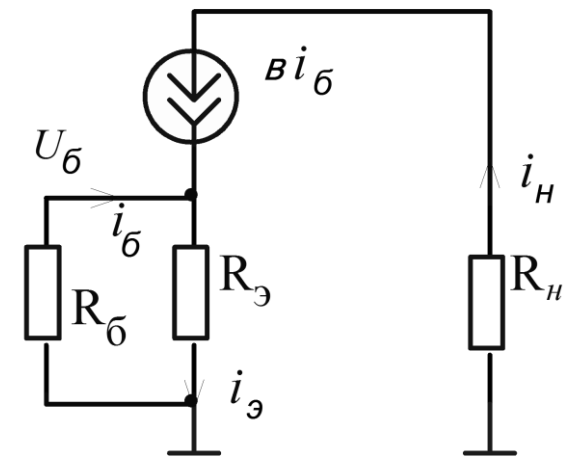
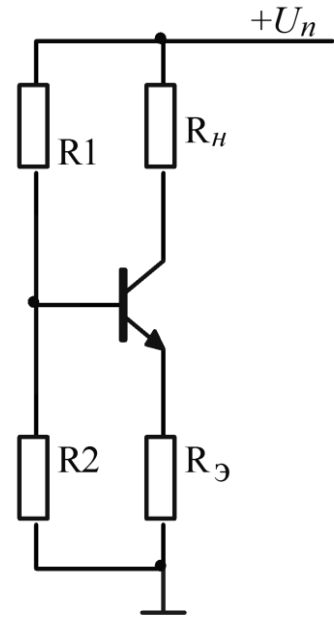


# Операционный усилитель. Импульсные преобразователи.

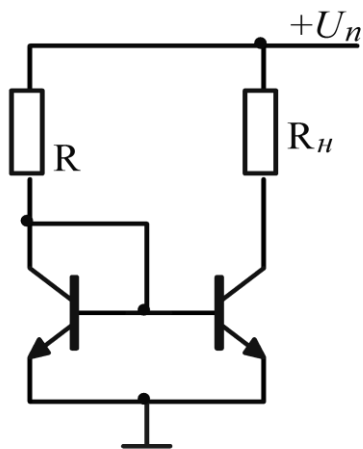
# Генератор тока на транзисторе

$$I_H = \beta I_6 \approx \beta \frac{U_6 - 0,7}{R_6 + R_3(\beta + 1)}$$

$$R_6 \approx \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad U_6 \approx \frac{U_{\Pi} R_2}{R_1 + R_2}$$



## Токовое зеркало



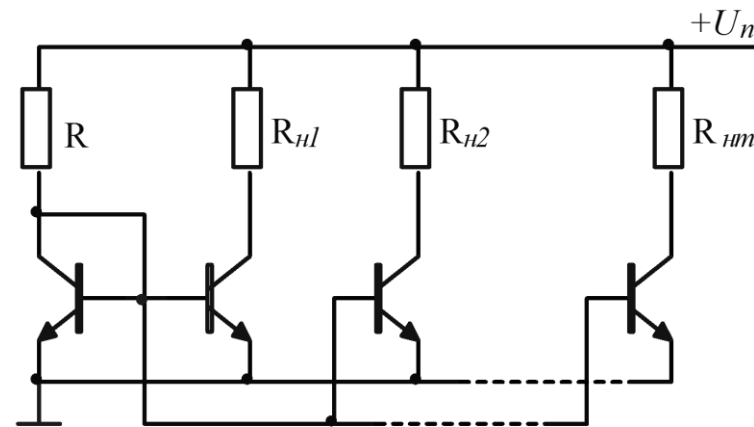
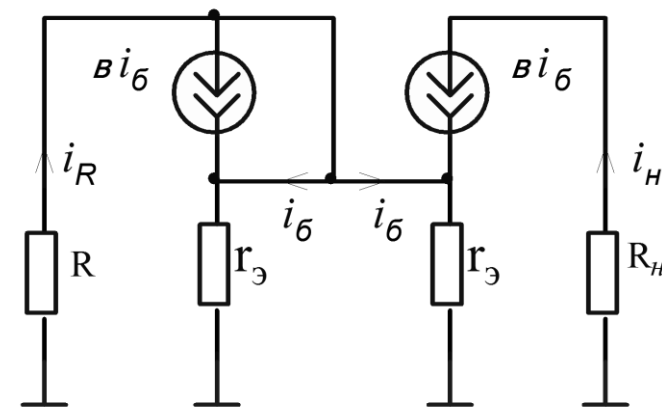
$$I_{\text{с}1} = I_{\text{с}2} = I_{\text{с}}$$

$$I_R = \beta I_{\text{с}} + 2I_{\text{с}},$$

$$I_{\text{H}} = \beta I_{\text{с}} = \frac{\beta}{\beta + 2} I_R \approx I_R$$

$$R_{\text{H}} = \frac{U_K - U_{\text{нас}}}{I_{\text{H}}}, \quad U_{\text{нас}} = 0,2 \div 0,3V$$

