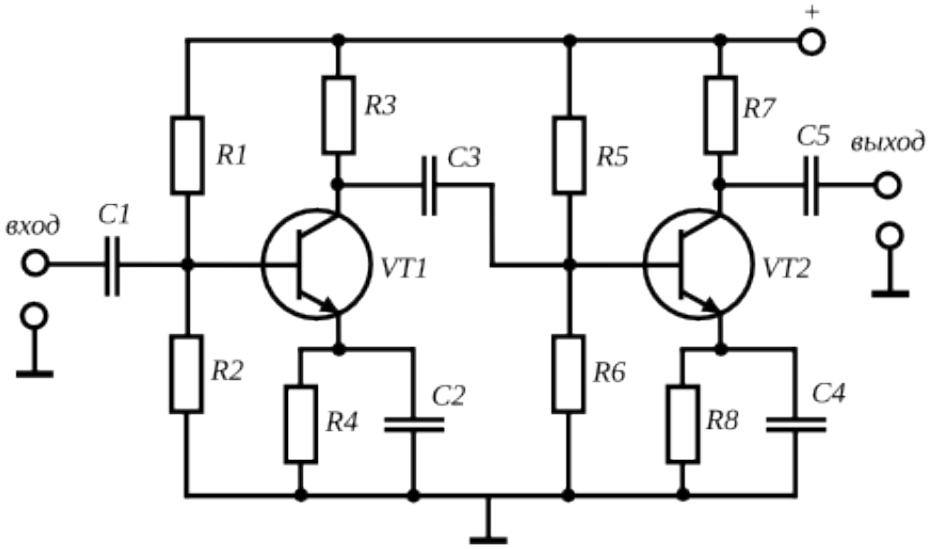


Схема 4.2	Схема двухкаскадного усилителя по схеме с общим эмиттером
Контрольные вопросы	
1	Каково назначение конденсатора C3 в схеме?
2	Каков общий коэффициент усиления схемы на высших частотах?
3	Какой выбрать емкость конденсаторов C2 и C4, если усилитель должен работать на частоте 1МГц? Считать, что R4 и R8 имеют сопротивление 1кОм.
4	Оцените максимальную амплитуду входного сигнала при напряжении питания 15В, R3=R7=15кОм, R4=0.5кОм, R8=2кОм, C2=C4=10пФ, а частота сигнала равна 1МГц.

Для заметок

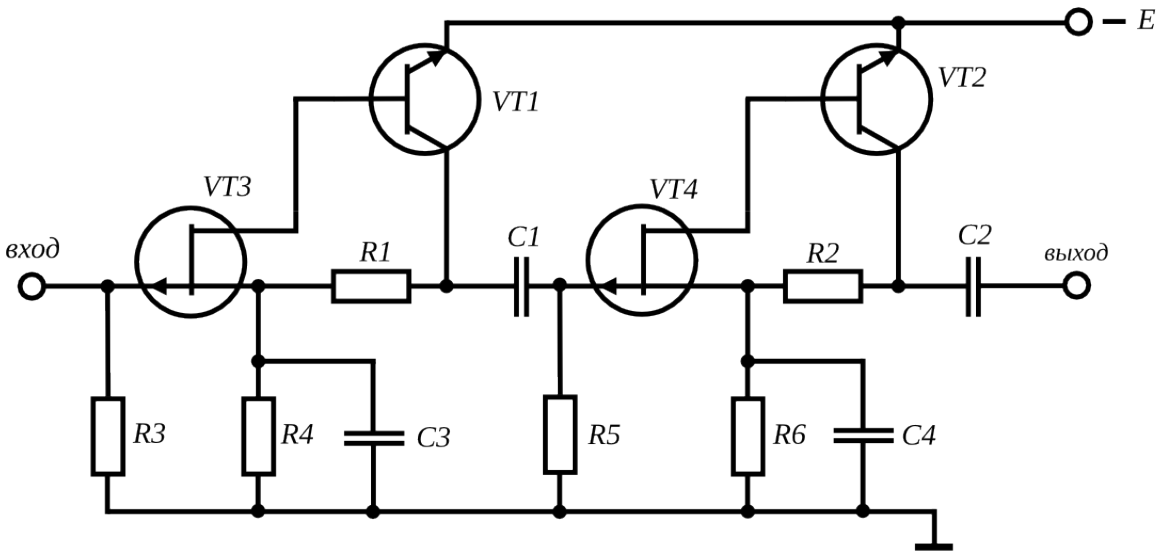


Схема 4.3	Схема двухкаскадного усилителя на составных парах транзисторов
Контрольные вопросы и задания	
1	Каково включение биполярных транзисторов в схеме (ОБ, ОЭ, ОК) ? А полевых?
2	Каково назначение резисторов R1 и R2?
3	Какую функцию выполняют конденсаторы С3 и С4 ?
4	Охарактеризуйте преимущества такой схемы усилителя перед традиционной.

Для заметок

Усилители

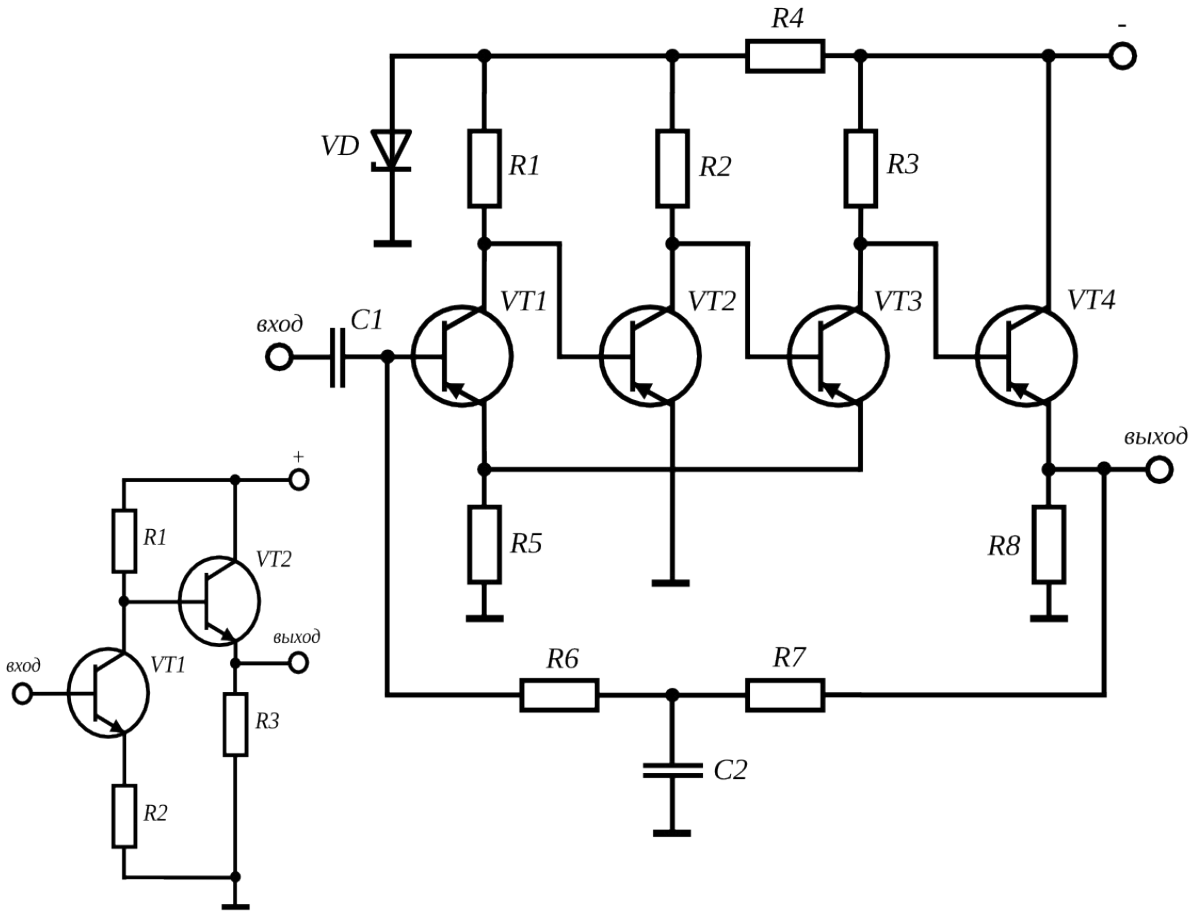


Схема 4.4	Четырехкаскадный усилитель с гальванической связью транзисторов и дополнительными цепями обратной связи. Слева внизу: к вопросу о гальванической межкаскадной связи.

Контрольные вопросы и задания	
1	Чем определяется рабочая точка транзистора при гальванической связи каскадов?
2	Каков смысл соединения эмиттеров VT3 и VT1?
3	Какую функцию выполняют резистор R4 и стабилитрон VD?
4	Каково влияние на характеристики усилителя цепи R6, R7, C2 ?

Для заметок

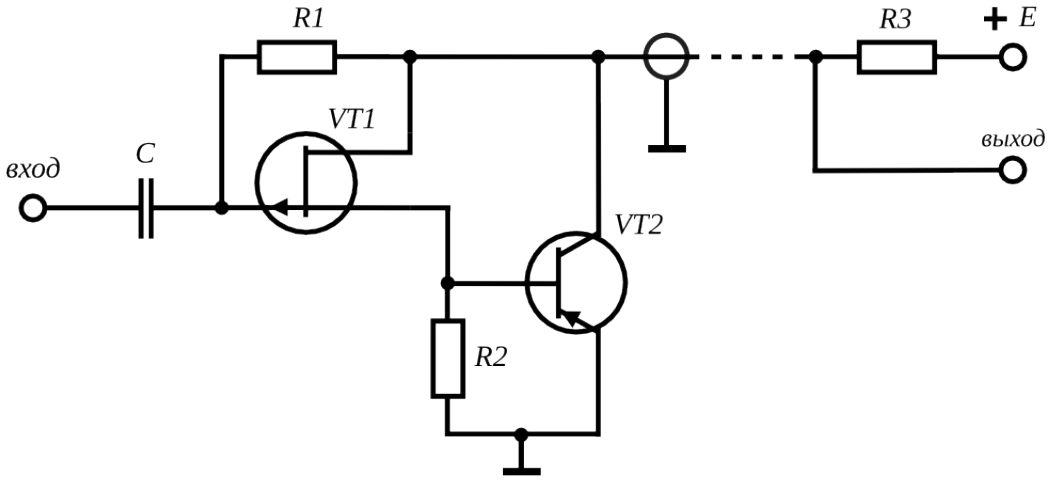


Схема 4.5	Микрофонный усилитель с передачей сигнала и напряжения питания по одному экранированному проводу.
Контрольные вопросы и задания	
1	Каковы типичные характеристики электретных и пъезоэлектрических микрофонов?
2	Рассчитайте коэффициент усиления схемы, пренебрегая влиянием С на входе.
3	Оцените выходное сопротивление такого усилителя.
4	Из каких соображений выбираются R1 и R2 ?

Для заметок

Усилители

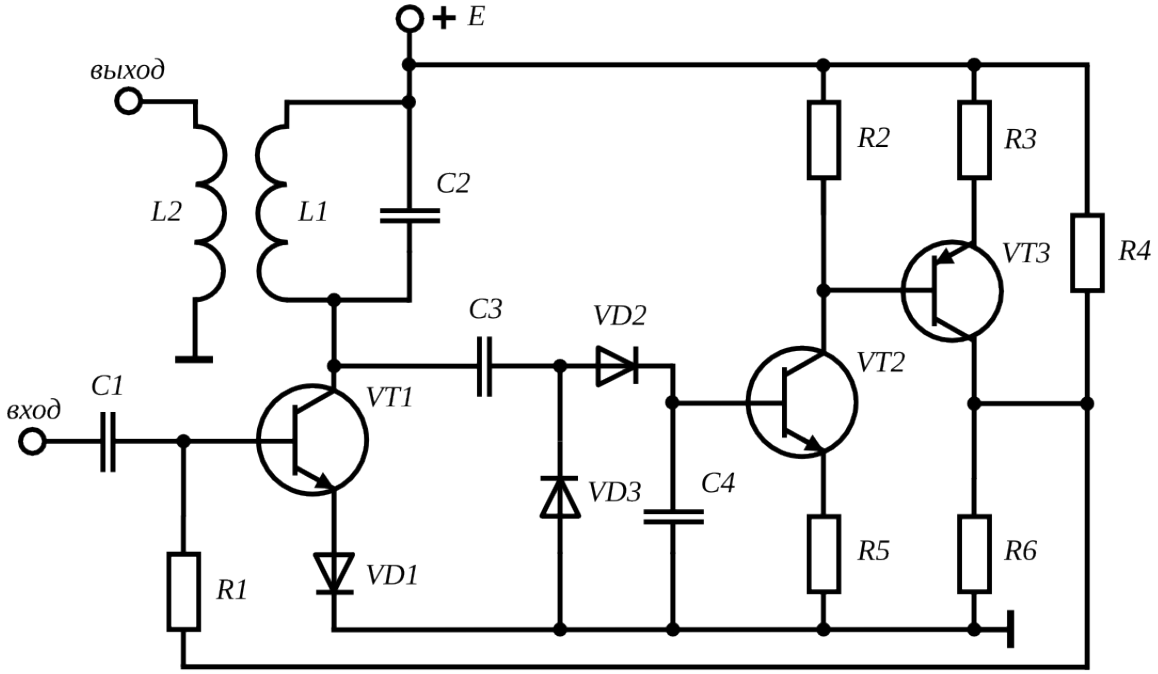


Схема 4.6	Усилитель радиочастотного диапазона с автоматической регулировкой усиления
Контрольные вопросы и задания	
1	По какой схеме включен VT1? Каково назначение диода VD1 в цепи эмиттера?
2	Какова форма и чем определяется величина сигнала на базе VT2?
3	Каков характер обратной связи, задаваемой цепью R4, R6, R1 ?
4	Охарактеризуйте работу такого усилителя в условиях перепадов амплитуды входного сигнала.

Для заметок

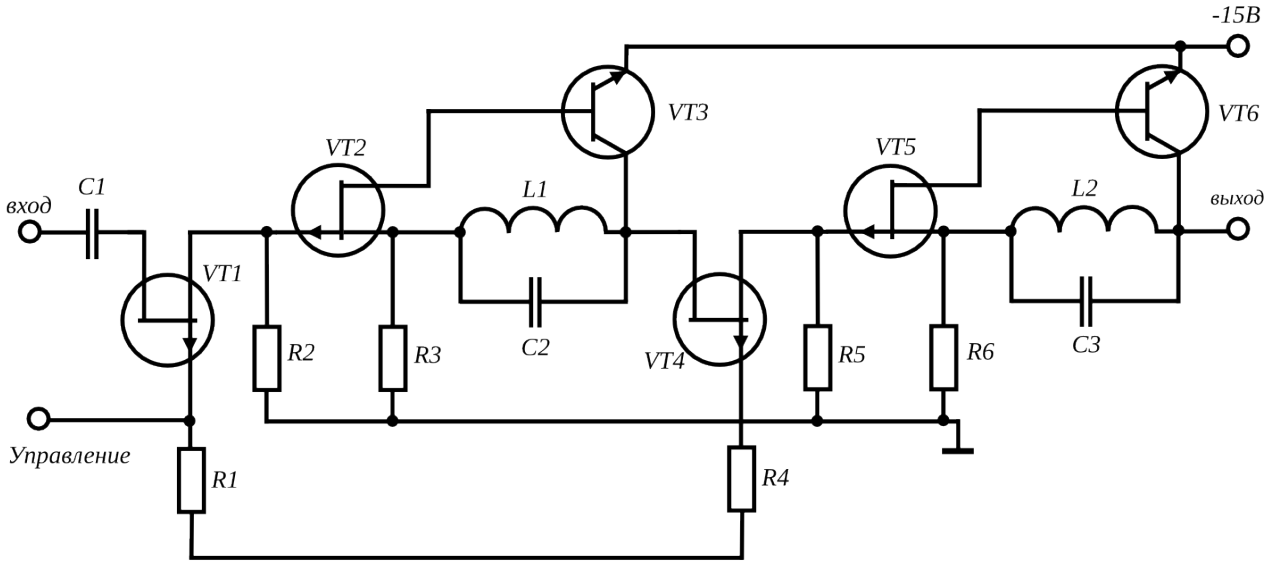


Схема 4.7	Двухкаскадный усилитель с управляемым коэффициентом усиления
Контрольные вопросы и задания	
1	Какую роль играют колебательные контура L1, C2 и L2, C3?
2	Какова схема включения VT1 и VT4? Какие свойства полевых транзисторов здесь используются?
3	Из каких соображений выбрать величину сопротивления резисторов R2 и R5 ?
4	Какие дополнительные цепи на выходе могли бы улучшить данную схему?

