

Аналоговая электроника и техника измерений.

Операционный усилитель.

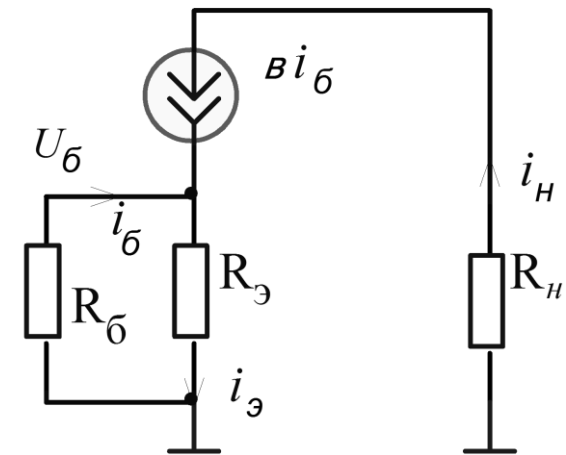
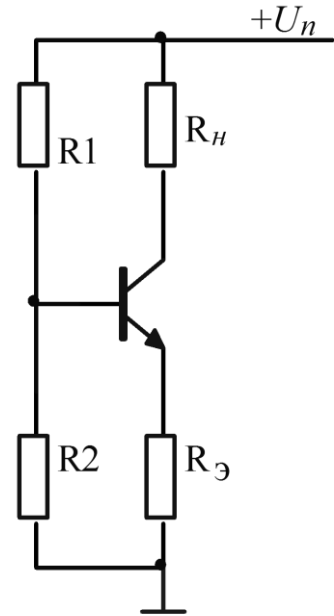
Применение операционных усилителей.

Импульсные преобразователи.

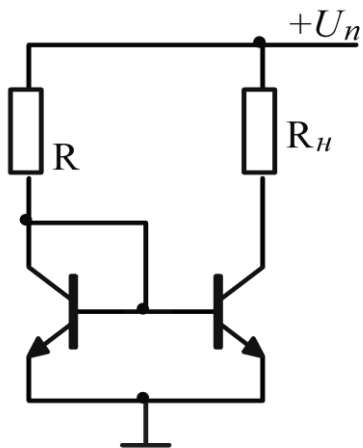
Генератор тока на транзисторе

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

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



Токовое зеркало



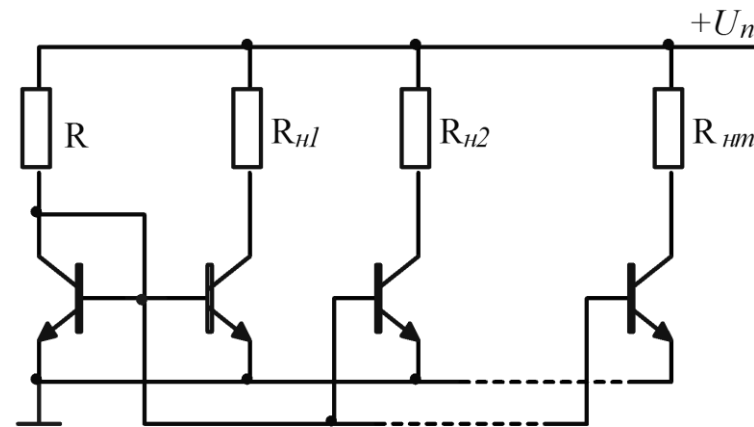
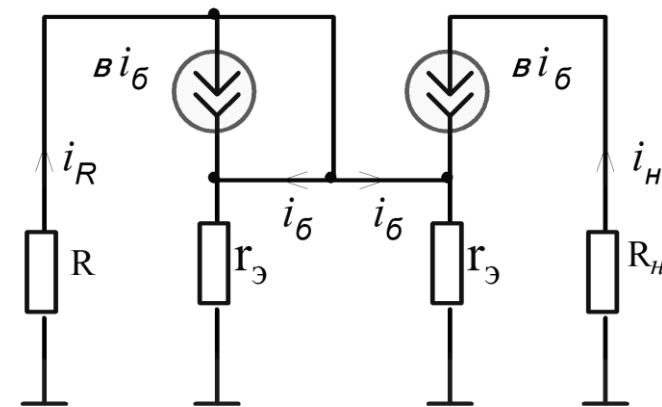
$$I_{\text{с1}} = I_{\text{с2}} = I_{\text{с}},$$