$$\frac{I_{\text{H}}}{I_R} = \frac{\beta m}{\beta + m + 1}$$



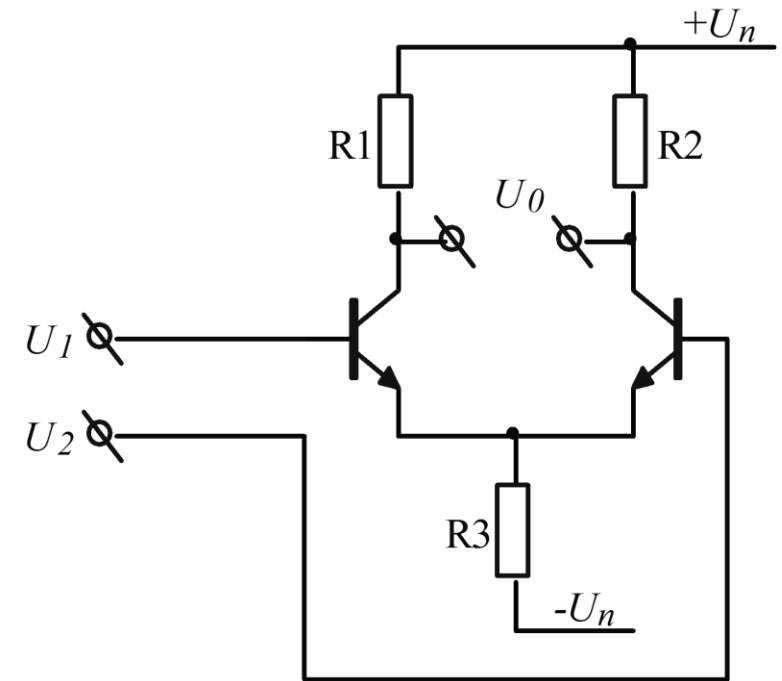
## Дифференциальный каскад

$$U_0 = K_U(U_1 - U_2) = \frac{R1}{R_3}(U_1 - U_2)$$

Для синфазного сигнала:  $K_U = \frac{R1}{2R3+r_3}$

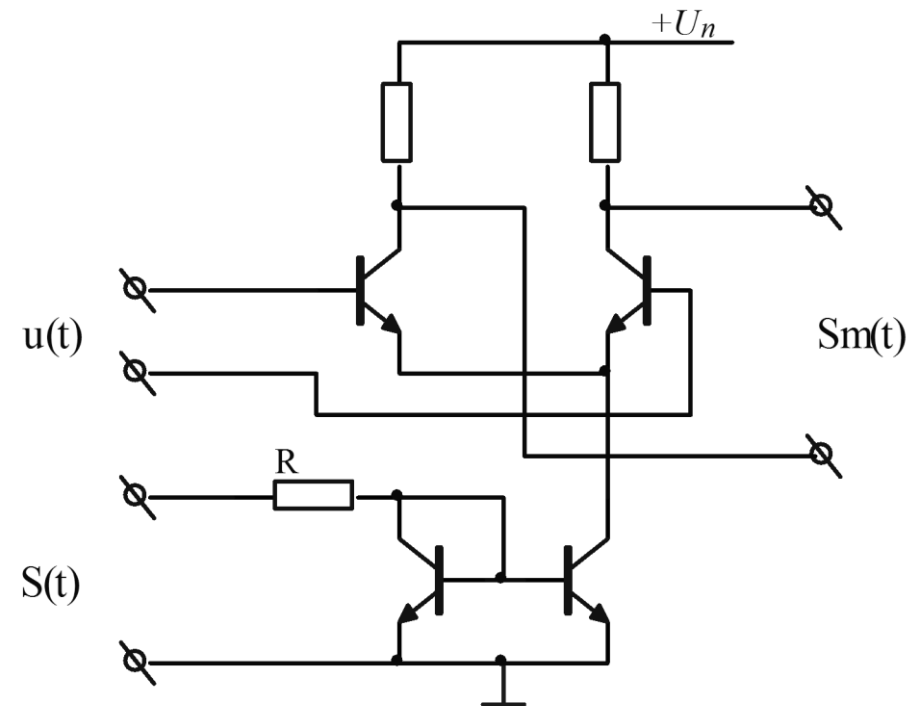
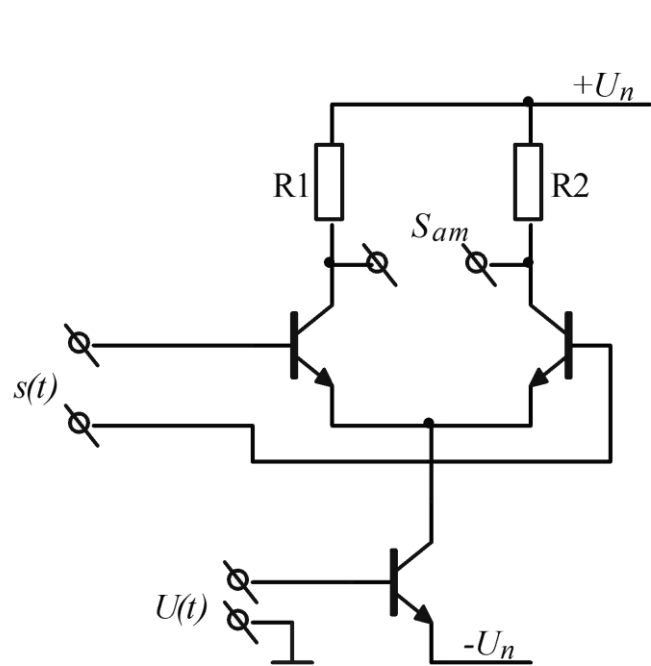
Для противофазного сигнала:  $K_U = \frac{R1}{r_3}$