Для заметок

Усилители

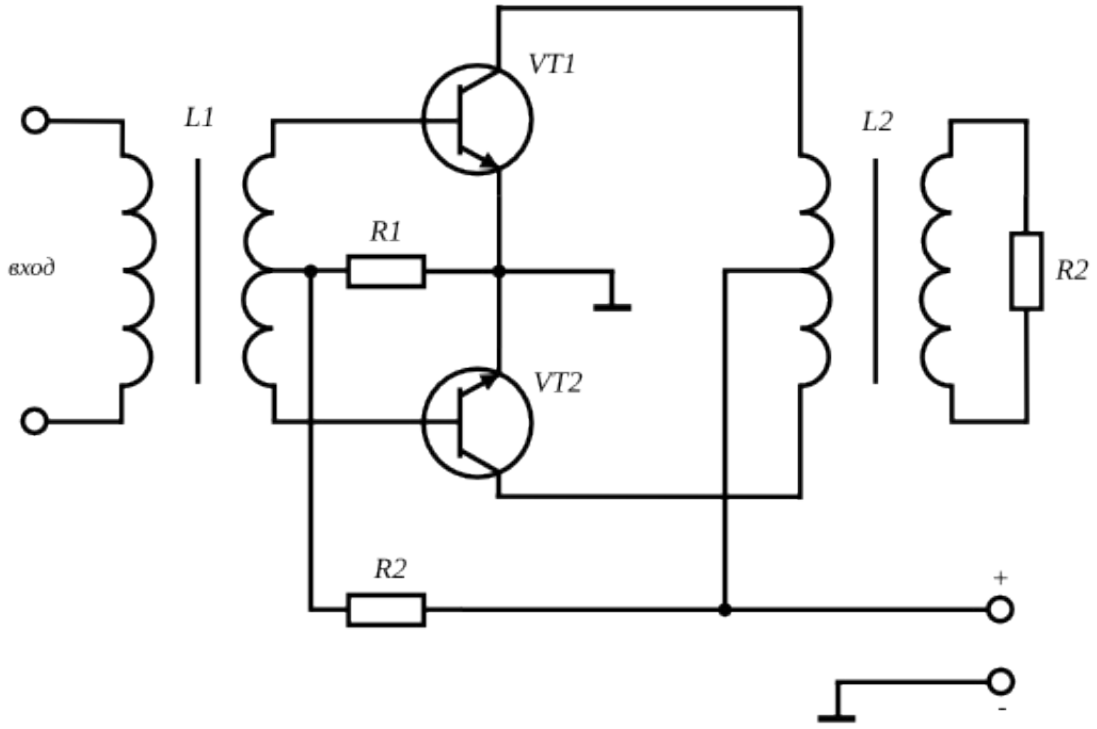


Схема 4.8	Двухтактный выходной каскад с трансформаторными связями
Контрольные вопросы и задания	
1	В чем различие режимов А, В, С усилительных каскадов?
2	Каковы причины использования двухтактных выходных каскадов в усилителях?
3	По какой схеме включены VT1 и VT2?
4	Что происходит с четными гармониками сигнала, возникающими при его усилении транзисторами VT1 и VT2?

Для заметок

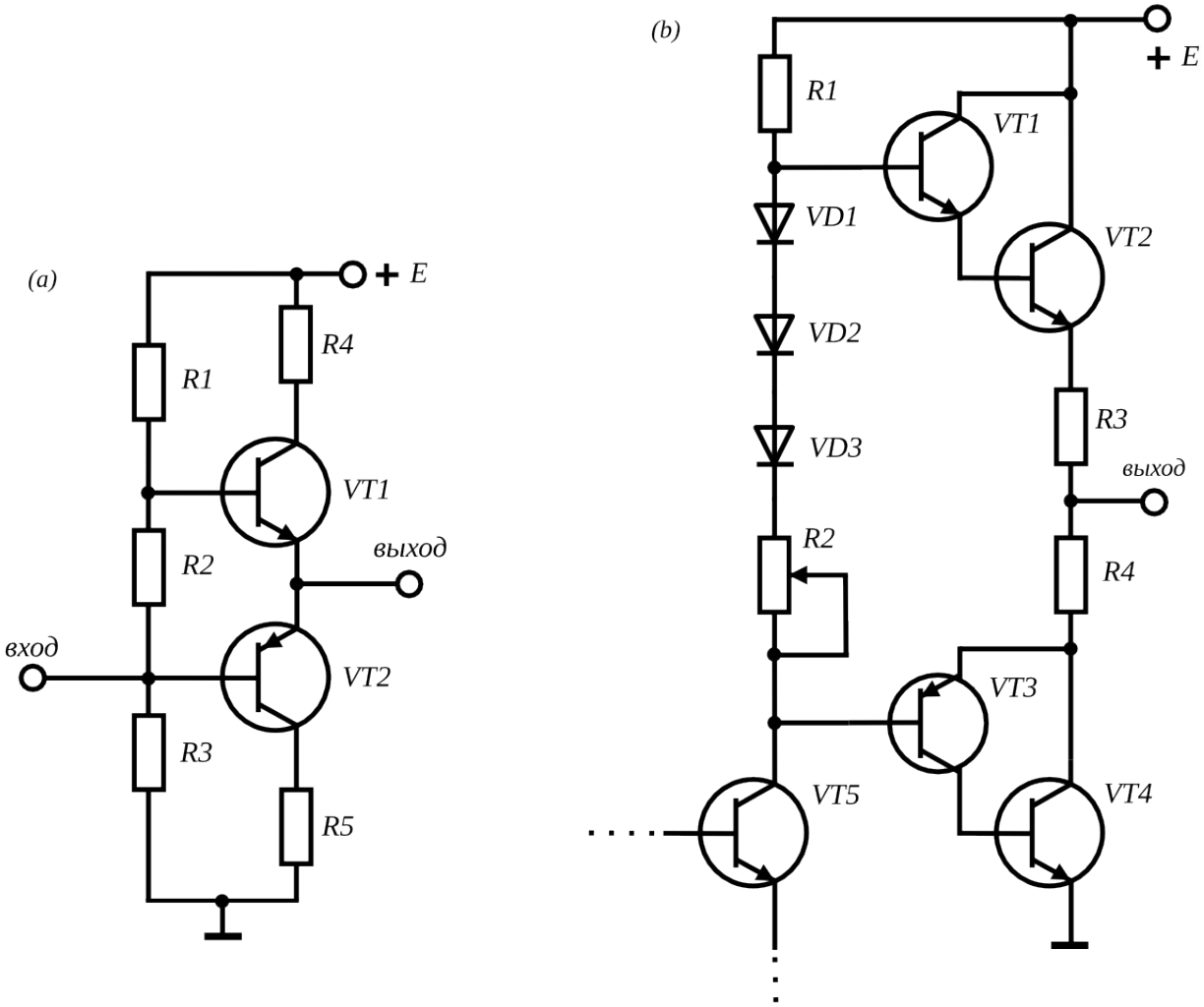


Схема 4.9	Бестрансформаторные выходные каскады. (a) -- упрощенная схема выходного каскада на комплиментарных транзисторах; (b) -- практическая схема на составных транзисторах с коррекцией искажений типа "ступенька".
Контрольные вопросы и задания	
1	По какой схеме (ОБ, ОЭ, ОК) включен каждый транзистор в схеме (a)?
2	По какой причине возникают искажения типа "ступенька"?
3	Каково назначение цепи VD1-VD3,R2 в схеме (b)? Почему диодов три?
4	Каково назначение резисторов R3 и R4 в схеме (b)?

Усилители

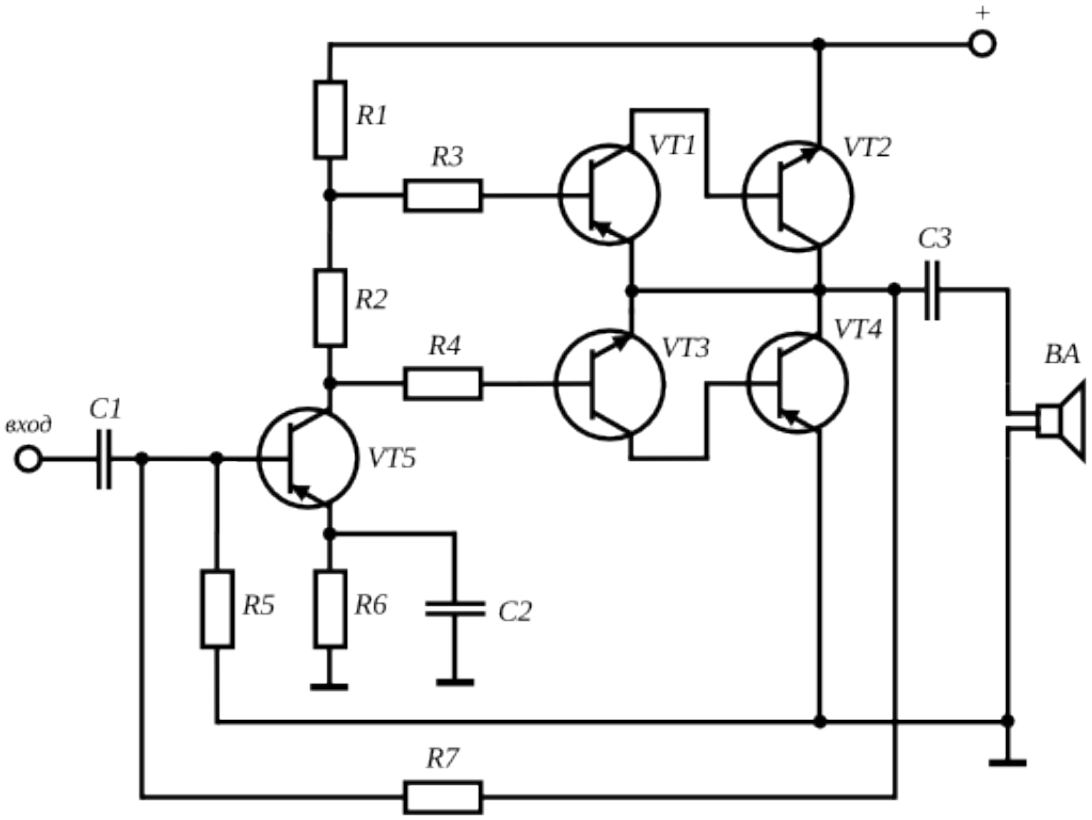


Схема 4.10	Практическая схема бестрансформаторного УНЧ.
Контрольные вопросы и задания	
1	Как задается смещение на базе транзистора VT1?
2	Какие меры приняты в данной схеме для компенсации нелинейных искажений?
3	Из каких соображений выбрать величины R6 и C2?
4	Оцените необходимую емкость конденсатора C3. Чем она определяется?

Для заметок

РАЗДЕЛ 5
ФИЛЬТРЫ

Для заметок

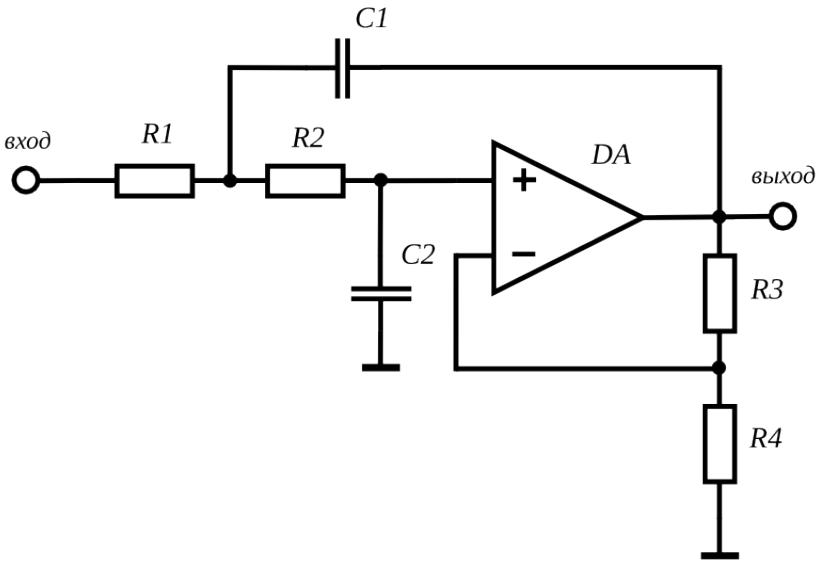


Схема 5.1	УИН-фильтр нижних частот.
Контрольные вопросы и задания	
1	Дайте расшифровку аббревиатуре "УИН".
2	Рассчитайте частоту среза фильтра для R1=R2=1кОм и C1=C2=10мкФ.
3	Как будет влиять на характеристики фильтра изменение соотношения R3 и R4?

Фильтры

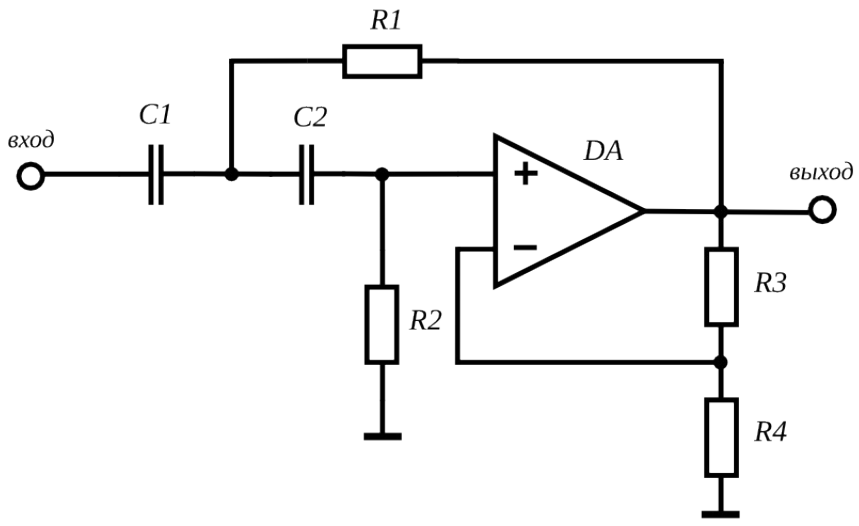


Схема 5.2	УИН-фильтр верхних частот.
Контрольные вопросы и задания	
1	Рассчитайте частоту среза фильтра для C1=C2=0.1мкФ и R1=R2=100 Ом.
2	Чем на практике определяется максимальная частота сигнала, пропускаемого данной схемой?

Для заметок

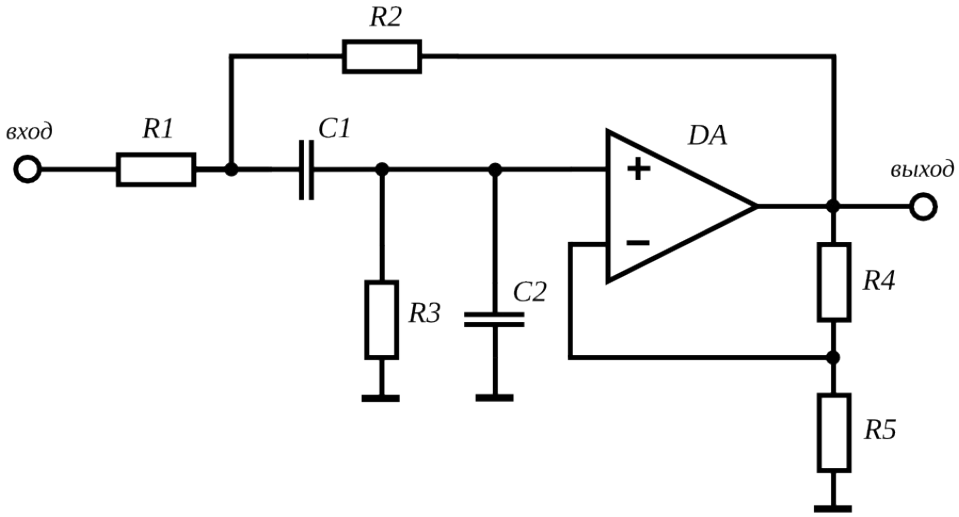


Схема 5.3	Полосовой УИН-фильтр.
Контрольные вопросы и задания	
1	Получите расчетное соотношение для модуля коэффициента передачи такого фильтра в предположении R4=R5.
2	Предложите аналог данной схемы с использованием полевых и биполярных транзисторов.