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

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

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

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



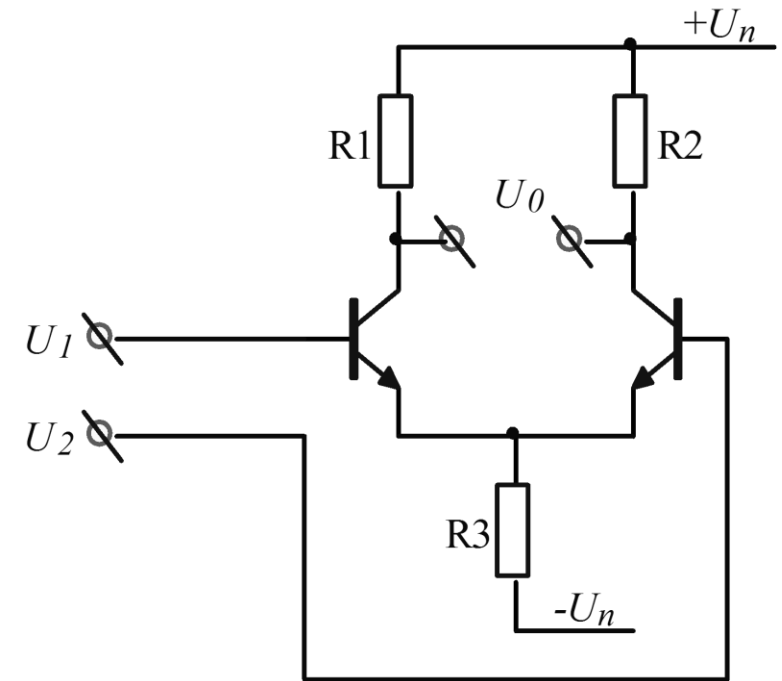
Дифференциальный каскад

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

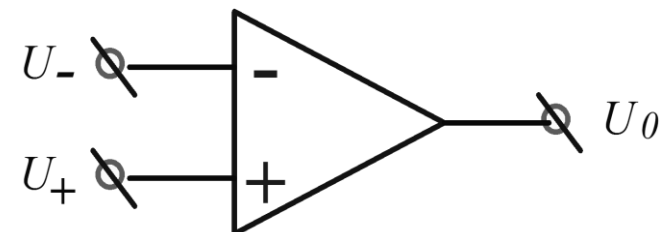
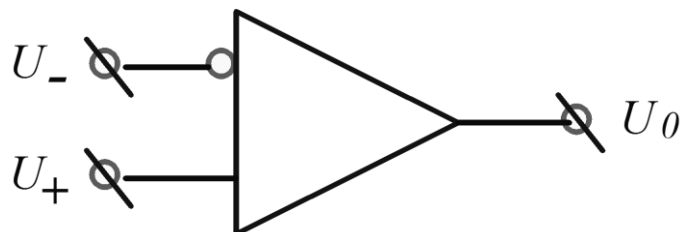
Для синфазного сигнала: $K_U = \frac{R1}{2R3+r_3}$