$$R_{BX} = (\beta + 1)(R3 + r_3)$$

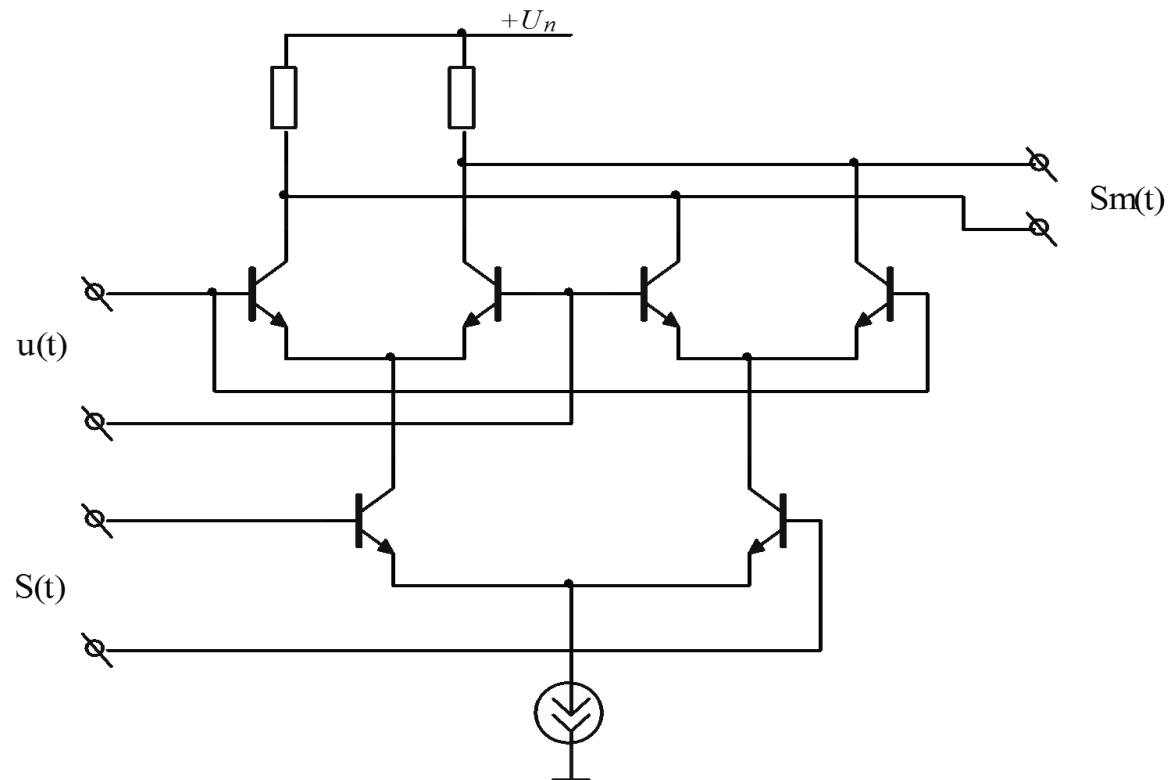


# Применение дифференциальных каскадов и генераторов тока

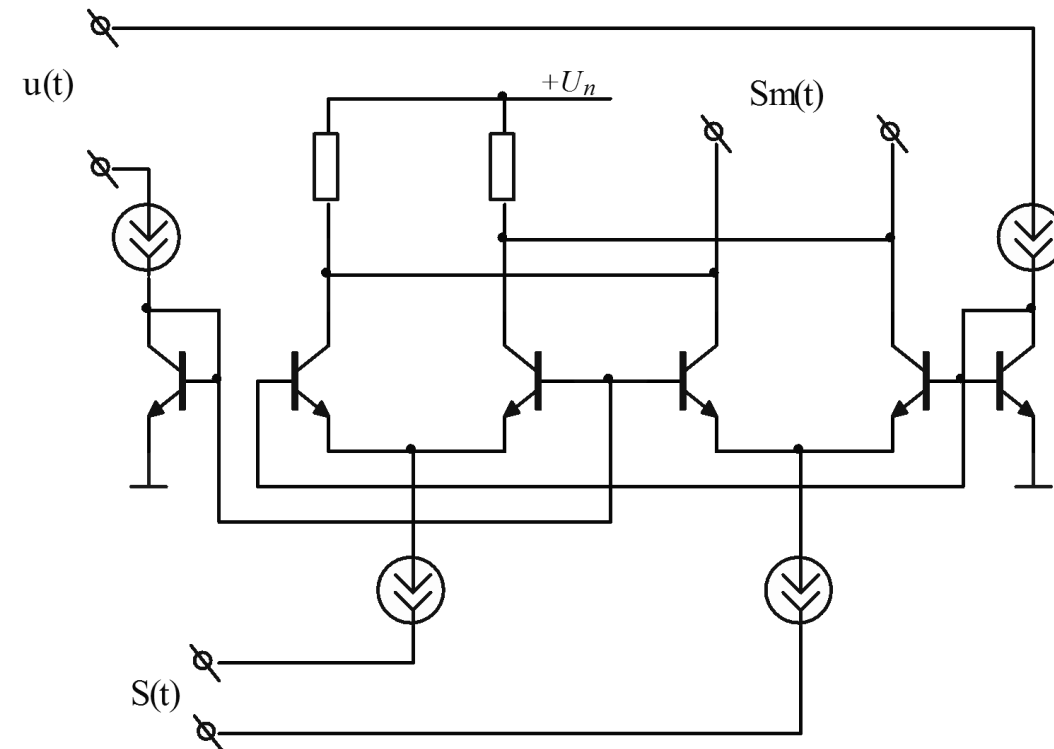
## Модуляторы (аналоговые умножители сигналов) на основе дифференциальных каскадов



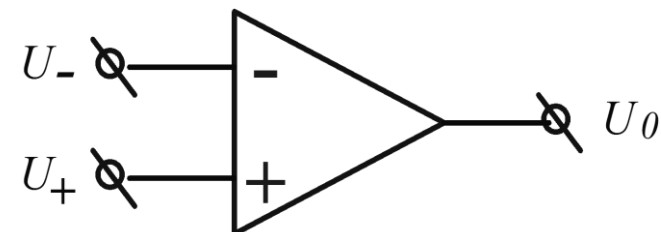
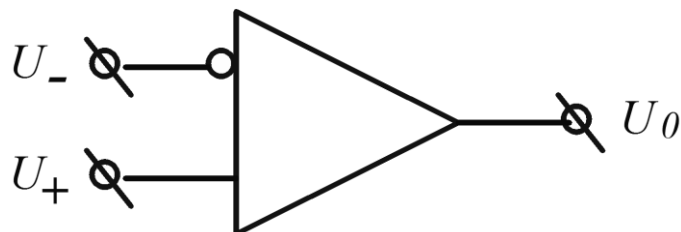
## Ячейка Джонса



## Ячейка Гильберта



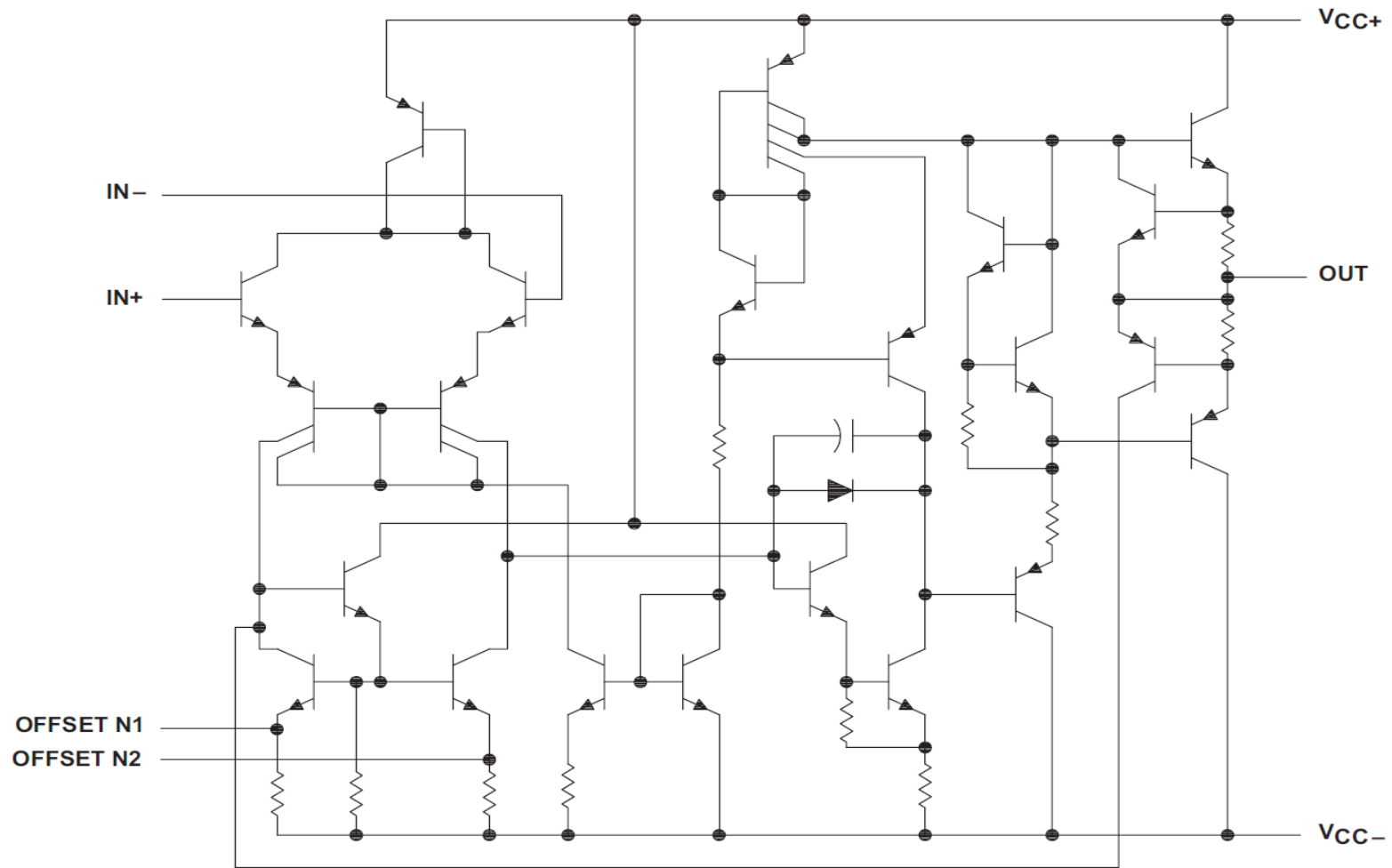
## Операционные усилители



$$U_0 = G_{openloop}(U_+ - U_-)$$

- Коэффициент усиления с разомкнутой петлёй обратной связи нормируется в очень широких пределах (зависит от частоты сигнала, температуры и т.д.).
- Коэффициент усиления велик и не регулируется.
- Точка отсчёта входного и выходного напряжений не поддаётся регулировке.