Для заметок

Фильтры

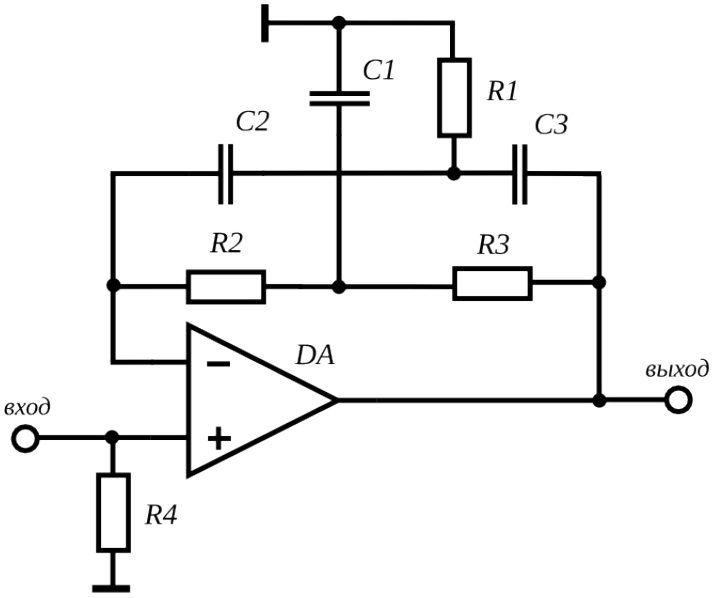


Схема 5.4	Активный фильтрна ОУ и двойном Т-мосте.
Контрольные вопросы и задания	
1	Обьясните принцип работы фильтра "Двойной Т-мост".
2	Получите расчетное соотношения для частоты, соответствующей минимуму пропускания Т-моста.
3	Как гарантировать активный режим работы ОУ на частоты, соответствующей максимальному коэффициенту усиления? Предложите меры, улучшающие данную схему.

Для заметок

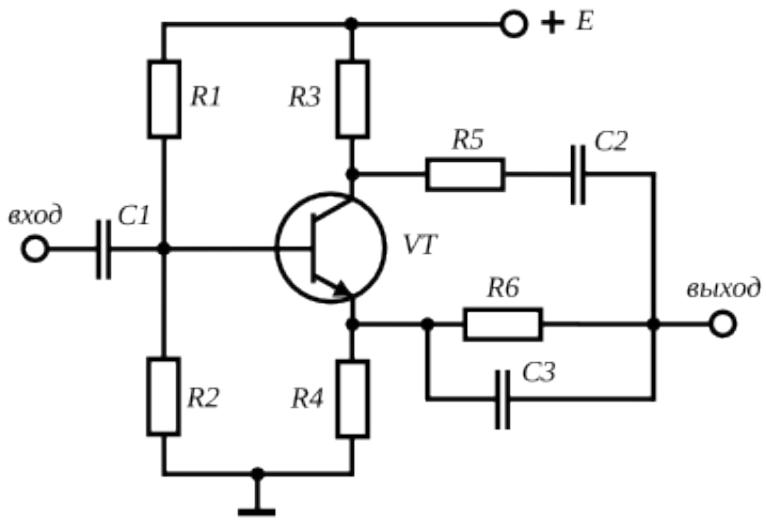


Схема 5.5	Фильтрующий каскад на биполярном транзисторе.
Контрольные вопросы и задания	
1	Как различаются фазы сигнала на эмиттере и коллекторе транзистора?
2	Получите расчетное соотношение, приближенно поисывающее работу данной схемы.

Для заметок

РАЗДЕЛ 6
ГЕНЕРАТОРЫ

Для заметок

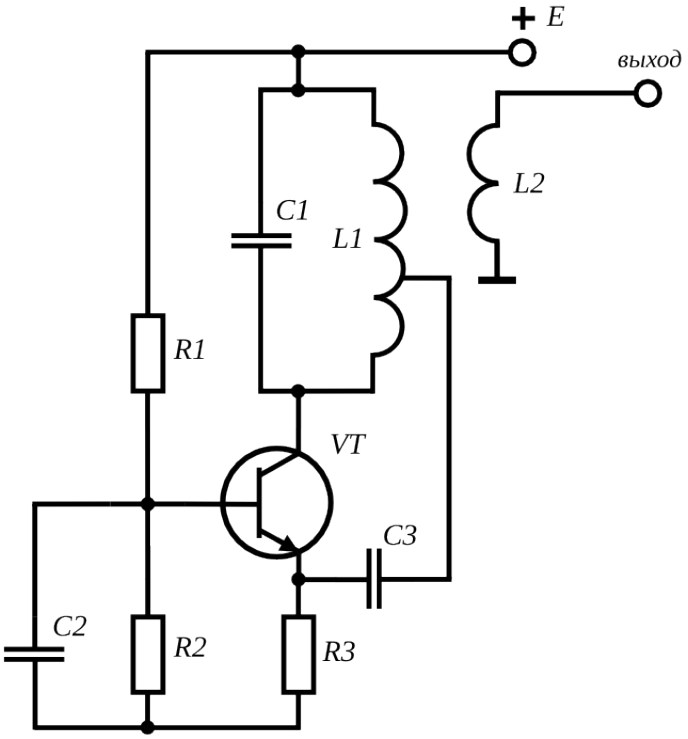


Схема 6.1	Генератор по схеме Хартли.
Контрольные вопросы и задания	
1	К какой разновидности трехточечных схем относится данный генератор?
2	Какой из трех конденсаторов удобней использовать для управления частотой генератора?
3	Каково назначение C2?
4	Каково типичное соотношение числа витков L1 и L2? Почему?

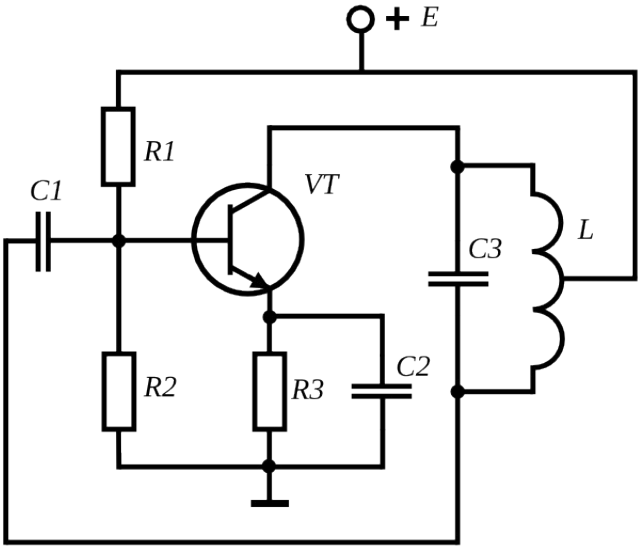


Схема 6.2	LC-генератор квазигармонических колебаний.
Контрольные вопросы и задания	
1	К какой разновидности трехточечных схем относится данный генератор? В чем отличие данной схемы от предыдущей? Чем гарантируется наличие положительной обратной связи?
2	Каково назначение конденсатора C1? Из каких соображений выбрать его емкость?
3	Оцените величину постоянной составляющей тока транзистора при разрыве в цепи C1.
4	Возможно ли удалить из схемы конденсатор C2? К чему это приведет?

Для заметок

Генераторы

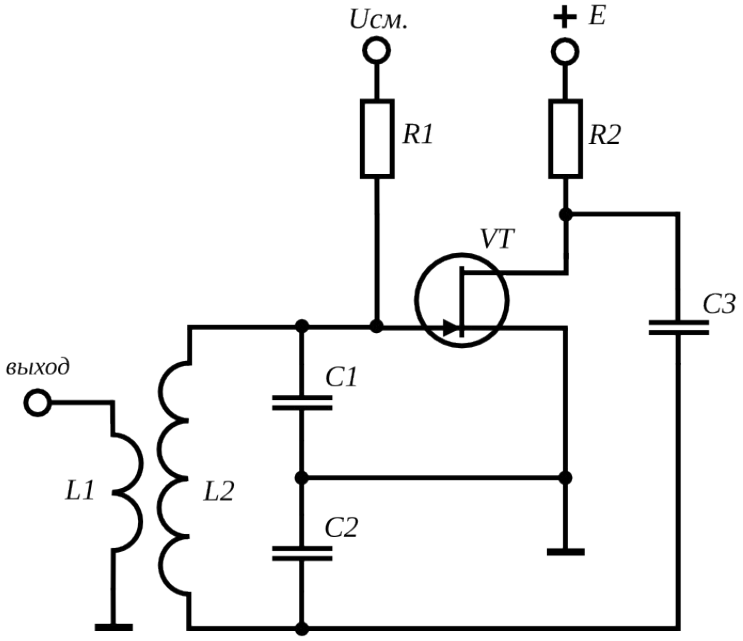


Схема 6.3	LC-генератор по схеме Колпитца
Контрольные вопросы и задания	
1	Как в данной схеме организована цепь положительной обратной связи? Какие элементы в нее входят? Как классифицирую такие схемы генераторов?
2	Возможно ли в данной схеме заменить полевой транзистор на биполярный? Что при этом изменится?
3	Каким образом изменение Uсм. влияет на форму генерируемого сигнала?

Для заметок

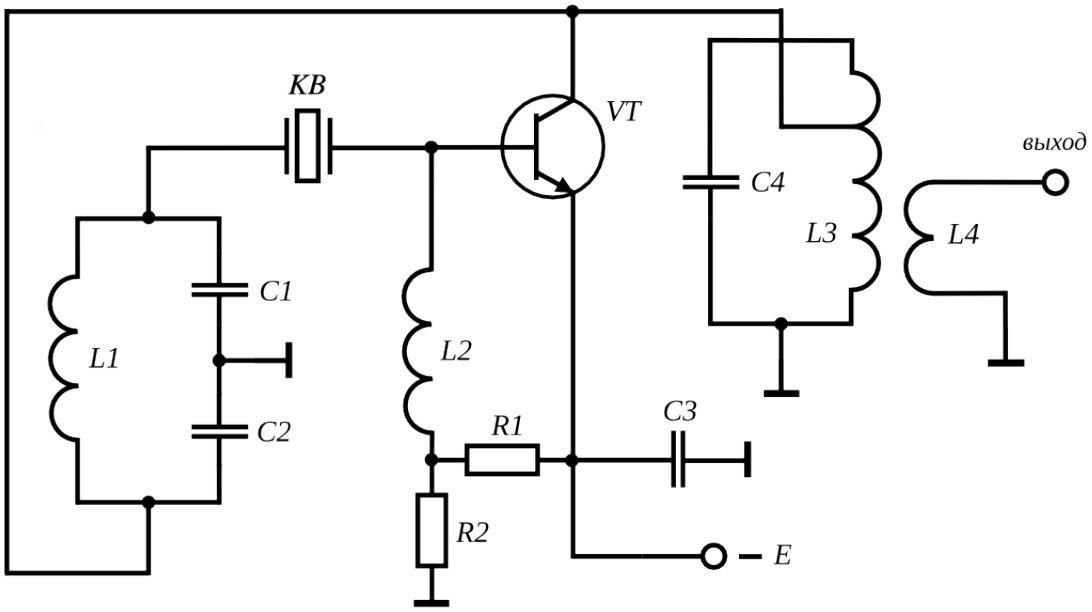


Схема 6.4	LC-генератор с кварцевым резонатором.
Контрольные вопросы и задания	
1	Нарисуйте и объясните эквивалентную схему кварцевого резонатора.
2	Каким образом в данной схеме создается положительная обратная связь?
3	Каково назначение катушки индуктивности L2?
4	Как соотносятся резонансные частоты контуров (L1, C1, C2) и (L3, C4)?

Для заметок

Генераторы

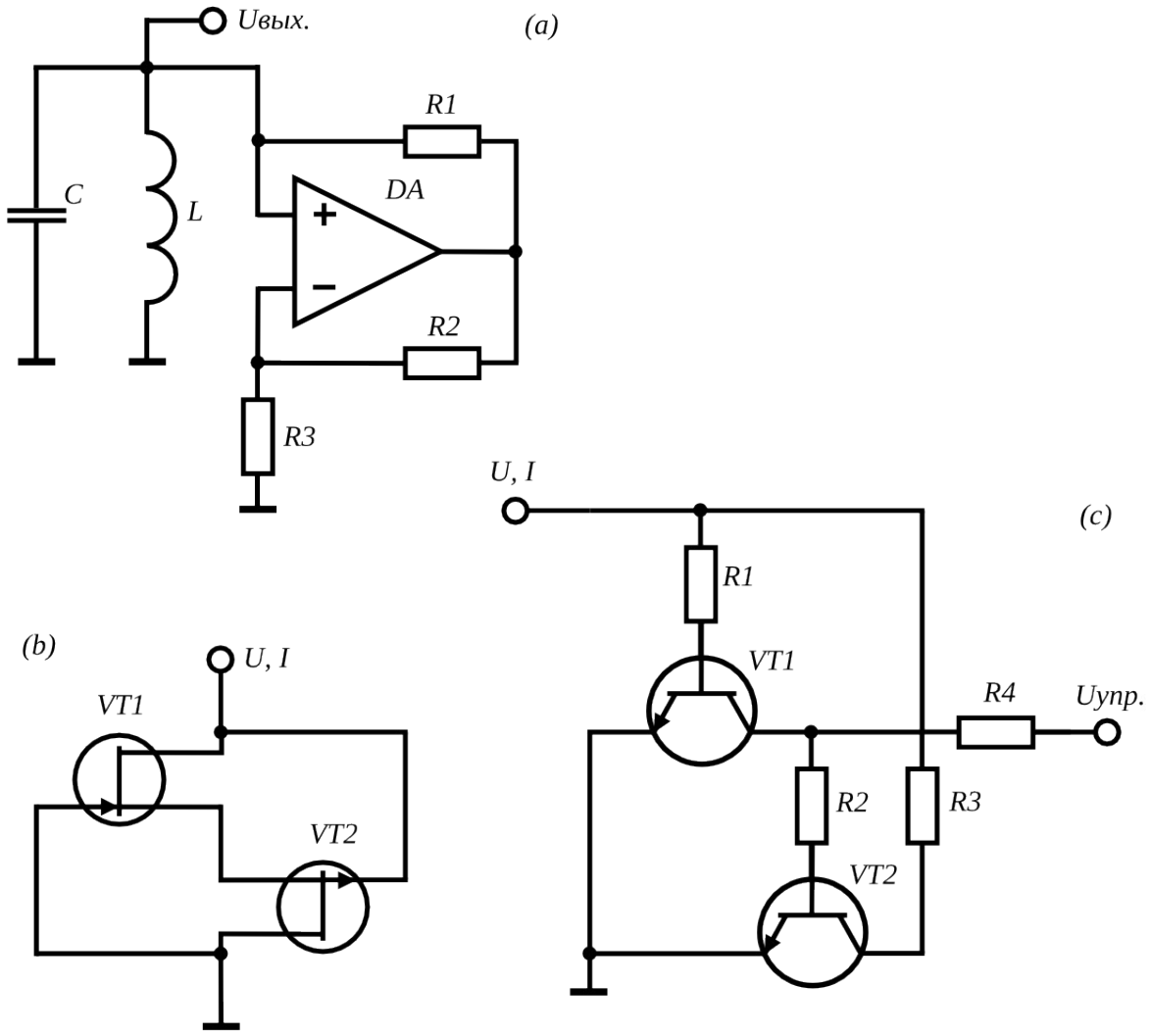


Схема 6.5	LC-генератор на конвертере отрицательного сопротивления и варианты реализации двухполюсников с N-характеристикой
Контрольные вопросы и задания	
1	Чем определяется максимальная амплитуда генерации схемы (a)?
2	При каком максимальном омическом сопротивлении обмотки катушки индуктивности возможна автогенерация при условии холостого хода на выходе (сопоставьте с параметрами характеристики конвертера на ОУ)?
3	Обьясните работу ламбда-диода, изображенного на (b).
4	Нарисуйте и объясните вольтамперную характеристику двухполюсника по схеме (c). Как на нее влияет изменение управляющего напряжения?

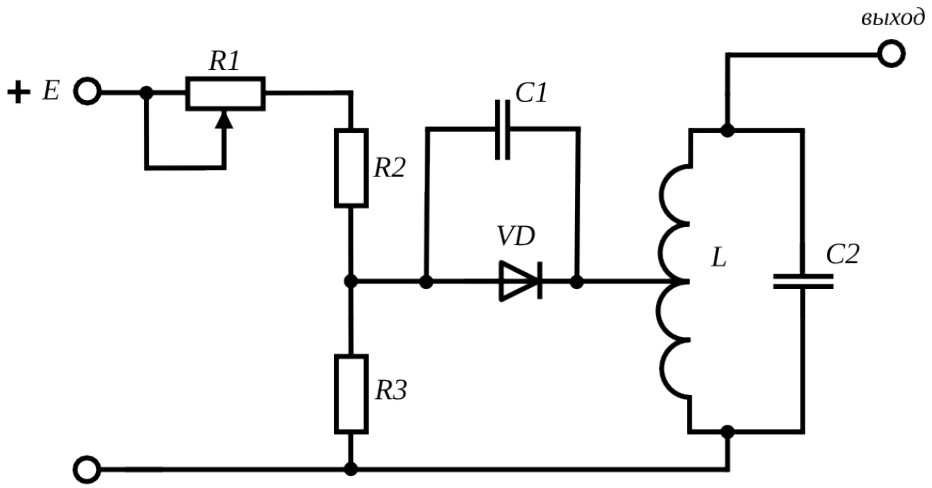


Схема 6.6	Практическая схема LC-генератора на туннельном диоде.
Контрольные вопросы и задания	
1	Нарисуйте эквивалентные схемы для постоянного и переменного тока.
2	Каковы ограничения на величину сопротивления резистора R3?
3	Чем определяется максимальная амплитуда выходного сигнала?
4	Что изменяется при перемещении ползунка переменного резистора R1?