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

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



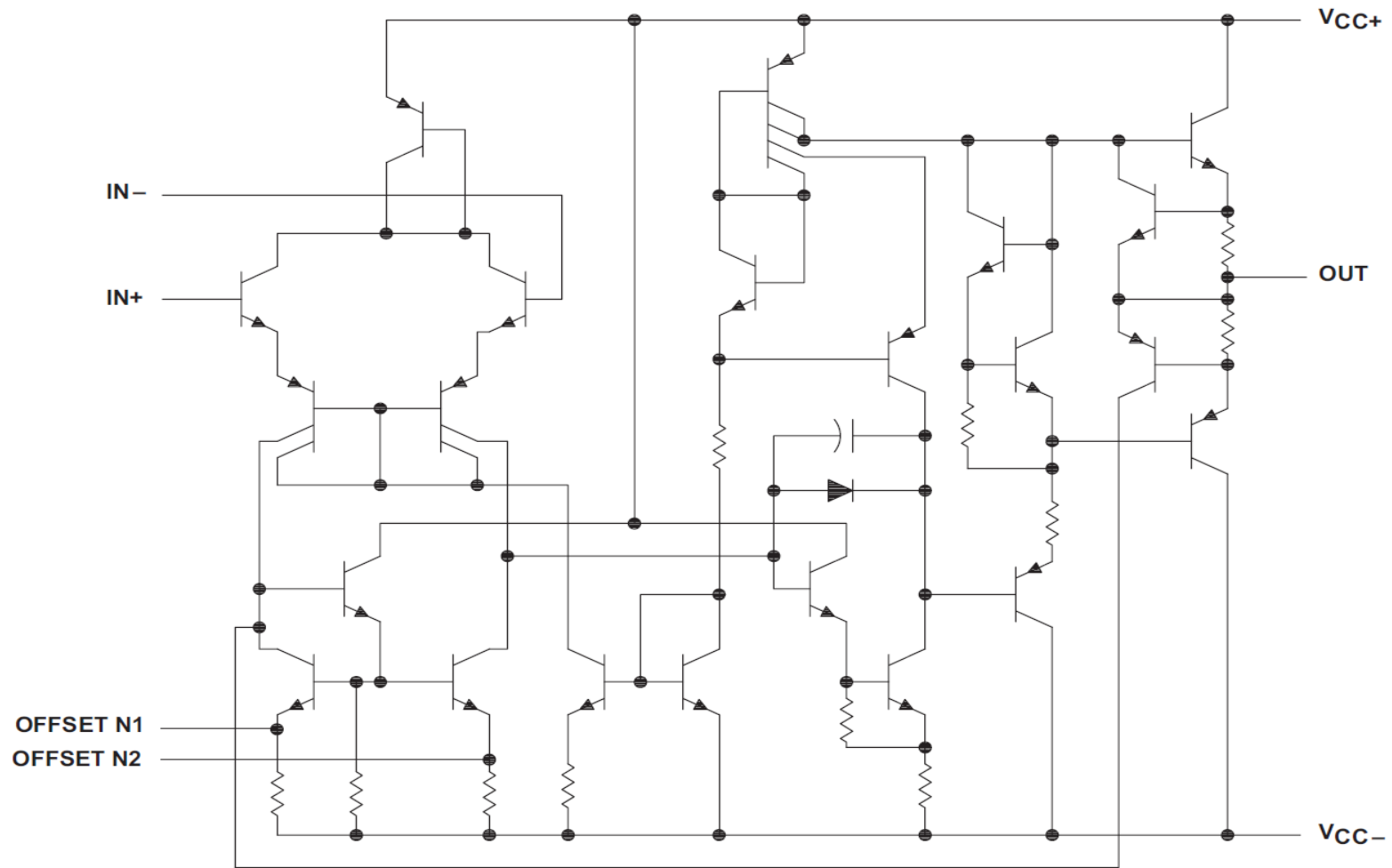
Операционные усилители



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

- 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 сигнала.