# Внутренняя структура ОУ $\mu A741$





## Идеальная модель операционного усилителя

- Бесконечно большой коэффициент усиления с разомкнутой петлей обратной связи. (Внутренние параметры не влияют на коэффициент передачи)
- Бесконечно большое входное сопротивление входов  $V_-$  и  $V_+$ . (Ток, протекающий между входами, равен нулю).
- Нулевое выходное сопротивление выхода ОУ. (Идеальный источник ЭДС)
- Способность выставить на выходе любое значение напряжения.
- Бесконечно большая скорость нарастания напряжения на выходе ОУ.
- Бесконечная полоса пропускания.

Отрицательная обратная связь поддерживает одинаковое напряжение на входах идеального ОУ (*это не является свойством операционного усилителя!*):

$$U_+ = U_-$$

## Отличия реальных ОУ от идеального

### Параметры по постоянному току

- **Ограниченное усиление:** коэффициент усиления не бесконечен ( $10^5 \div 10^6$  на постоянном токе).
- **Ненулевой входной ток** (ограниченное входное сопротивление): типичные значения входного тока составляют  $10^{-9} \div 10^{-12}$  А.
- **Ненулевое выходное сопротивление.**
- **Ненулевое напряжение смещения:** Типичные значения  $U_{см}$  составляют  $10^{-3} \div 10^{-6}$  В.
- **Ненулевое усиление синфазного сигнала.** Данный эффект определяется параметром *коэффициент ослабления синфазного сигнала*. Типичные значения:  $10^4 \div 10^6$ .

## Отличия реальных ОУ от идеального

### Параметры по переменному току

- **Ограниченная полоса пропускания.**
- **Ненулевая входная ёмкость.** Образует паразитный фильтр нижних частот.
- **Ненулевая задержка сигнала.** Данный параметр, косвенно связанный с ограничением полосы пропускания, может ухудшить действие ООС при повышении рабочих частот.
- **Насыщение** — ограничение диапазона возможных значений выходного напряжения. Обычно выходное напряжение не может выйти за пределы напряжения питания.
- **Ненулевое время восстановления после насыщения .**
- **Ограниченная скорость нарастания.** Скорость изменения выходного напряжения измеряется в вольтах за микросекунду, типичные значения  $1 \div 100$  В/мкс.

## Отличия реальных ОУ от идеального

- **Ограниченное выходное напряжение.** У любого ОУ потенциал на выходе не может быть выше, чем потенциал положительной шины питания и не может быть ниже, чем потенциал отрицательной шины питания (в случае, если нагрузка отсутствует, или является резистивной и не содержит источник тока).
- **Ограниченный выходной ток.** Большинство ОУ широкого применения имеют встроенную защиту от превышения выходного тока. Защита предотвращает перегрев и выход ОУ из строя.
- **Ограниченная выходная мощность.** Большинство ОУ предназначено для применений, не требовательных к мощности: сопротивление нагрузки не должно быть менее  $1 - 2 \text{ кОм}$ .

# Расчет цепи с использованием идеальной модели ОУ

## Неинвертирующий усилитель

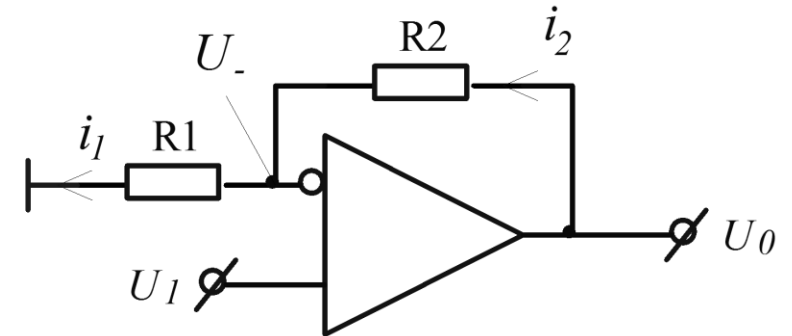
Задачи с операционными усилителями рассматриваются с использованием (если не сказано иное) следующих допущений – выходное сопротивление источника сигнала равно нулю, сопротивление нагрузки бесконечно, ОУ представлен идеальной моделью.

Согласно свойствам идеальной модели и первому правилу Кирхгофа:

$$U_- = U_+ = U_1$$

$$i_2 - i_1 = 0, \quad \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_0 - U_1}{R_2}$$

$$U_0 = U_1 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$



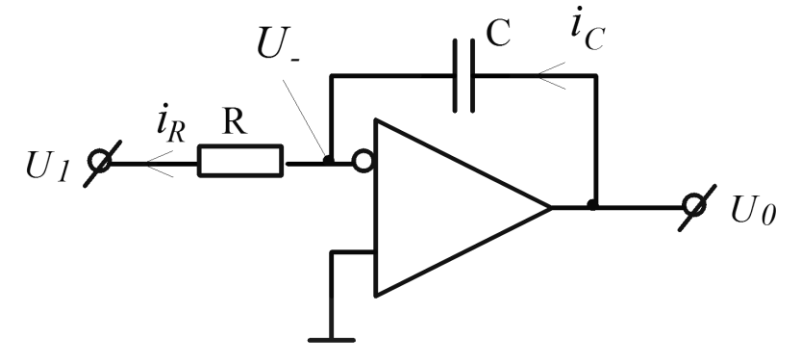
# Расчет цепи с использованием идеальной модели ОУ

## Интегратор

$$U_- = U_+ = 0$$

$$i_2 - i_1 = 0, \quad \frac{0 - U_1}{R} = C \frac{dU_c}{dt} = C \frac{dU_0}{dt}$$

$$U_0 = -\frac{1}{RC} \int U_1 dt$$

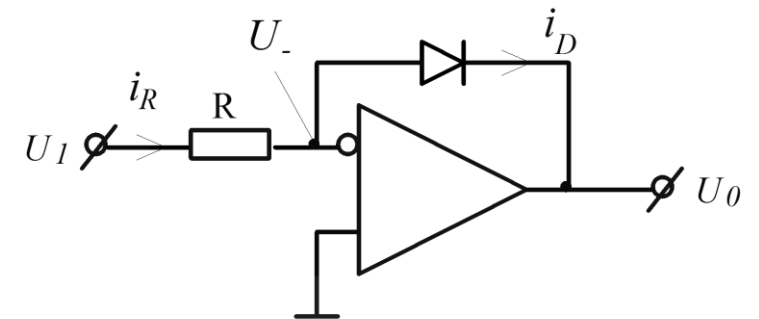


## Логарифмический усилитель

$$U_- = U_+ = 0$$

$$i_1 - i_D = 0, \quad \frac{U_1}{R} = I_0 \left[ \exp \frac{-U_0}{\varphi_T} - 1 \right]$$