Для заметок

Генераторы

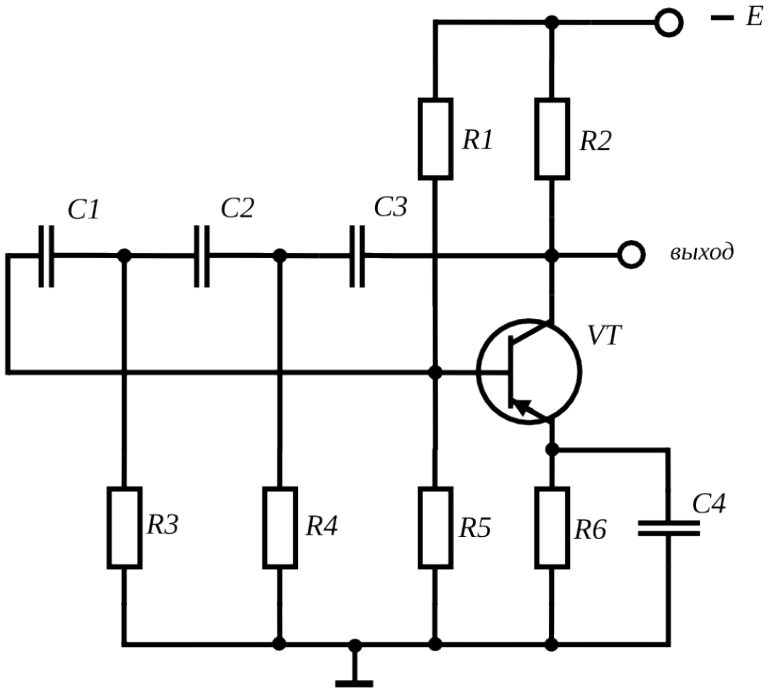


Схема 6.7	RC-генератор на трехзвенной цепочке.
Контрольные вопросы и задания	
1	Какие требования к фазовому сдвигу RC-цепочки определяют частоту генерации данной схемы?
2	Каков минимальный коэффициент усиления каскада на транзисторе необходим для даботы такого генератора? Как он обеспечивается в данной схеме?
3	К чему приведет неидентичность R3, R4, R5 и C1, C2, C3?
4	Может ли схема работать без конденсатора C4? Если да - при каком условии?

Для заметок

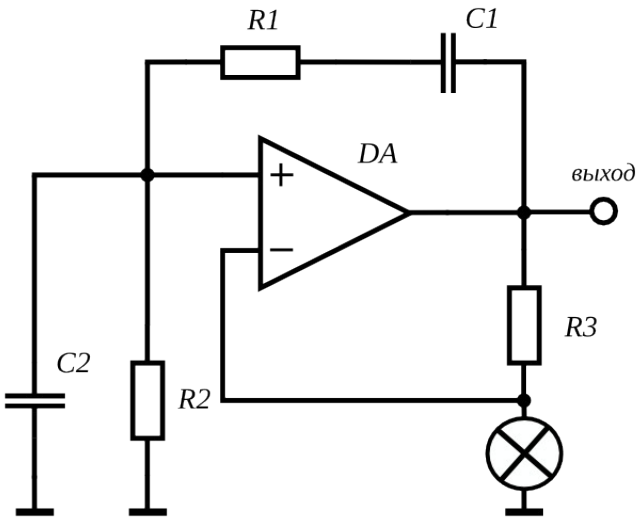
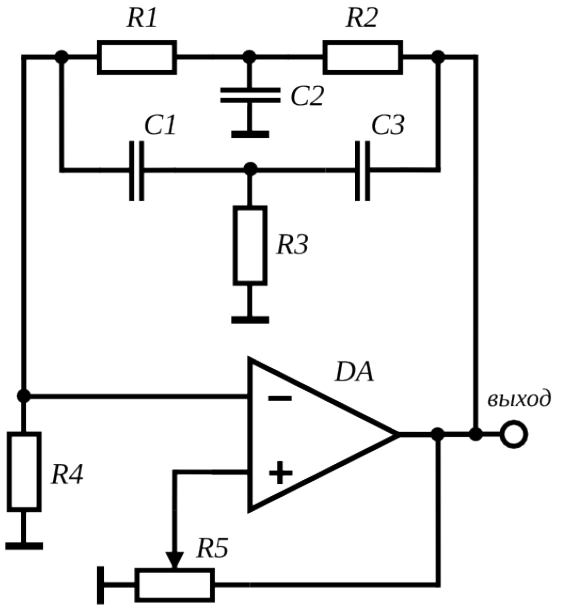


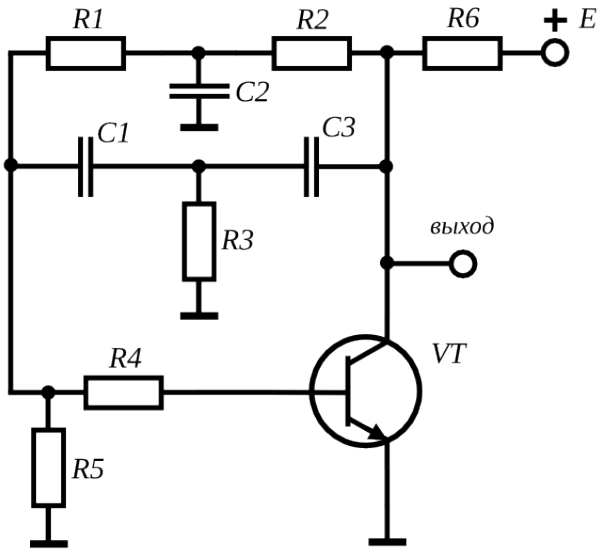
Схема 6.8	RC-генератор на ОУ с мостом Вина.
Контрольные вопросы и задания	
1	Какова роль отрицательной обратной связи в работе данной схемы?
2	На какой частоте возникнут колебания?
3	В каком соотношении должны находится сопротивления резистора R3 и нити лампы накаливания в холодном (горячем) состоянии?

Для заметок

Генераторы



(a)



(b)

Схема 6.9	Схемы RC-генераторов на двойном Т-мосте.
Контрольные вопросы и задания	
1	В случае идеальных условий работы Т-моста в схеме (а), какое усиление следует установить с помощью R5 для получеия формы колебаний, наиболее близкой к синусоидальной?
2	Как реализовать подстройку частоты генерации схемы (а)?
3	Каково назначение резистора R5 схемы (b)? А резистора R4?

Для заметок

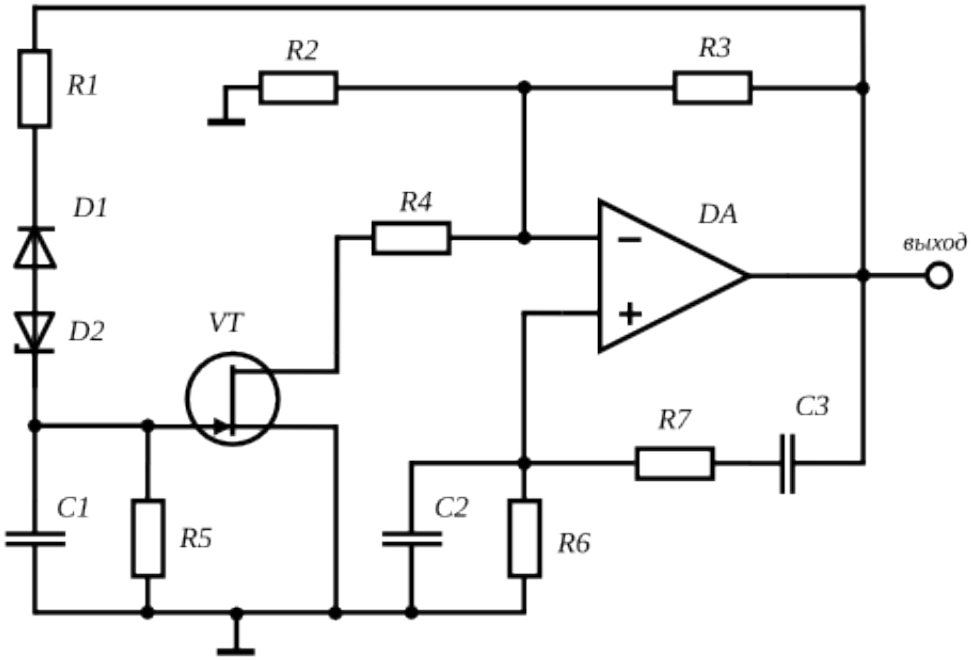


Схема 6.10	RC-генератор на ОУ с инерционным ограничением амплитуды.
Контрольные вопросы и задания	
1	Как влияет емкость конденсатора C1 на частоту генерации?
2	Объясните роль диода D1 и стабилитрона D2 в данной схеме.
3	На какие параметры работы схемы влияет постоянная времени C1R5?
4	Какую роль выполняет резистор R2?

Для заметок

Генераторы

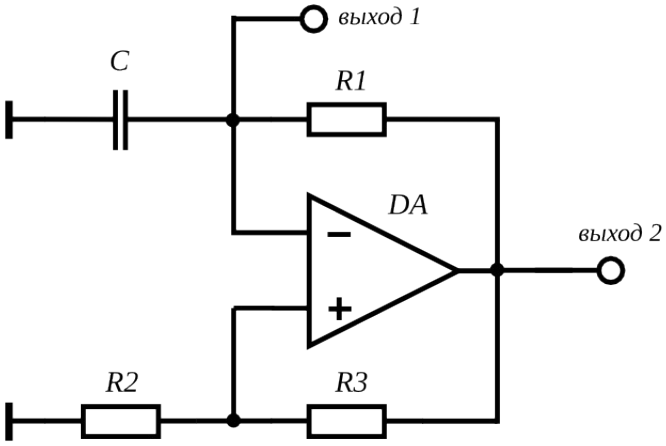


Схема 6.11	Релаксатор на ОУ.
Контрольные вопросы и задания	
1	Каков режим работы опреационного усилителя в данной схеме?
2	Какими элементами схемы определяется амплитуда генерируемых колебаний на выходе 1?
3	Как рассчитать частоту генерации?
4	Чем определяется практические нижний и верхний пределы частоты генерации ?

Для заметок

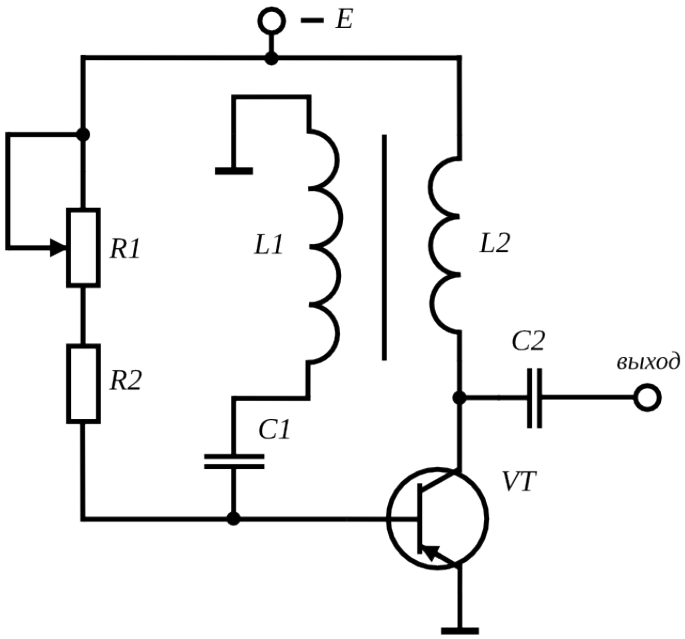


Схема 6.12	Блокинг-генератор.
Контрольные вопросы и задания	
1	В чем принципиальные отличия схемы блокинг-генератора от LC-генераторов квазигармонических колебаний?
2	Чем определяется период генерируемой последовательности импульсов?
3	Чем определяется амплитуда генерируемых импульсов?

Для заметок

РАЗДЕЛ 7
СХЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ И АНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

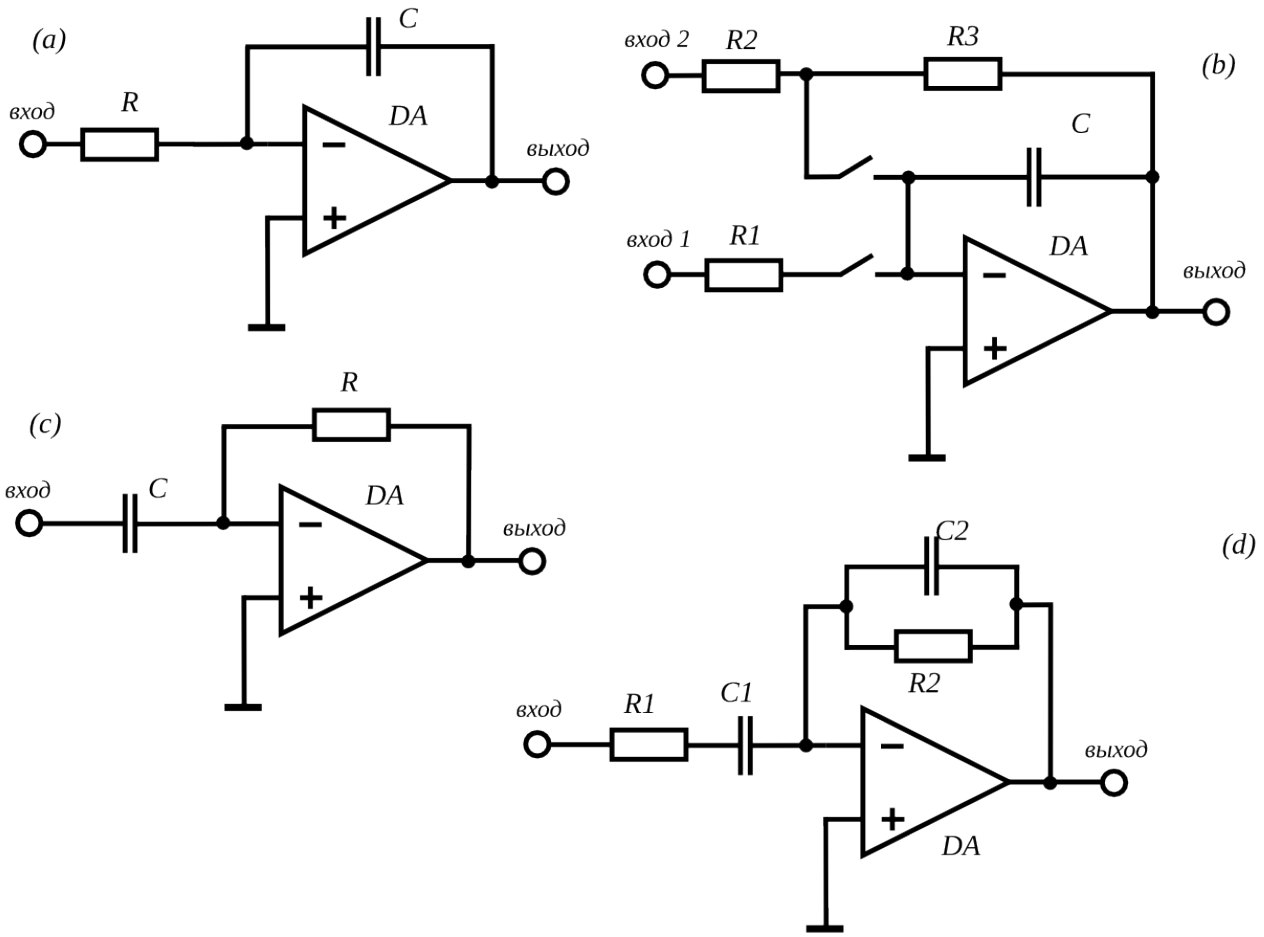


Схема 7.1	Схемы интегрирования (a), (b) и дифференцирования (c), (d) входного сигнала.
Контрольные вопросы и задания	
1	В каком режиме должен работать ОУ для правильного функционирования схем интегрирования и дифференцирования? В каких условиях возникает опасность выхода из этого режима для схемы (a)? Для схемы (c)?
2	Из каких соображений выбирается соотношение величин R3 и C2 в схеме (b)?
3	Из каких соображений выбирается соотношение величин R2 и C2 в схеме (d)?
4	Предложите улучшение схем (a)-(d), компенсирующее наличие напряжения сдвига ОУ.