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

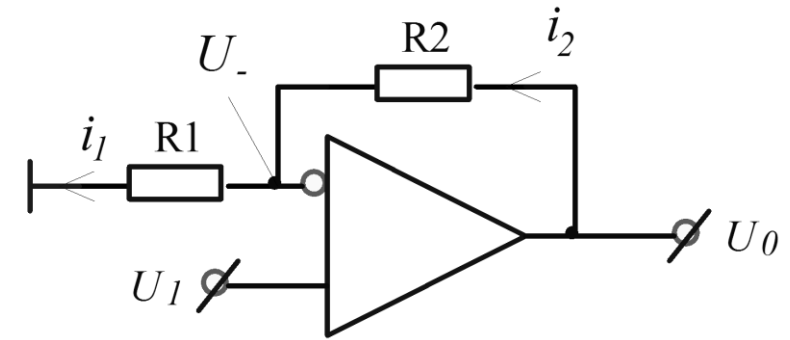
Задачи с операционными усилителями рассматриваются с использованием (если не сказано иное) следующих допущений – выходное сопротивление источника сигнала равно нулю, сопротивление нагрузки бесконечно, ОУ представлен идеальной моделью.

Согласно свойствам идеальной модели, наличию отрицательной обратной связи и первому правилу Кирхгофа:

$$U_- = U_+ = U_1$$

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

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



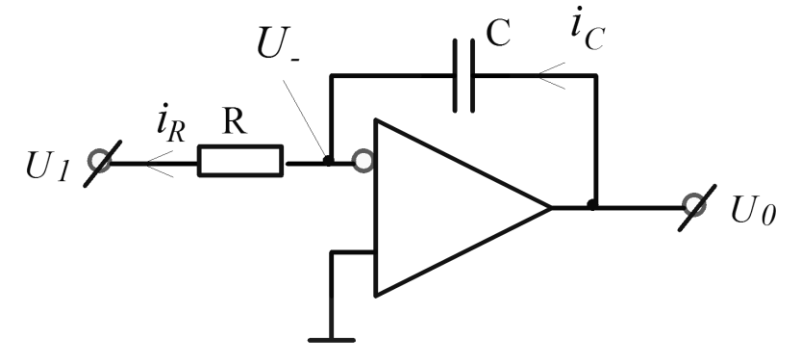
Расчет цепи с использованием идеальной модели ОУ

Интегратор

$$U_- = U_+ = 0$$

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

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

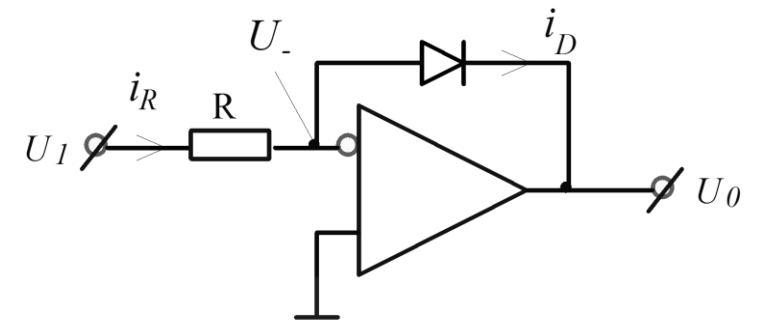


Логарифмический усилитель

$$U_- = U_+ = 0$$

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

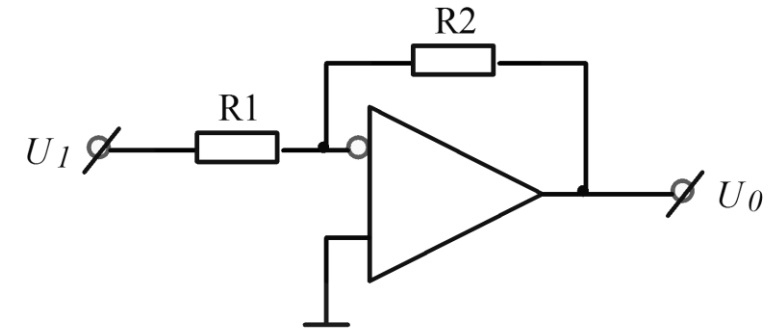
$$U_0 = -\varphi_T \ln \left(1 + \frac{U_1}{I_0 R} \right)$$