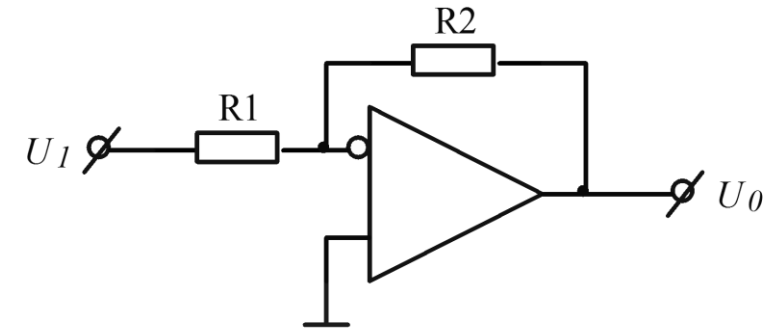
$$U_0 = -\varphi_T \ln \left( 1 + \frac{U_1}{I_0 R} \right)$$



## Схемы с использованием ОУ

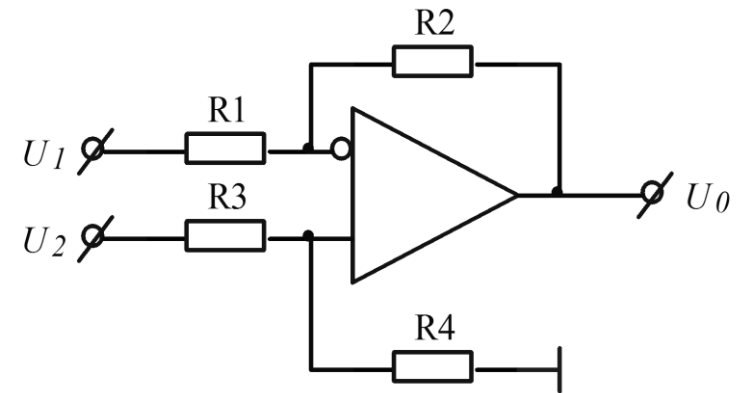
Инвертирующий усилитель

$$U_0 = -U_1 \frac{R_2}{R_1}$$



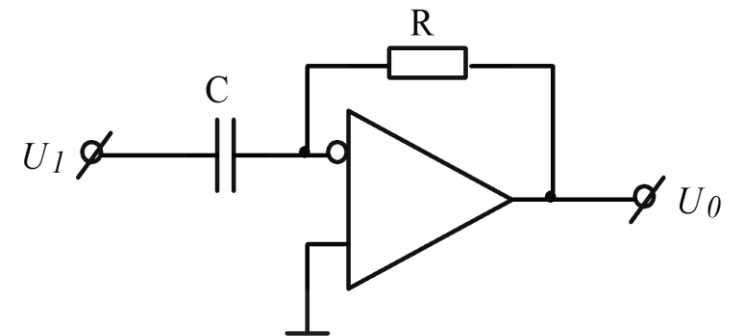
Дифференциальный усилитель

$$U_0 = -U_1 \frac{R_2}{R_1} + U_2 \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$