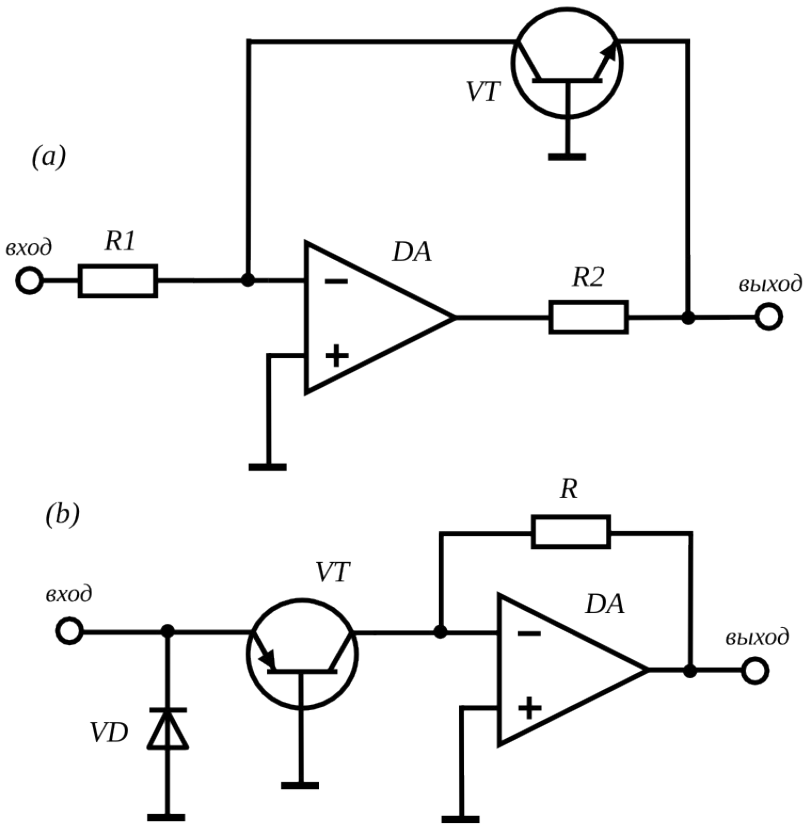
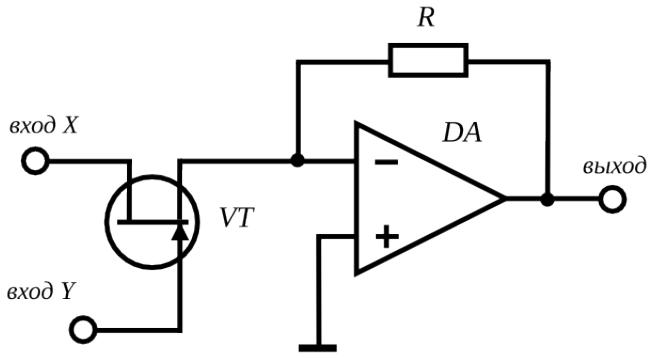


Схема 7.2	Логарифмический и экспоненциальный усилители на ОУ.
Контрольные вопросы и задания	
1	Какие свойства транзистора используются для построения логарифмирующих и потенциирующих усилителей?
2	Каково назначение резистора R2 в схеме (a)?
3	При какой полярности входного напряжения работоспособна схема (a)? Как видоизменить схему для другой полярности? Предложите цепь защиты транзистора от входного напряжения неправильной полярности.
4	Каково назначение диода VD в схеме (b)?

Для заметок

Аналоговое моделирование

(a)



(b)

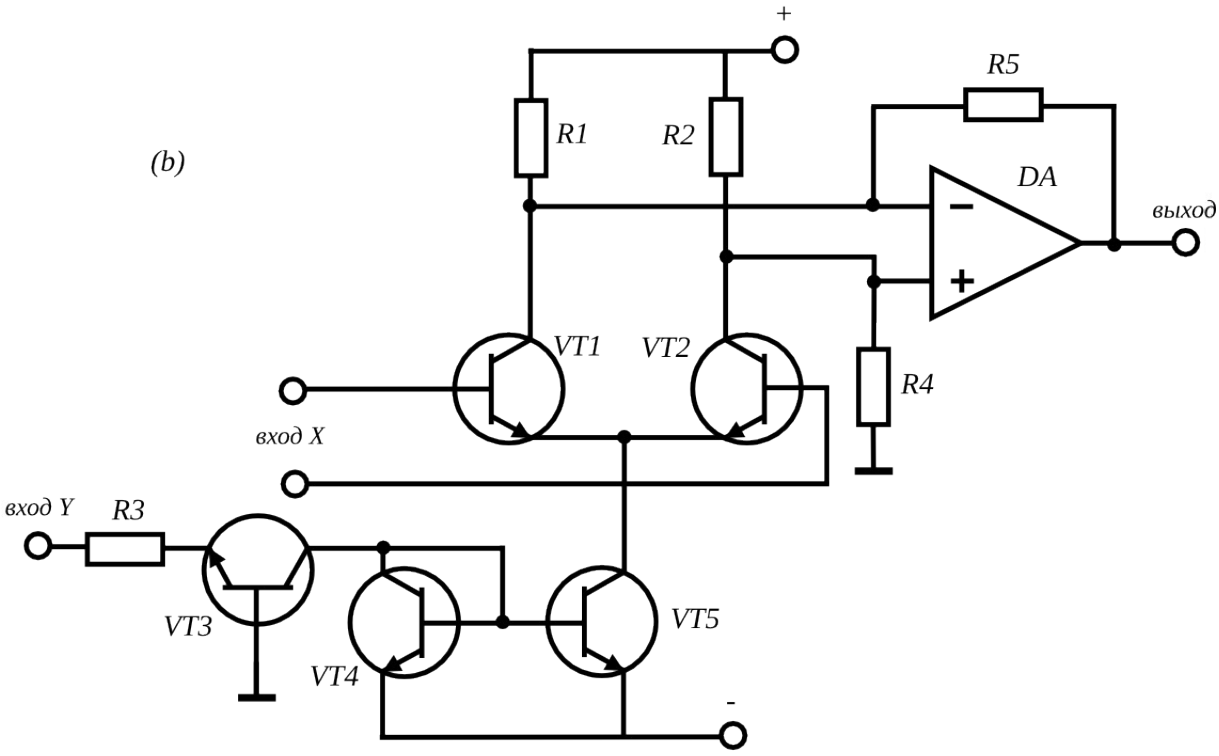


Схема 7.3	Схемы перемножителей.
Контрольные вопросы и задания	
1	Каков принцип работы схемы (a)? Оцените рабочий диапазон по входу Y.
2	За счет чего осуществляется перемножение сигналов в схеме (b)?
3	Какую функцию выполняют транзисторы VT4 и VT5 схемы (b)?
4	Для чего в схему включен R4? Из каких соображений выбрать его величину?

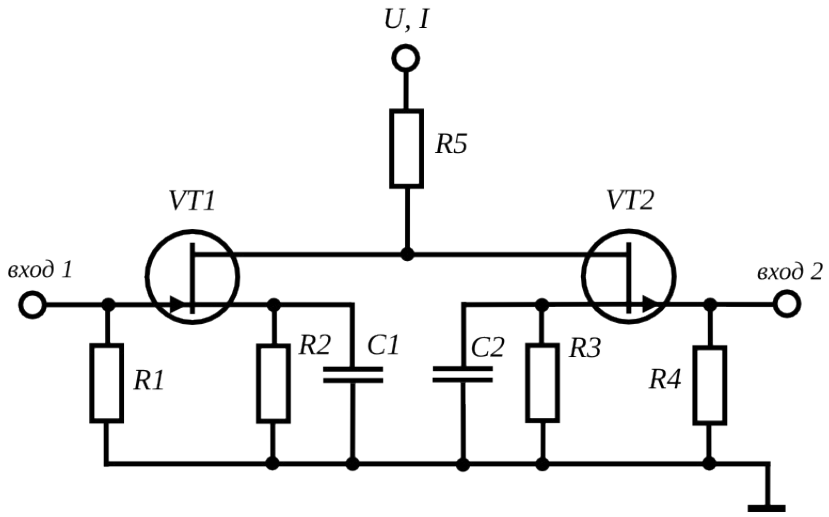


Схема 7.4	Схема квадратора на комплиментарных полевых транзисторах.
Контрольные вопросы и задания	
1	Сопоставьте вольтамперные характеристики устройства при постоянним напряжении стока и изменяемых напряжениях на первом и втором входе.
2	За счет чего достигается близкая к квадратичной зависимость при подаче на входы одного и того же напряжения?
3	Предложите модификацию схемы с компенсацией нуля (нулевой ток при нулевом входном напряжении).
4	Предложите модификацию схемы со сдвигом характеристики относительно входного напряжения (минимум тока при выбранном входном напряжении).

Для заметок

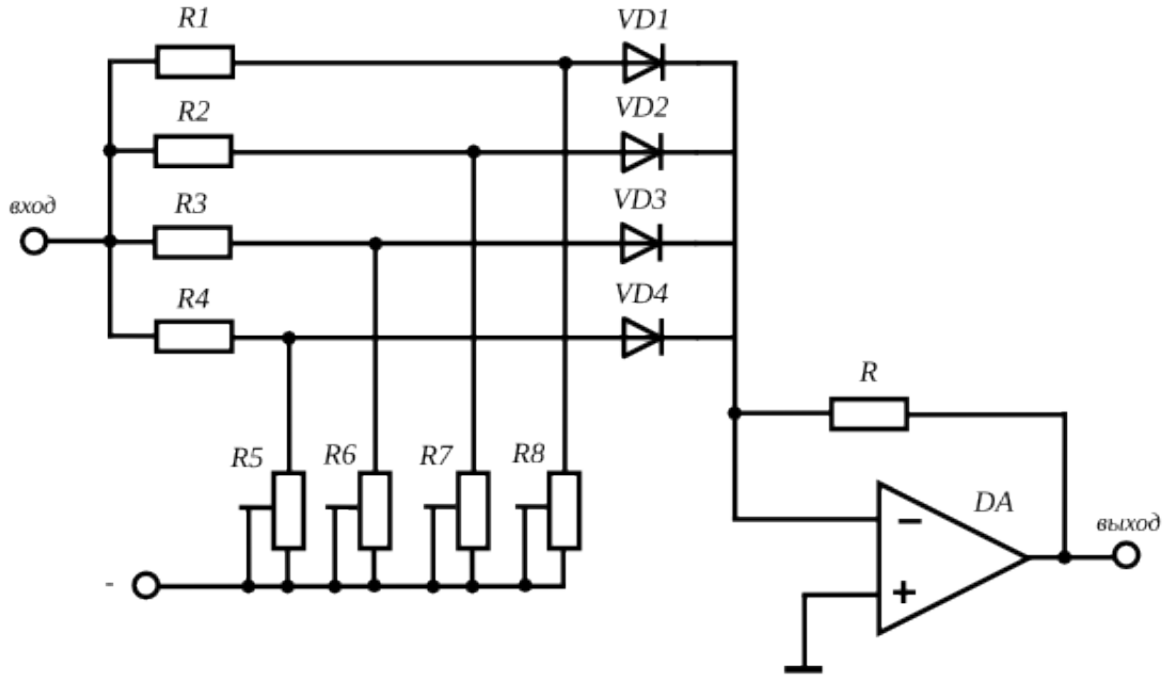


Схема 7.5	Четырехсегментный аппроксиматор.
Контрольные вопросы и задания	
1	В каком режиме работает операционный усилитель в этой схеме?
2	При увеличении напряжения на входе, в какую сторону меняется потенциал выхода?
3	Предложите модификацию схемы, позволяющую аппроксимировать функцию с немонотонно изменяющимся наклоном
4	От чего зависит плавность измения вольтамперной характеристики в области стыка сегментов ?

Для заметок

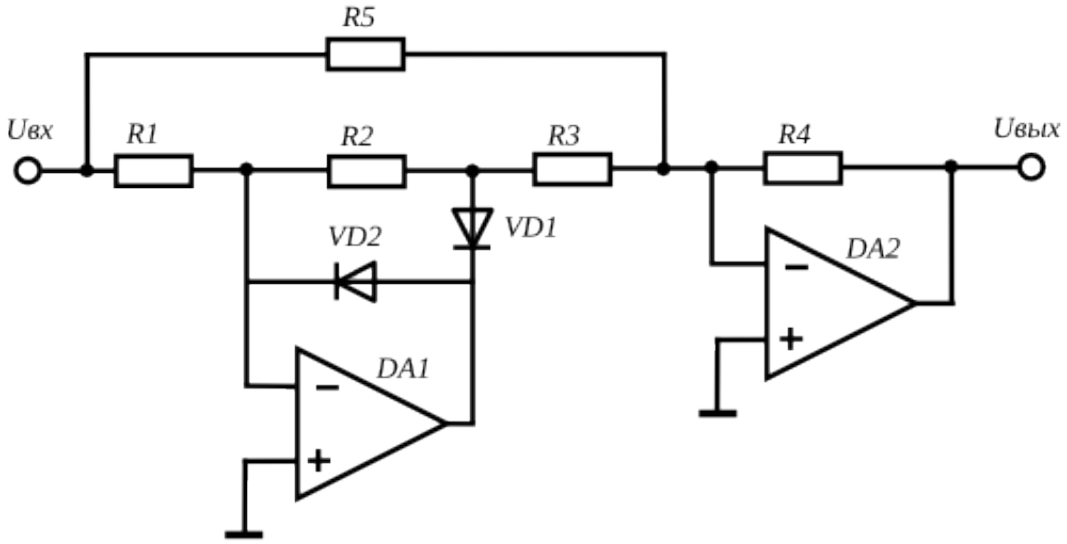


Схема 7.6	Схема выделения модуля входного сигнала.
Контрольные вопросы и задания	
1	Какие цепи схемы задействованы при положительном текущем значении входного сигнала?
2	Какие цепи схемы задействованы при отрицательном текущем значении входного сигнала?
3	При каком соотношении сопротивлений резисторов схемы она действительно выдает напряжение, пропорциональное отклонению сигнала от нуля?
4	Какова роль резистора R5?

Для заметок

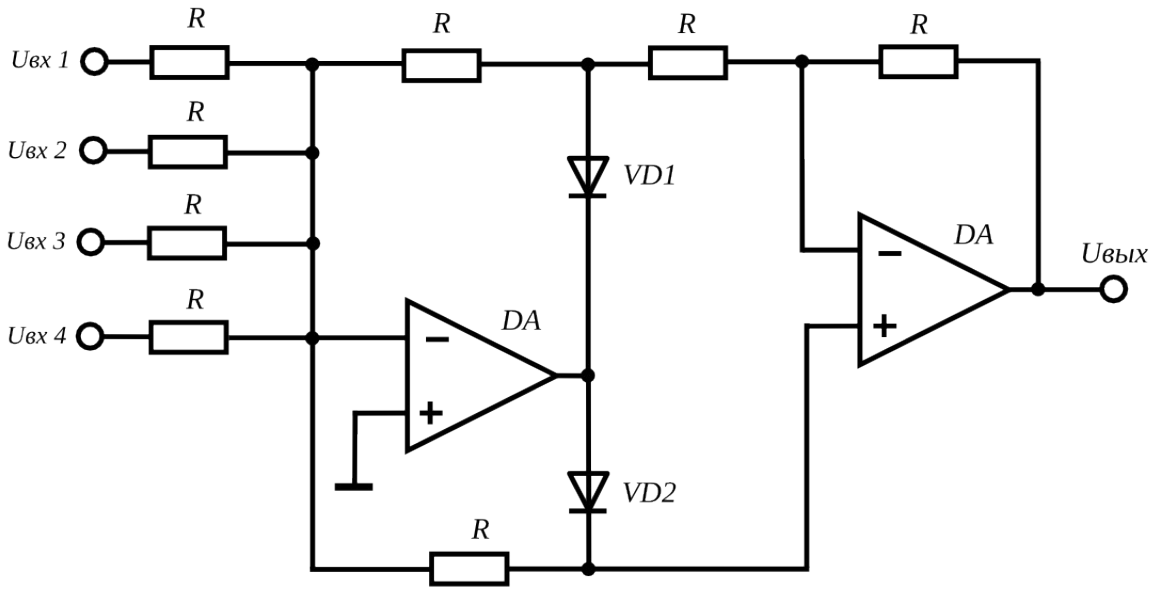


Схема 7.7	Схема выделения модуля суммы сигналов.
Контрольные вопросы и задания	
1	Какие цепи схемы определяют ее работу при положительном входном сигнале?
2	Какие цепи схемы определяют ее работу при отрицательном входном сигнале?
3	Какие из резисторов должны быть согласованы для правильной работы схемы, а какие можно изменять в соответствии с конретными потребностями?