Схемы с использованием ОУ

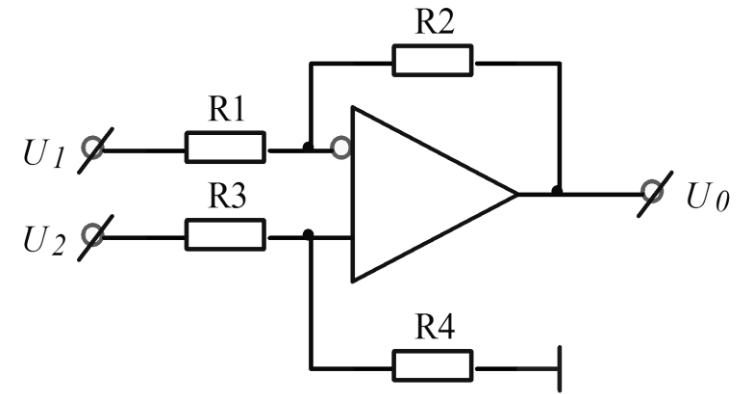
Инвертирующий усилитель

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



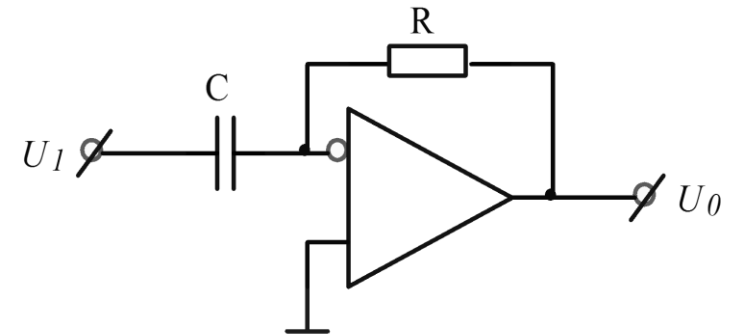
Дифференциальный усилитель

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



Дифференциатор

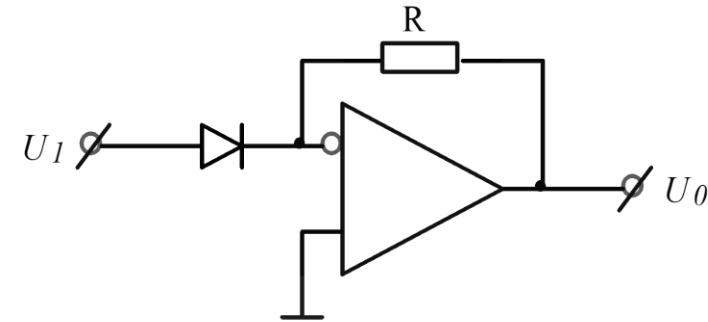
$$U_0 = -RC \frac{dU_1}{dt}$$



Схемы с использованием ОУ

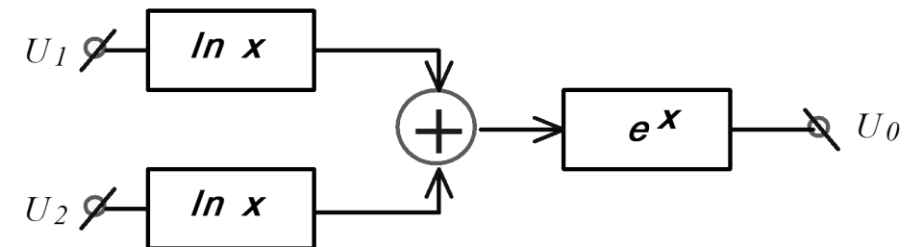
Экспоненциальный усилитель

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



Аналоговый умножитель напряжений

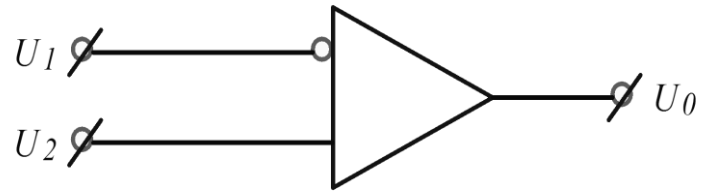
$$U_0 = U_1 \cdot U_2 = e^{(\ln U_1 + \ln U_2)}$$