Дифференциатор

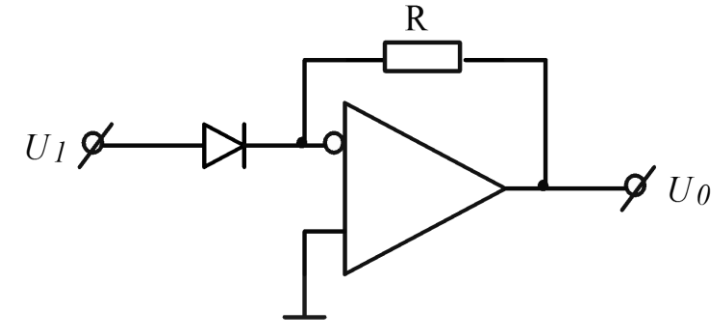
$$U_0 = -RC \frac{dU_1}{dt}$$



## Схемы с использованием ОУ

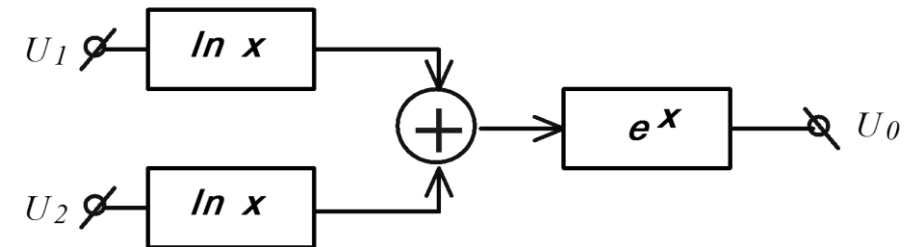
### Экспоненциальный усилитель

$$U_0 = -RI_0 \left( e^{\frac{U_1}{\phi_T}} - 1 \right)$$



### Аналоговый умножитель напряжений

$$U_0 = U_1 \cdot U_2 = e^{(\ln U_1 + \ln U_2)}$$

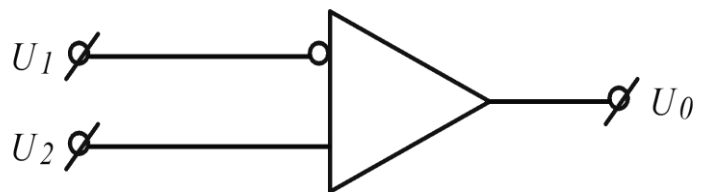




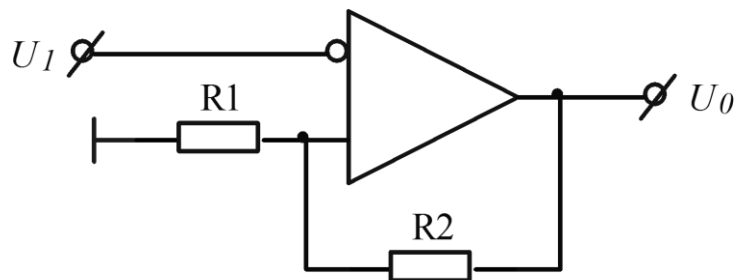
# Компараторы

$$U_0 = +U_s, U_1 < U_2$$

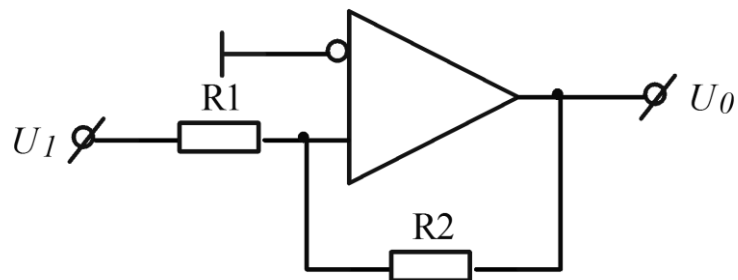
$$U_0 = -U_s, U_1 > U_2$$



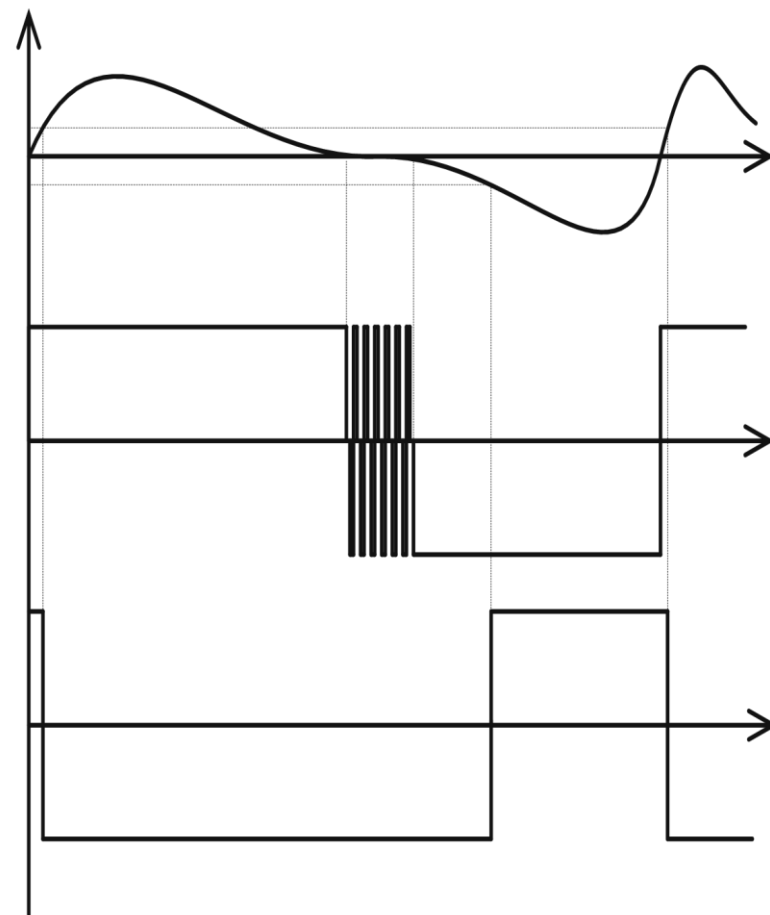
Инвертирующий и не инвертирующий триггер Шмидта



$$U_{\Pi} = \pm U_s \frac{R1}{R1 + R2},$$



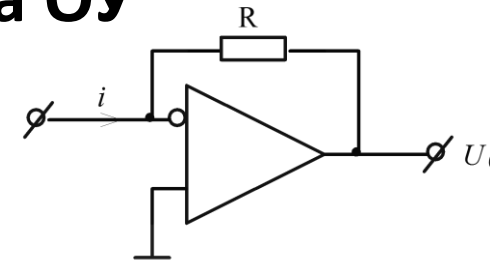
$$U_{\Pi} = \pm U_s \frac{R1}{R2}$$



# Управляемые источники напряжения и тока на ОУ

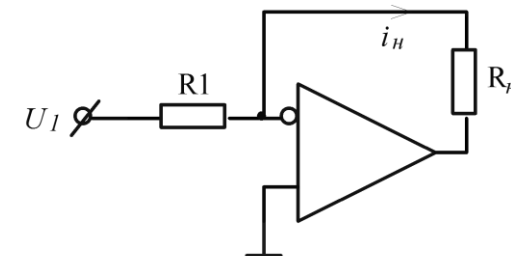
Источник напряжения управляемый током:

$$U_0 = iR$$



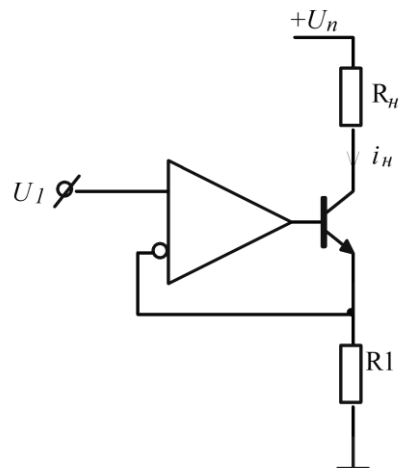
Источник тока управляемый напряжением:

$$i_H = \frac{U_1}{R_1}$$



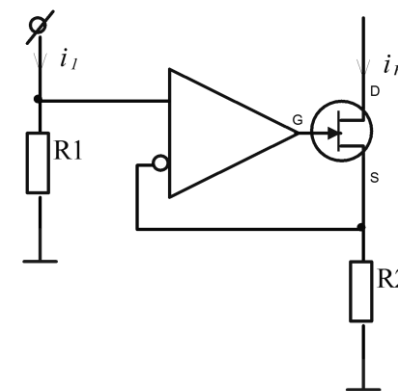
Эталонный источник тока:

$$i_H = \frac{U_1}{R_1} \frac{\beta}{\beta + 1}$$



Токовое зеркало:

$$i_H = \frac{R_1}{R_2} i_1$$



# Преобразователи энергии

Типы преобразователей входным и выходным параметрам:

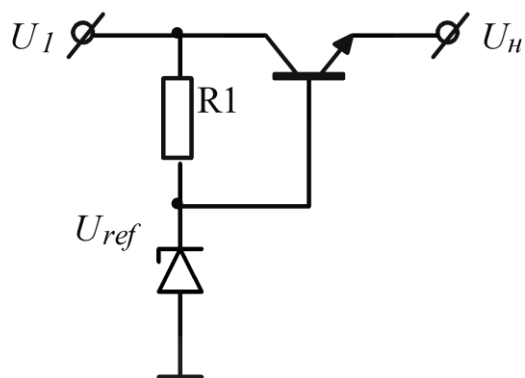
1. Преобразователи переменный ток – переменный ток (AC-AC).
2. Преобразователи переменный ток – постоянный ток (AC-DC).
3. Преобразователи постоянный ток – переменный ток (DC-AC).
4. Преобразователи постоянный ток – постоянный ток (DC-DC).

По принципу работы:

1. Выпрямители.
2. Линейные преобразователи.
3. Импульсные преобразователи.

# Линейные преобразователи

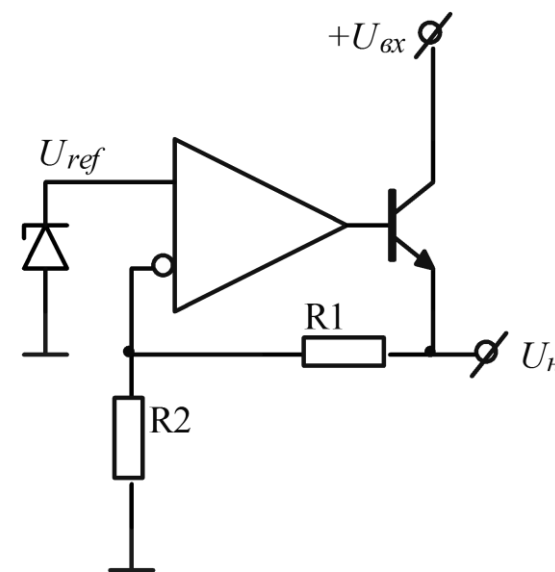
Линейные стабилизаторы для положительного напряжения:



$$U_H = U_{ref} - 0,7V$$

$$\text{Пульсации } \Delta U_H \approx \frac{r_{\text{диф}}}{R_1} U_1$$

$$U_H = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{ref}$$



# Импульсные преобразователи энергии

Если период функции равен  $T$  и длительность положительной части импульса равна  $\tau$