Для заметок

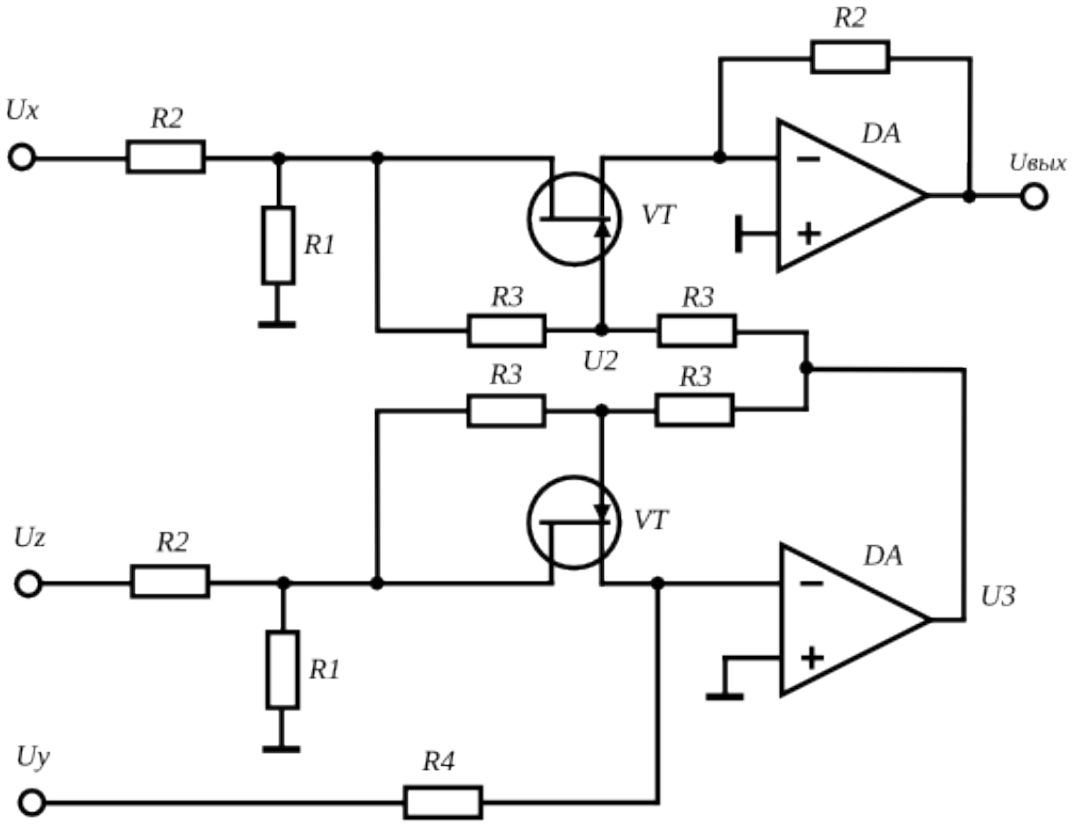


Схема 7.8	Схема перемножителя сигналов.
Контрольные вопросы и задания	
1	Какую роль выполняют полевые транзисторы VT1 и VT2?
2	Для какой цели используются делитель напряжения на резисторах одинаковой величины R3?

Для заметок

Аналоговое моделирование

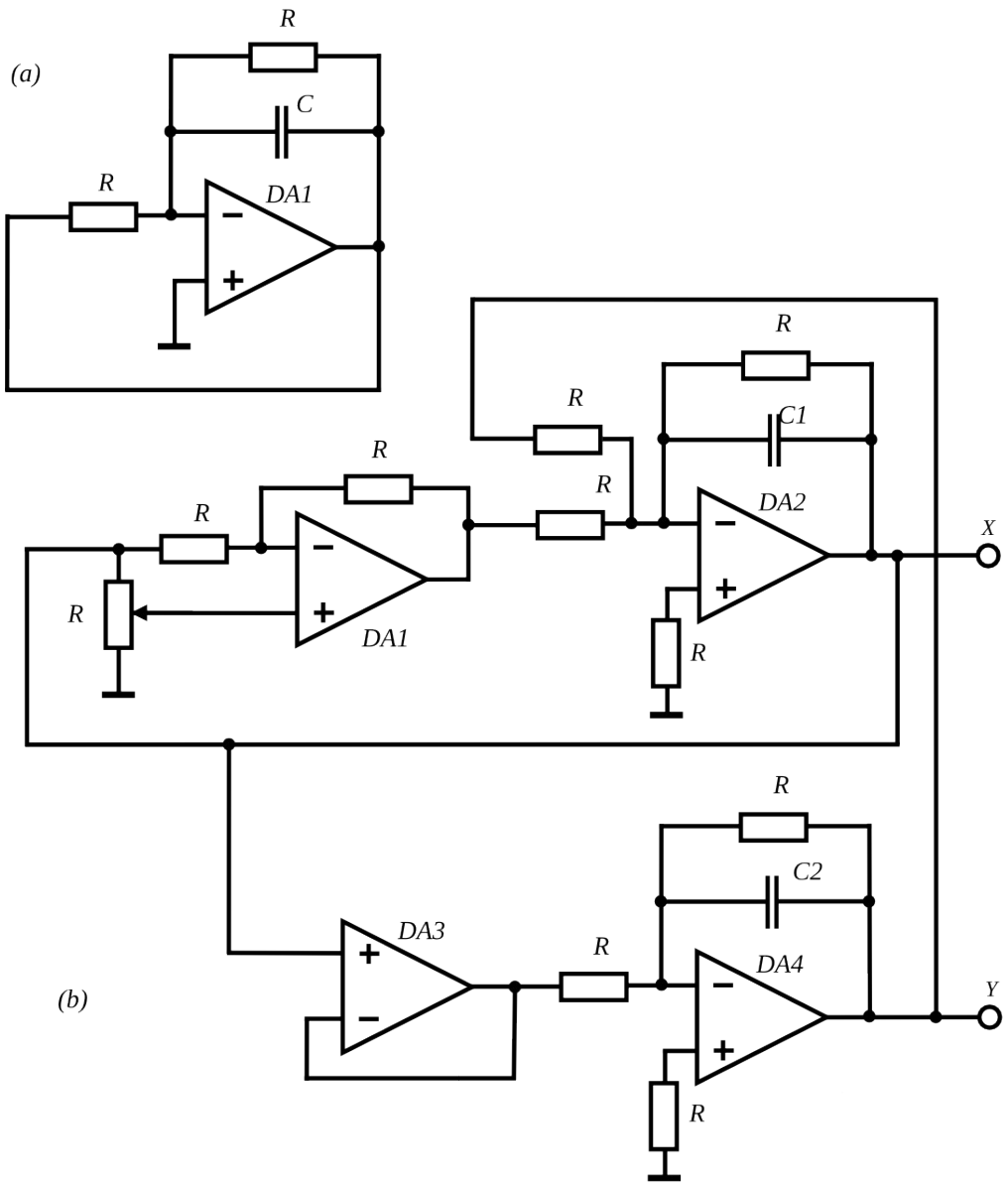
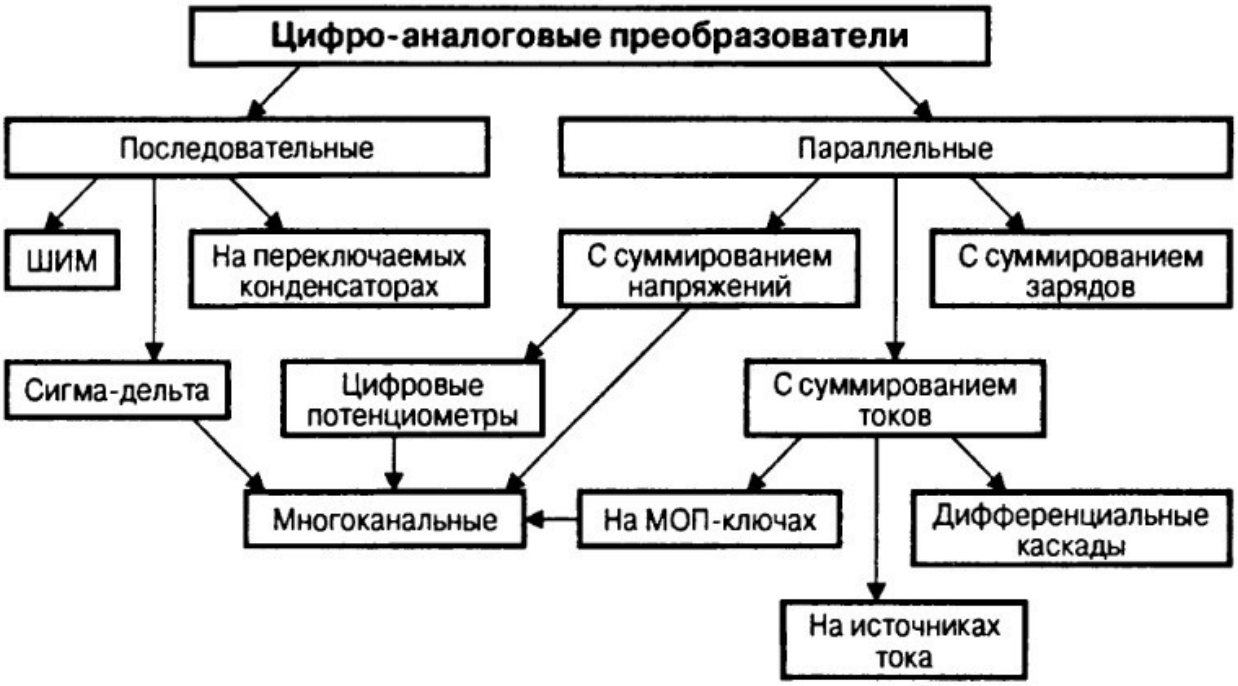


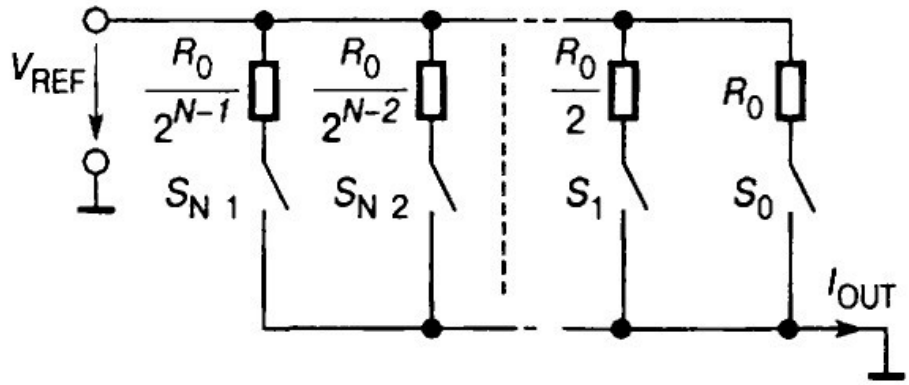
Схема 7.9	Схемы аналогового моделирования
Контрольные вопросы и задания	
1	Каким частям системы уравнений соответствуют узлы схемы (b) на ОУ DA1, DA2, DA3, DA4?
2	Каково назначение резисторов, включенных между неинвертирующими входами ОУ DA2, DA4 и землей?
3	Предложите модификацию схемы (b), которая позволяла бы задать начальные условия интегрирования.

РАЗДЕЛ 8
ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

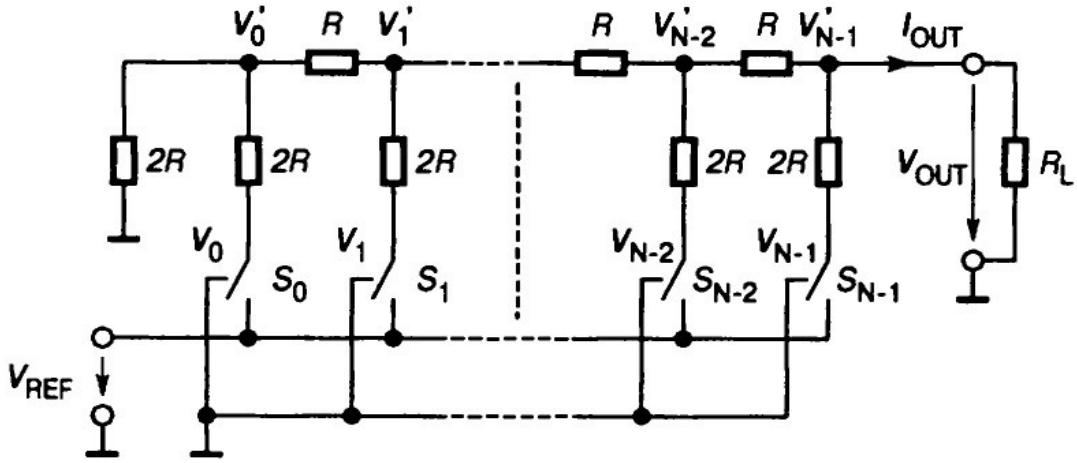


Для заметок

(a)


VREF
R0/2N-1
R0/2N-2
R0/2
R0
SN 1
SN 2
S1
S0
IOUT

(b)


V'0
R
V'1
R
V'N-2
R
V'N-1
IOUT
2R
2R
2R
2R
2R
VOUT
RL
V0
V1
VN-2
VN-1
S0
S1
SN-2
SN-1
VREF

(c)

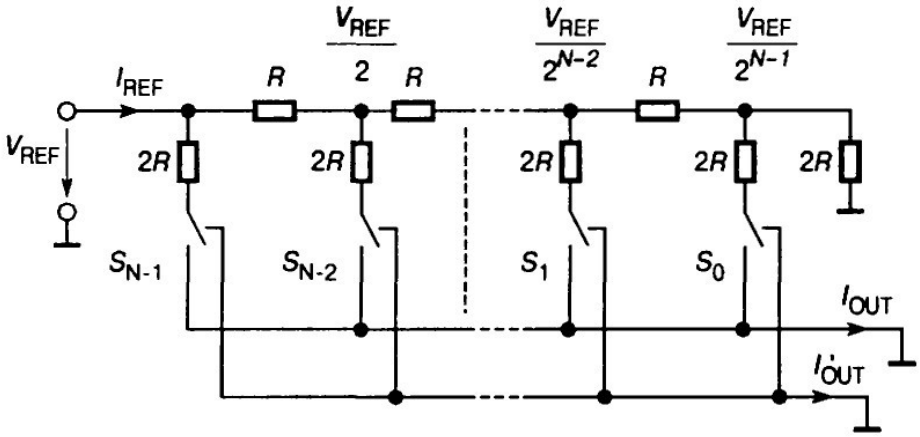

VREF/2
VREF/2N-2
VREF/2N-1
IREF
R
R
R
VREF
2R
2R
2R
2R
2R
SN-1
SN-2
S1
S0
IOUT
I'OUT

Схема 8.1	Варианты построения матрицы токов цифро-аналоговых преобразователей. (a) - простейшая схема ЦАП с суммированием весовых токов; (b) - схема построения ЦАП на матрице постоянного импеданса; (c) - ЦАП с инверсным включением резистивной матрицы.

Контрольные вопросы и задания	
1	Объясните принцип формирования матрицы сопротивлений схемы (a).
2	Как зависит потребляемый схемой ток от цифрового представления преобразуемой величины?
3	В чем преимущество схемы (b) с точки зрения выбора резисторов?
4	При практической реализации этих схем, что используют в качестве набора ключей?

Для заметок

Цифро-аналоговые преобразователи

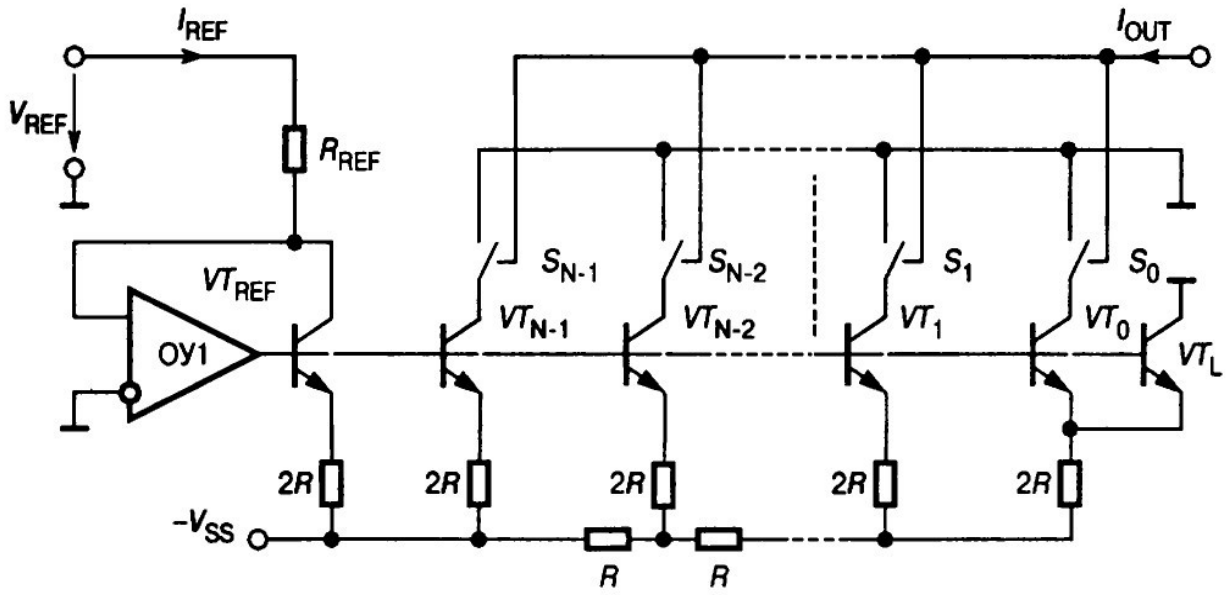


Схема 8.2	ЦАП на источниках тока.
Контрольные вопросы и задания	
1	Какова в этой схеме роль операционного усилителя?
2	Каковы требования к использованным в схеме транзисторам?
3	Какова цель параллельного включения транзисторов VT0 и VTL?
4	Объясните схему включения транзистора VT_ref.