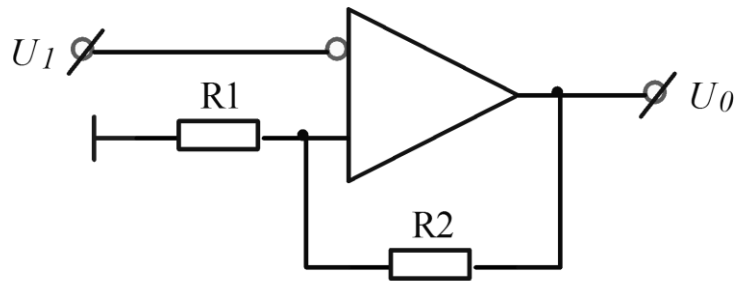
Компараторы

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

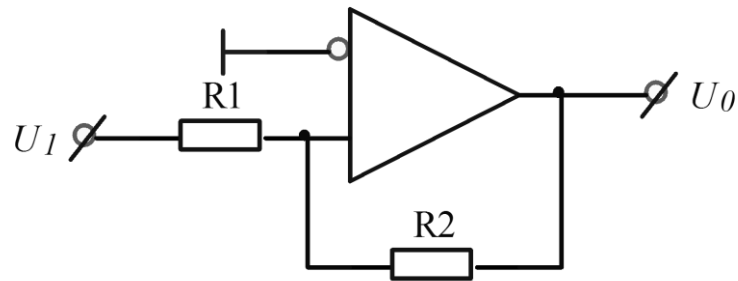
$$U_0 = -U_s, U_1 > U_2$$



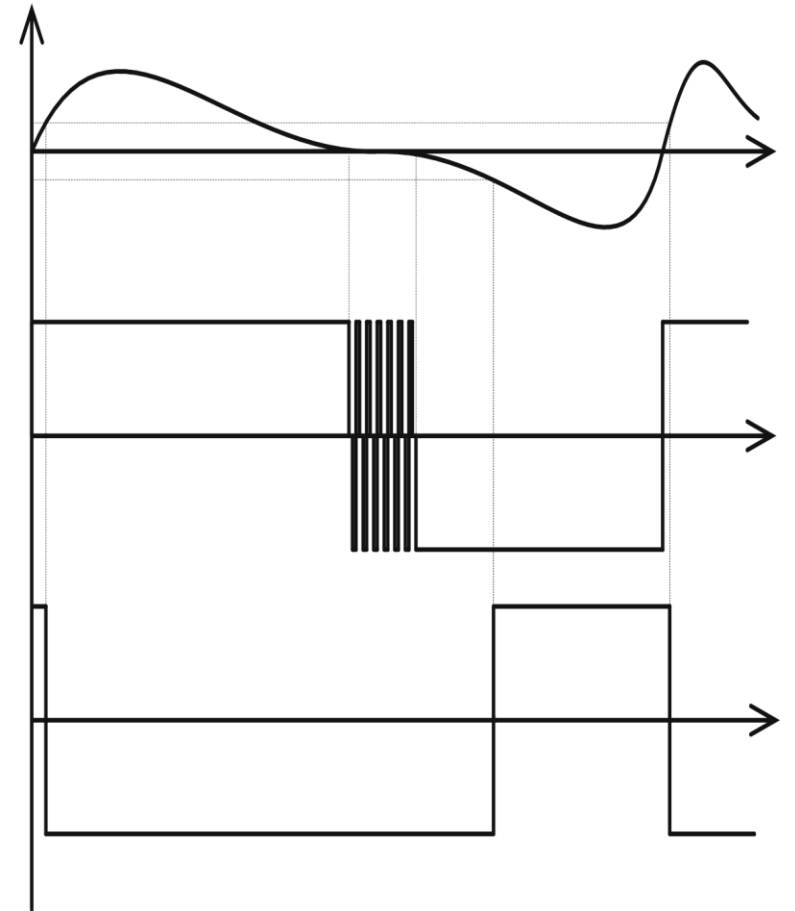
Инвертирующий и не инвертирующий триггер Шмидта