Коэффициент заполнения

$$S = \frac{1}{D} = \frac{T}{\tau}$$

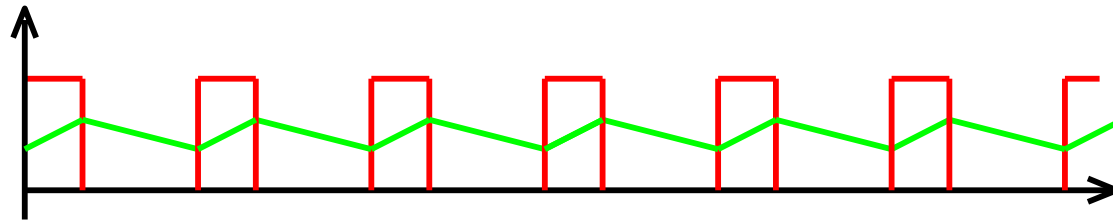
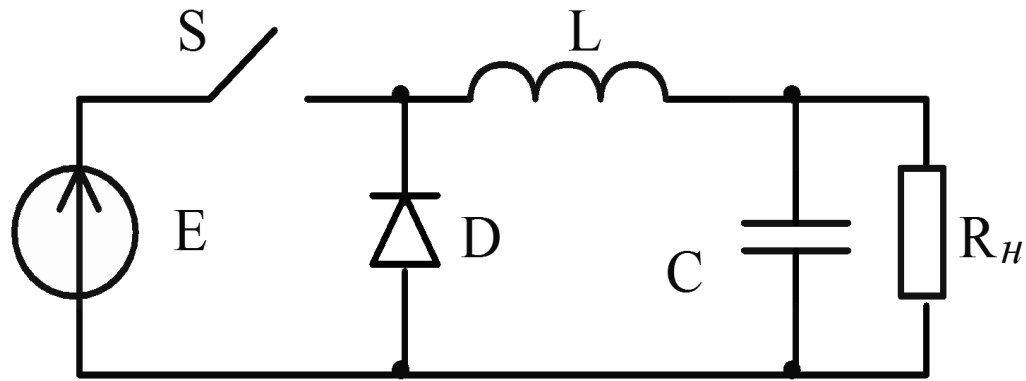
$D$  - коэффициент заполнения (Duty cycle)

$S$  - скважность.

# DC-DC - преобразователи

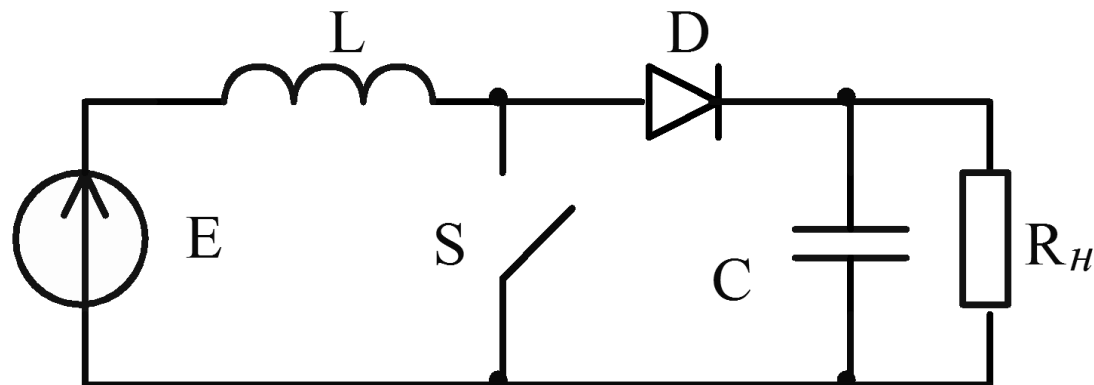
Основные типы преобразователей.

1. Понижающий преобразователь. (BUCK)



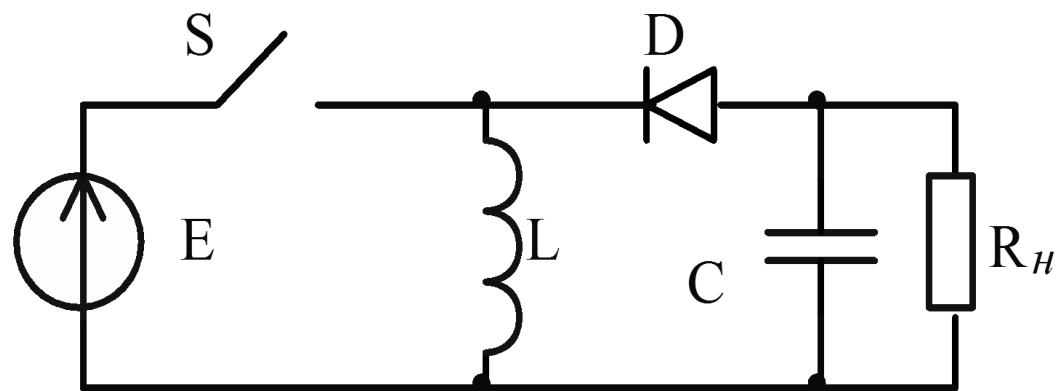
# DC-DC - преобразователи

## 2. Повышающий преобразователь. (BOOST)



## DC-DC - преобразователи

### 3. Инвертирующий преобразователь. (BUCK-BOOST)





## DC-DC - преобразователи

Метод *усреднения в пространстве состояний*:

метод составления усредненной системы уравнений с весовыми коэффициентами, определяемыми величиной коэффициента заполнения ( $D$  и  $(1 - D)$  соответственно), т.е. относительной длительностью существования каждой конфигурации за период рабочего цикла устройства.

Область использования метода:

если каждая из постоянных времени в существующих в цепи  $RC, L/R, 2\pi\sqrt{LC}$  на порядок и более превосходит длительность рабочего цикла устройства, т.е. период коммутации силового ключа.

Недостатки:

Полная потеря информации о пульсациях выходного значения величины.

## Понижающий преобразователь

При замкнутом состоянии ключа, по правилам Кирхгофа:

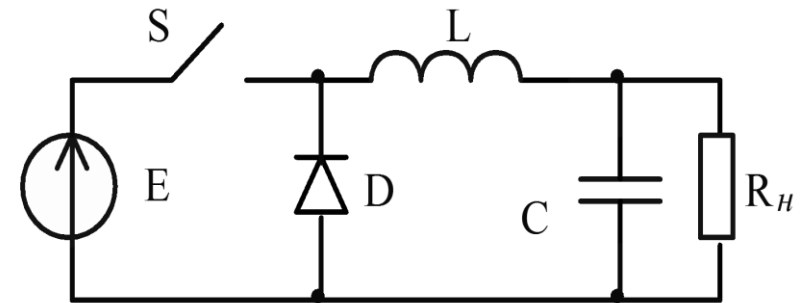
$$L \frac{di_L}{dt} = E - U_C$$

$$C \frac{dU_C}{dt} = i_L - \frac{U_C}{R}$$

Для разомкнутого состояния ключа:

$$L \frac{di_L}{dt} = -U_C$$

$$C \frac{dU_C}{dt} = i_L - \frac{U_C}{R}$$



## Понижающий преобразователь

Умножим обе части уравнений на соответствующие весовые коэффициенты и просуммируем:

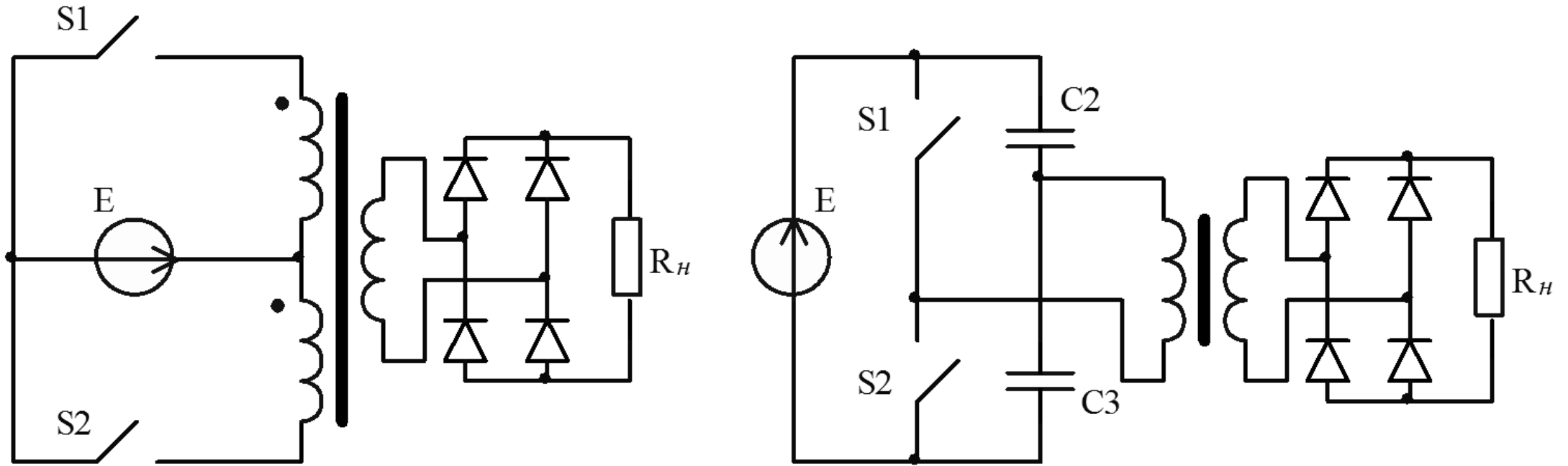
$$L \frac{di_L}{dt} (D + 1 - D) = (E - U_C)D + (-U_C)(1 - D) = ED - U_C$$

$$C \frac{dU_C}{dt} (D + 1 - D) = \left(i_L - \frac{U_C}{R}\right) D + \left(i_L - \frac{U_C}{R}\right) (1 - D) = i_L - \frac{U_C}{R}$$

Средние значения напряжения на емкости (нагрузке) и тока в индуктивности (при равенстве производных нулю – ток и напряжение не меняются):

$$U_C = ED , \quad i_L = \frac{U_C}{R}$$

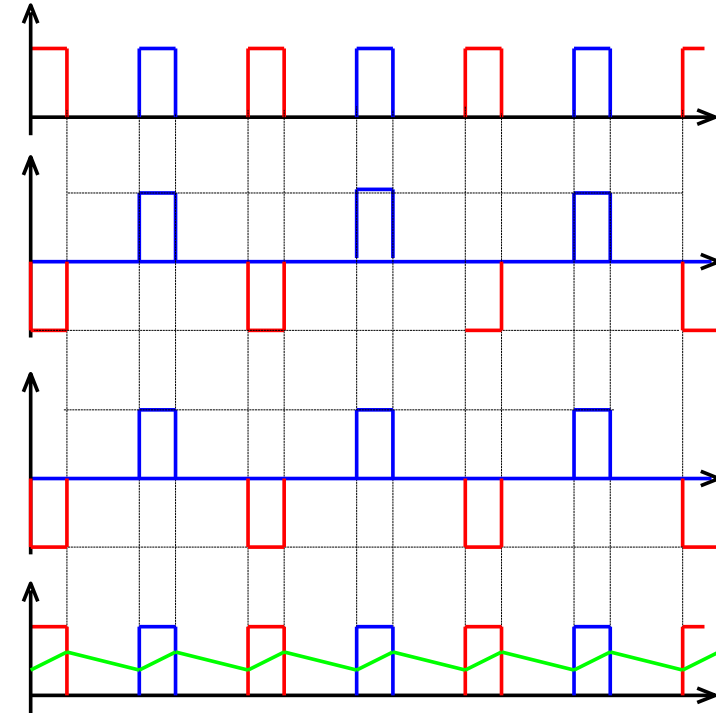
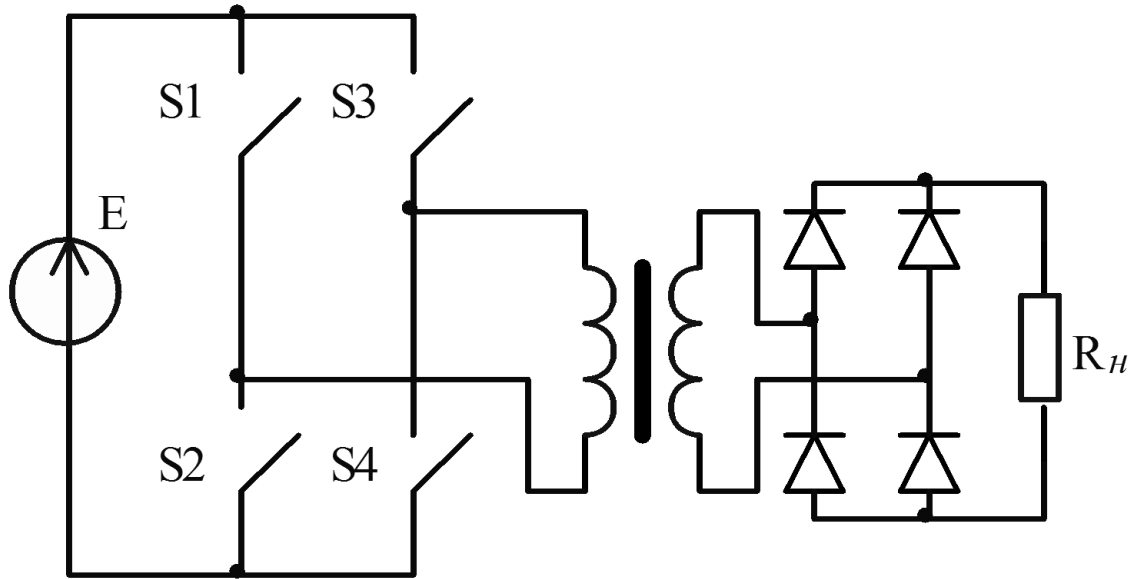
## Преобразователи с трансформаторной развязкой



Двухтактные преобразователи (передача энергии два раза за период). Слева преобразователь по топологии «тяги-толкай» (Push-Pull), справа полумост (Half Bridge). На следующем слайде полный мост (Full Bridge).

Амплитуда напряжения на первичных обмотках трансформатора для Push-Pull и Full Bridge равна  $E$ , а для полумоста  $E/2$ . Это легко увидеть при анализе работы.

## Преобразователи с трансформаторной развязкой



Выходное напряжение (зеленым) показано с условием присутствия фильтра, который на схеме не показан. Из графиков видно что анализ соответствует работе понижающего преобразователя, при условии  $D = \frac{2\tau}{T}$ , что эквивалентно удвоению частоты при сохранении длительности или удвоению длительности импульса при сохранении частоты.