Для заметок

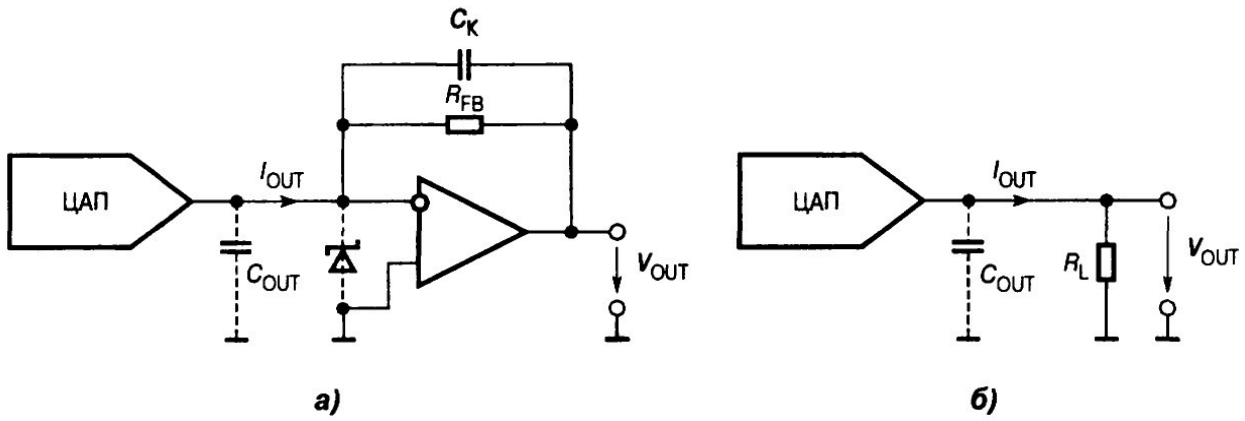


Схема 8.3	ЦАП с выходом по напряжению.
Контрольные вопросы и задания	
1	Какова роль выходной емкости ЦАП в формировании напряжения на выходе?
2	Каковы требования к резистору R_FB в схеме (a)?
3	Каково назначение конденсатора в цепи обратной связи ОУ?
4	В каких случаях целесообразно использовать схему (b)? Каковы ее недостатки?

Для заметок

Цифро-аналоговые преобразователи

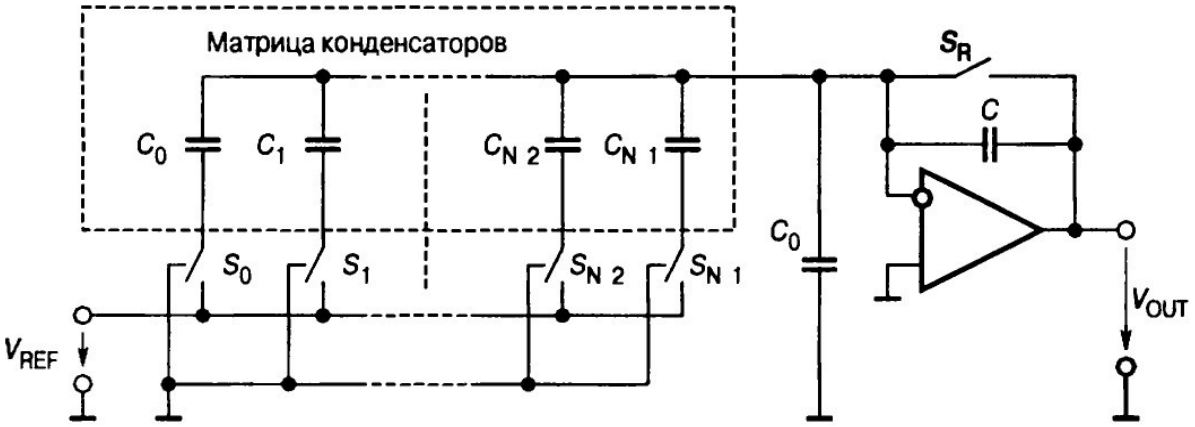


Схема 8.4	Параллельный ЦАП на переключаемых конденсаторах.
Контрольные вопросы и задания	
1	Как выбираются емкости конденсаторов матрицы?
2	Каковы фазы работы такого цифро-аналогового преобразователя?
3	Какова природа ограничения при преобразовании редко меняющихся во времени величин? Предложите модификацию схемы для преодоления этого недостатка.
4	Каково назначение ключа S_R?

Для заметок

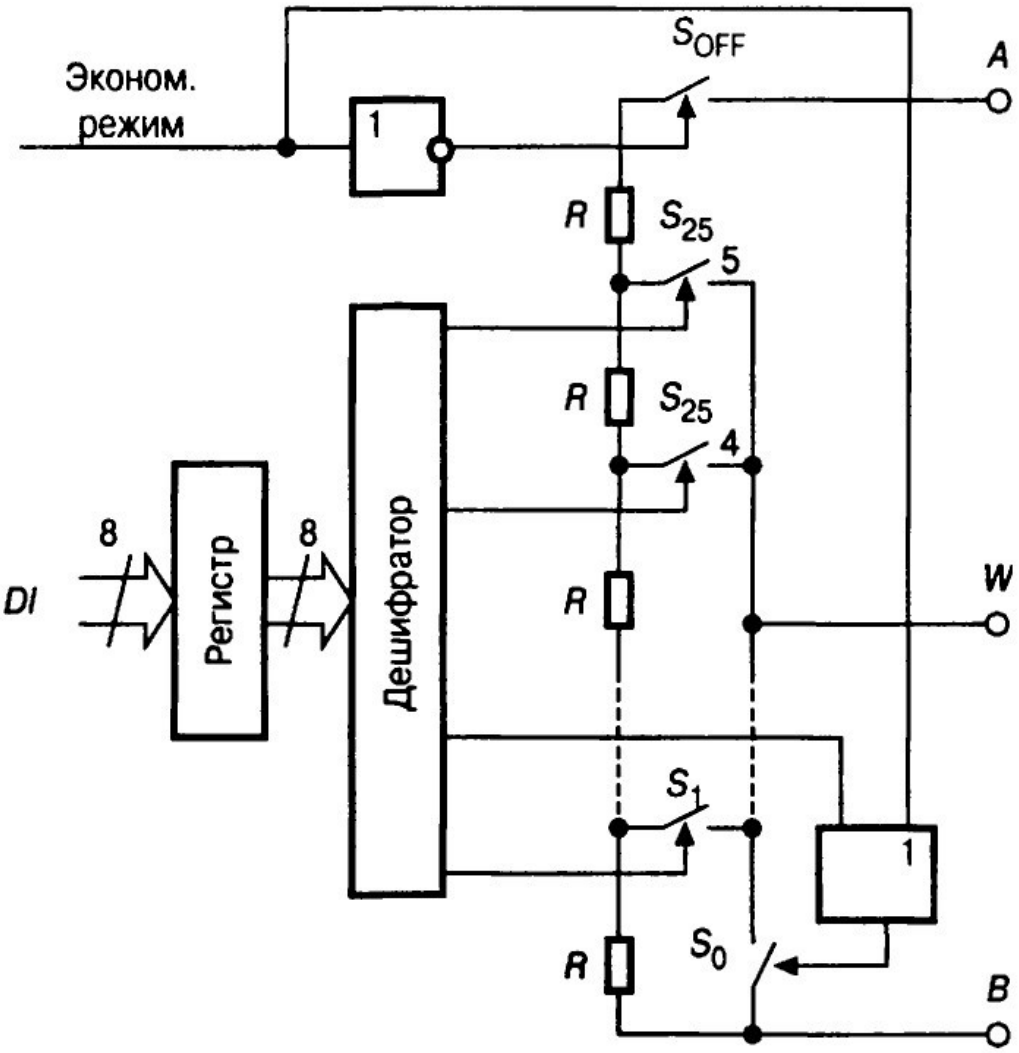


Схема 8.5	ЦАП с суммированием напряжений.
Контрольные вопросы и задания	
1	Сколько резисторов должно быть в матрице такого 8-разрядного ЦАП?
2	Какое представление сигнала на выходе должен обеспечивать дешифратор?
3	Объясните принцип действия цепей схемы при подаче сигнала на вход "Экономичный режим".

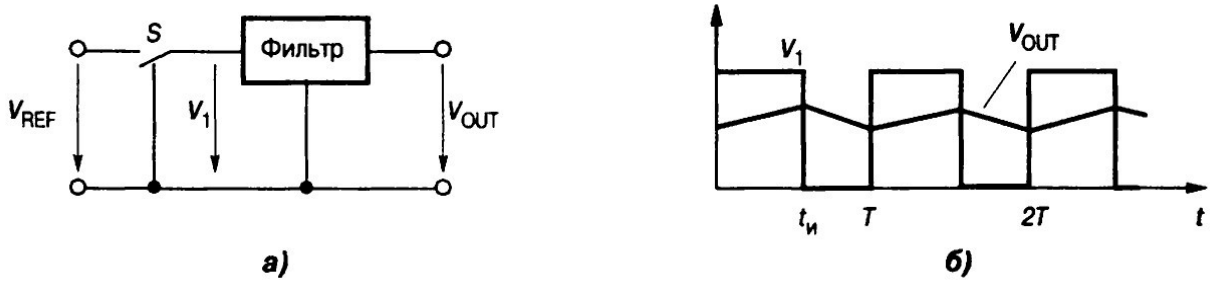
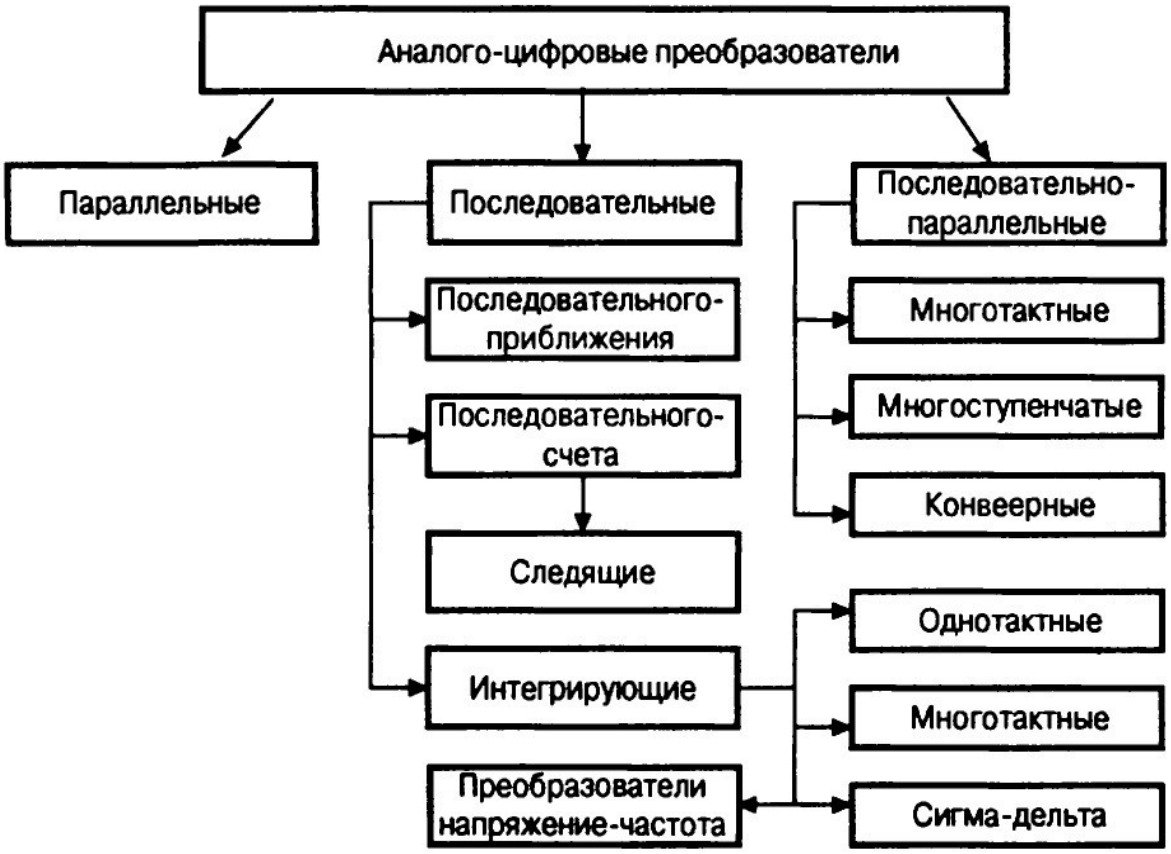


Схема 8.6	Принцип широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Для заметок

РАЗДЕЛ 9
АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ



Для заметок

Аналого-цифровые преобразователи

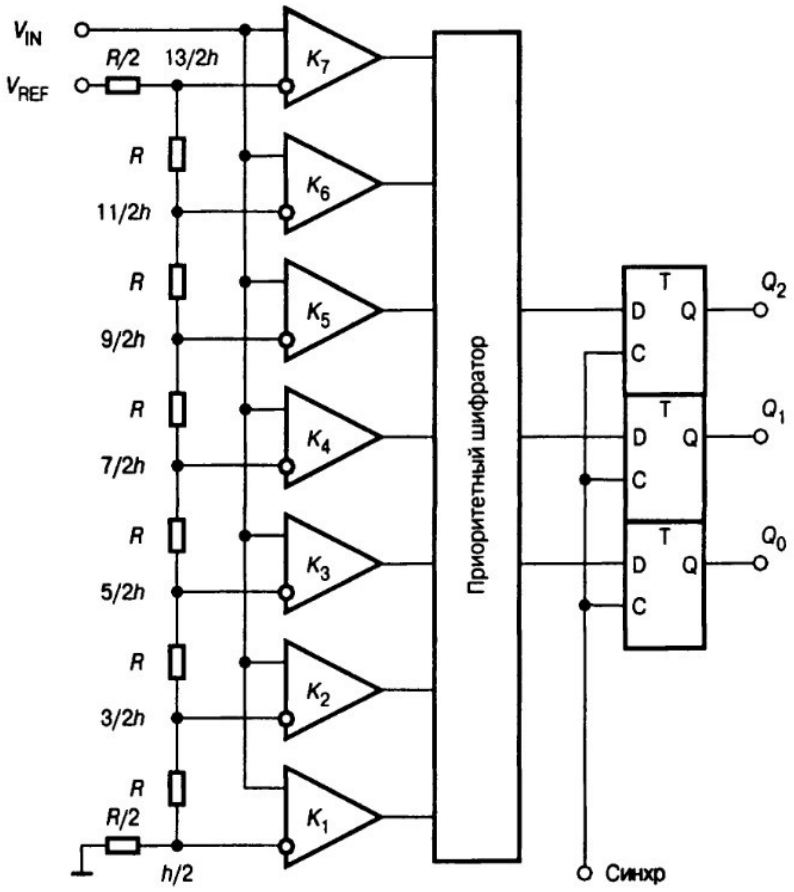


Схема 9.1	Параллельный 3 разрядный АЦП.
Контрольные вопросы и задания	
1	Как связаны разрядность АЦП и необходимое количество компараторов для данной схемы?
2	Объясните принцип работы (таблицу состояний) приоритетного шифратора.
3	Каковы преимущества и недостатки такой схемы АЦП?
4	В чем состоит опасность считывания результата преобразования непосредственно с выхода приоритетного шифратора?

Для заметок

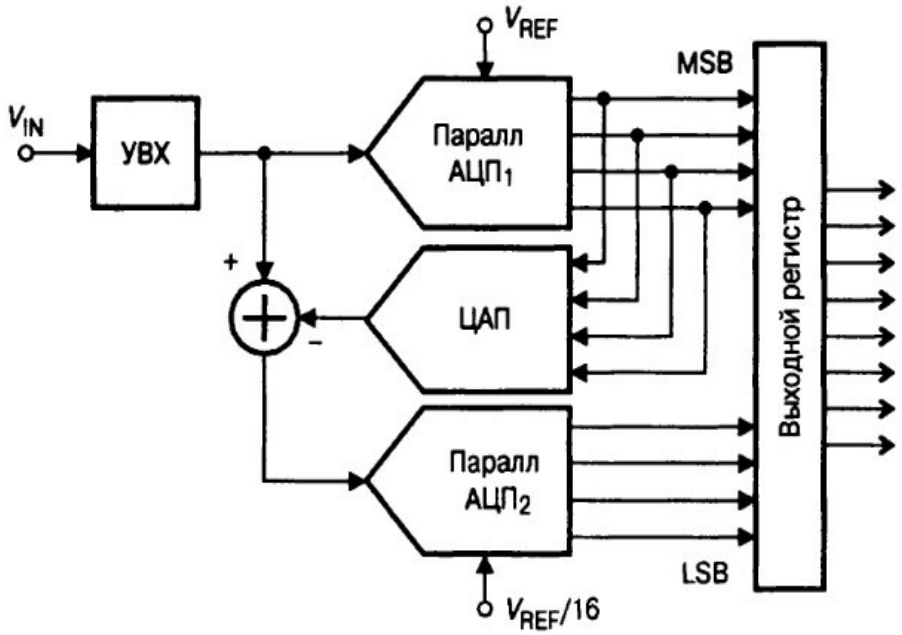


Схема 9.2	Структура двухступенчатого АЦП.
Контрольные вопросы и задания	
1	Каова роль верхнего по схеме 4-разрядного АЦП?
2	Как используется сигнал на выходе вспомогательного ЦАП?
3	Каковы требования к точности нижнего по схеме АЦП?
4	Чем вызвана необходимость использования устройства выборки-хранения на входе устройства?

Для заметок

Аналого-цифровые преобразователи

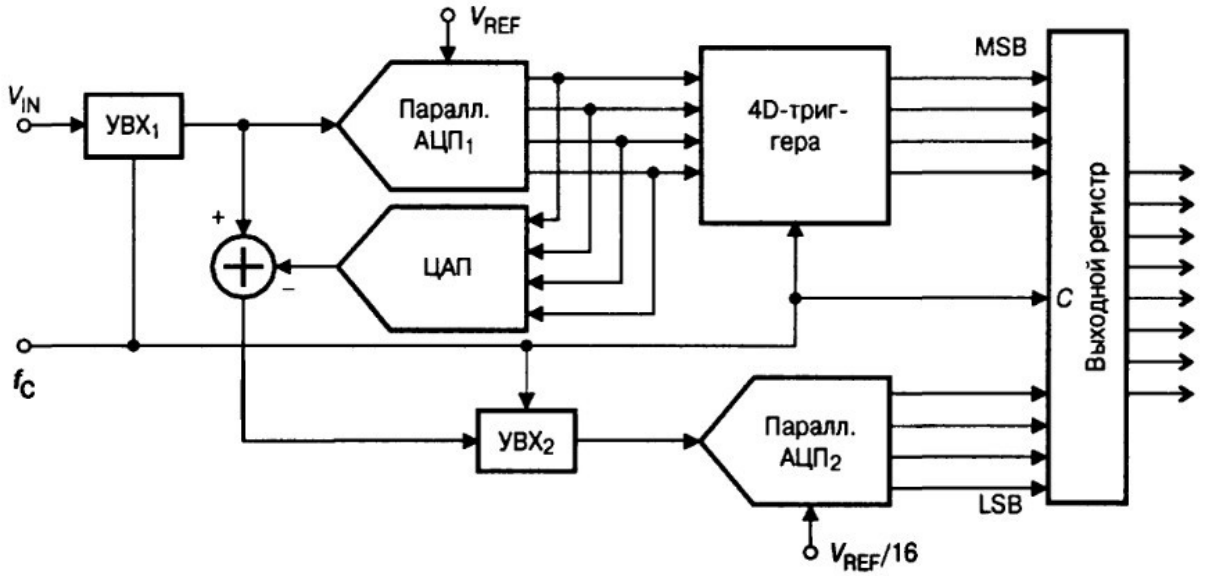


Схема 9.3	Структура конвейерного АЦП.
Контрольные вопросы и задания	
1	Какую роль в схеме играет дополнительное устройство выборки-хранения УВХ$_2$?
2	Чем вызвано применение блока из 4 D-триггеров для старших разрядов? Почему они не нужны для младших разрядов?
3	Опишите последовательность событий при работе конвейерного АЦП.
4	Чем вызвано ограничение по минимальной частоте считывания для промышленных образцов конвейерных АЦП?

Для заметок

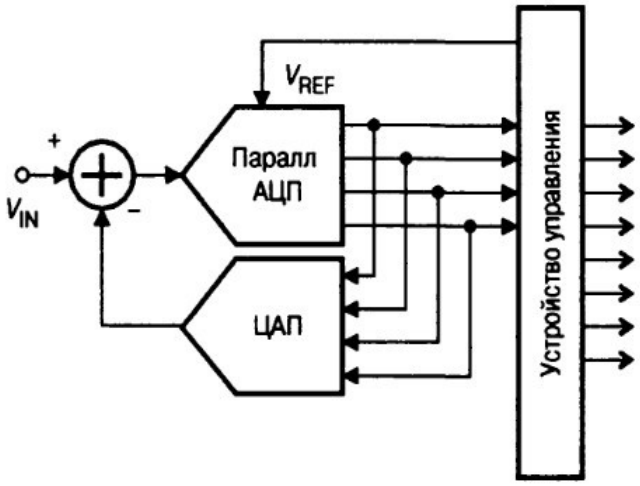


Схема 9.4	Структура двухтактного последовательно-параллельного АЦП.
Контрольные вопросы и задания	
1	Как используется цепь формирования опорного напряжения блоком управления?
2	Опишите последовательность событий при работе последовательно-параллельного АЦП.
3	В чем состоят преимущества и недостатки многотактных АЦП?

Для заметок

Аналого-цифровые преобразователи

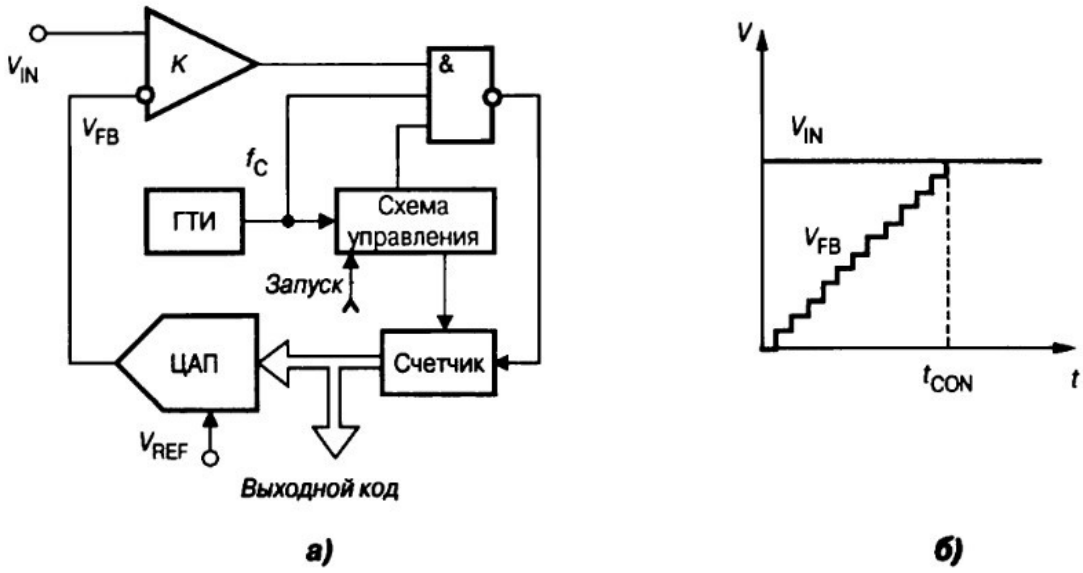


Схема 9.5	Структура АЦП последовательного счета (а) и временная диаграмма процесса преобразования (b).
Контрольные вопросы и задания	
1	Каково исходное состояние выхода компаратора?
2	Каковы функции блока счетчика?
3	Каково назначение сигнала, поступающего и элемента "И-НЕ" на счетчик?
4	В чем особенность скорости работы АЦП такой схемы?

Для заметок

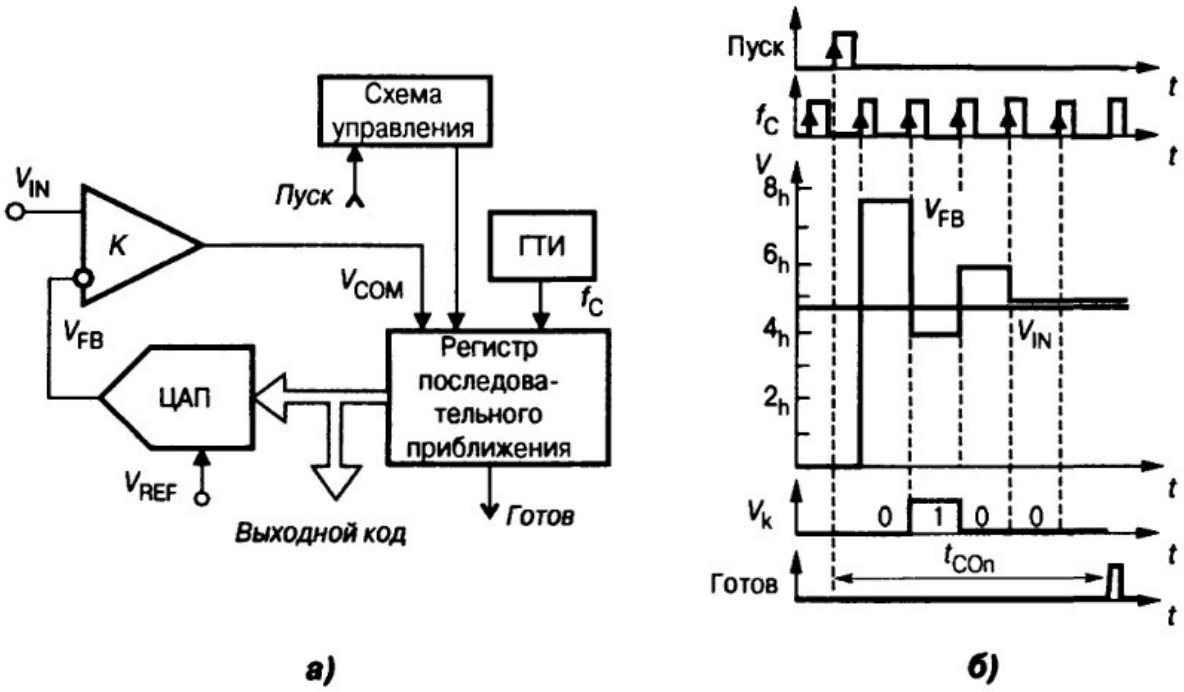


Схема 9.6	Структура АЦП последовательного приближения (a) и временная диаграмма его работы (b).
Контрольные вопросы и задания	
1	Дайте объяснение термину "АЦП с поразрядным уравновешиванием".
2	Какой выигрыш в числе шагов сравнения дает данная схема по отношению к схеме АЦП последовательного счета?
3	Опишите алгоритм формирования очередного уровня напряжения на выходе ЦАП.
4	Как нейтрализуется неопределенность апертурного времени?

Для заметок

Аналого-цифровые преобразователи

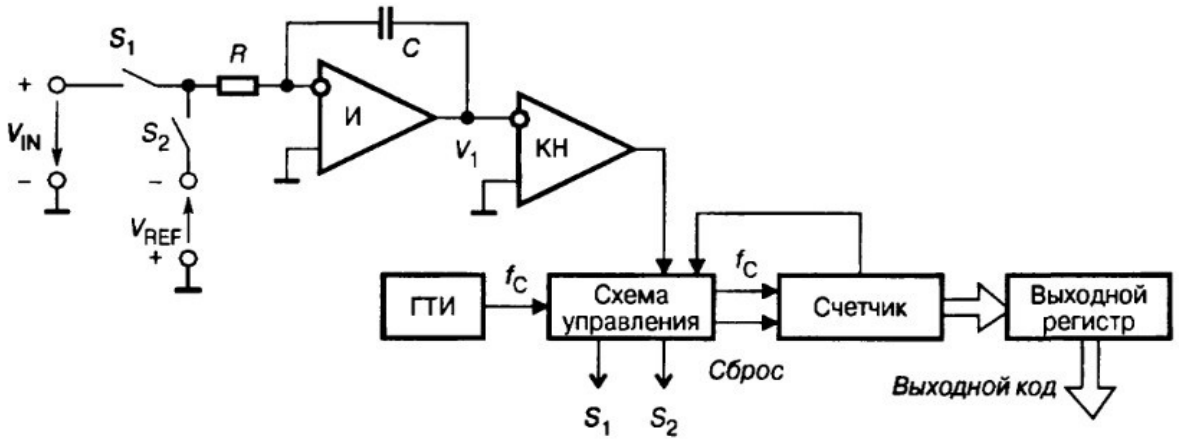


Схема 9.7	АЦП двухтактного интегрирования (упрощено).
Контрольные вопросы и задания	
1	Каковы особенности и область применения интегрирующих АЦП?
2	Опишите последовательность событий в стадии интегрирования и в стадии счета.
3	Как выбирается полярность опорного напряжения?
4	Каковы особенности амплитудно-частотной характеристики такого типа АЦП?

Для заметок

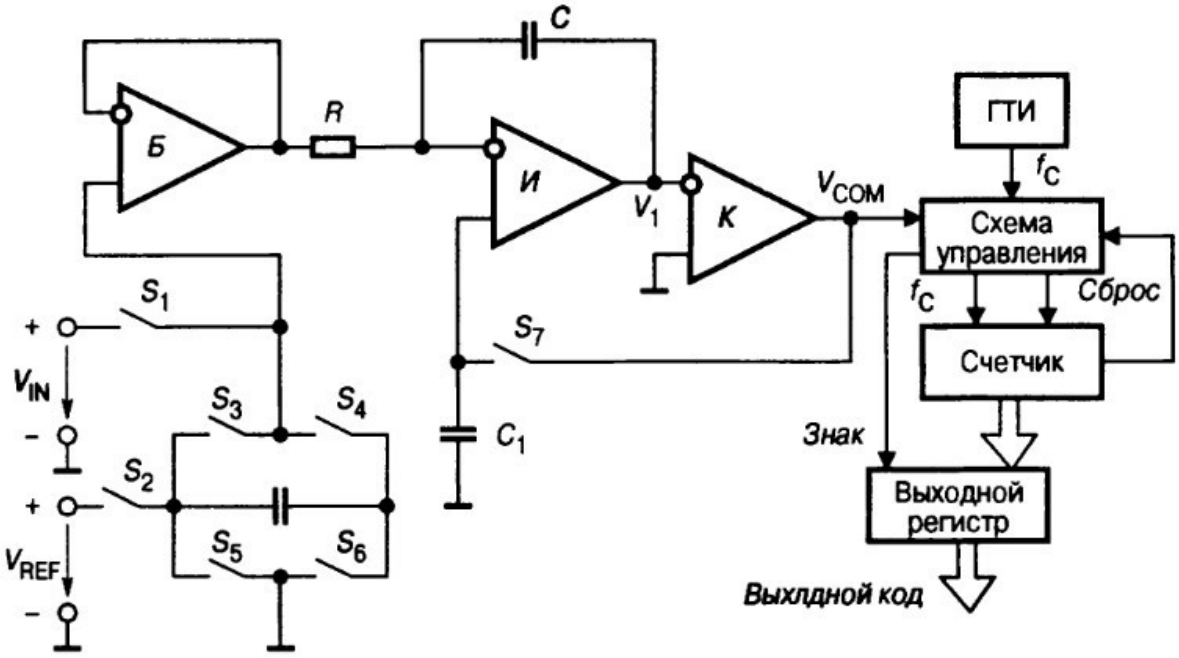
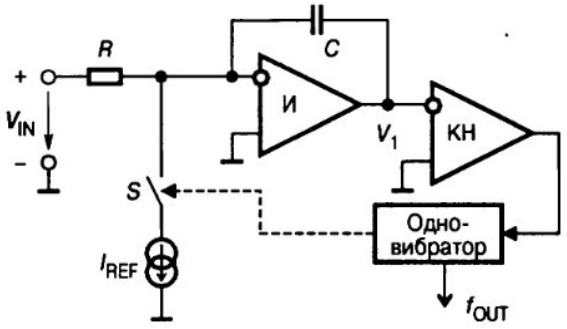


Схема 9.8	АЦП двухтактного интегрирования с автоматической компенсацией смещения нуля.
Контрольные вопросы и задания	
1	Какой дополнительный цикл имеется в работе такого АЦП?
2	Укажите на схеме цепь отрицательной обратной связи, используемой в фазе установки нуля.
3	Составьте самостоятельно таблицу состояний ключей схемы в разных фазах ее работы.
4	Какой потенциал устанавливается на конденсаторе С1 к окончанию фазы коррекции нуля?

Для заметок

Аналого-цифровые преобразователи



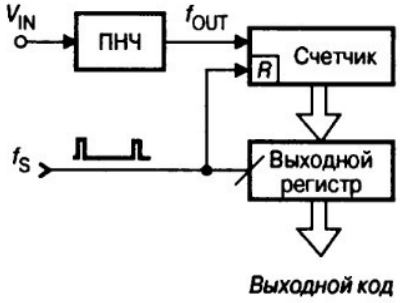


Схема 9.9	Преобразователь напряжение-частота (слева) и структура АЦП на его основе (справа).
Контрольные вопросы и задания	
1	Опишите работу преобразователя, изображенного на рисунке.
2	Как связаны длительность импульса одновибратора и последующее время разряда интегратора при фиксированном входном напряжении?

Для заметок