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



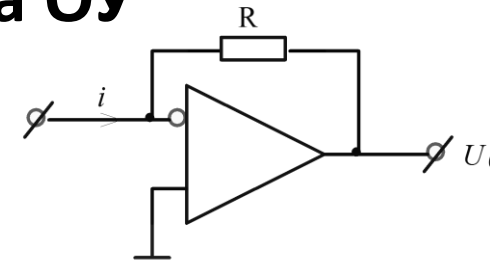
$$U_{\Pi} = \pm U_s \frac{R1}{R2}$$



Управляемые источники напряжения и тока на ОУ

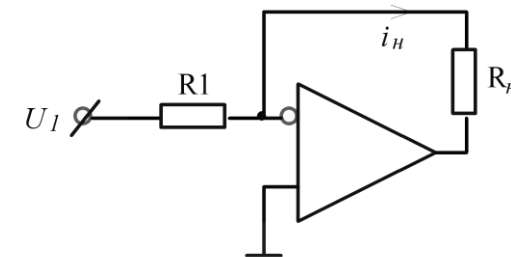
Источник напряжения управляемый током:

$$U_0 = iR$$



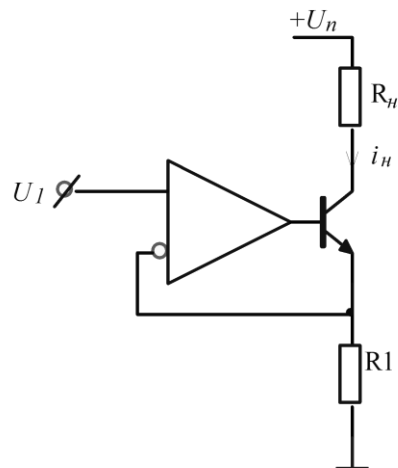
Источник тока управляемый напряжением:

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



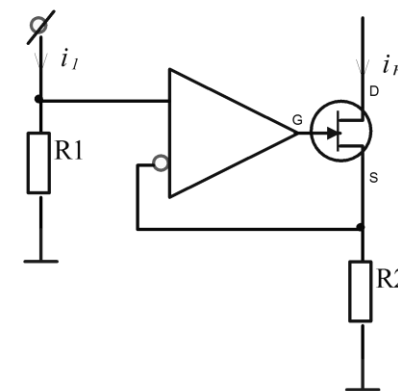
Эталонный источник тока:

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



Токовое зеркало:

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



Преобразователи энергии

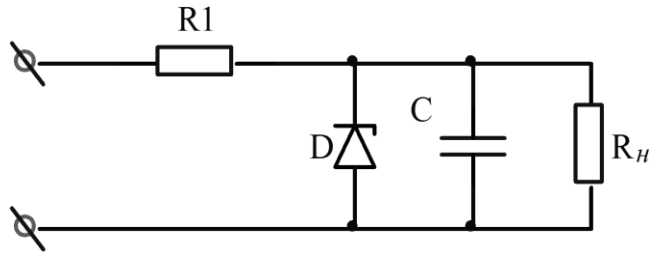
Типы преобразователей входным и выходным параметрам:

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).

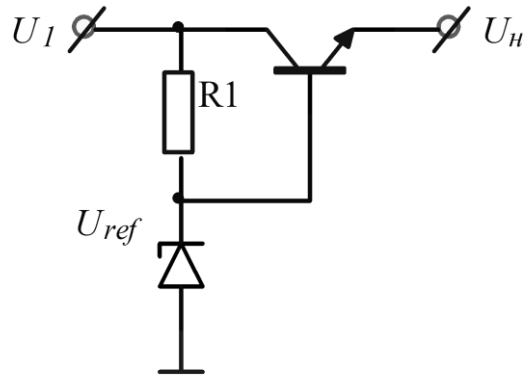
По принципу работы:

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

Линейные стабилизаторы для положительного напряжения



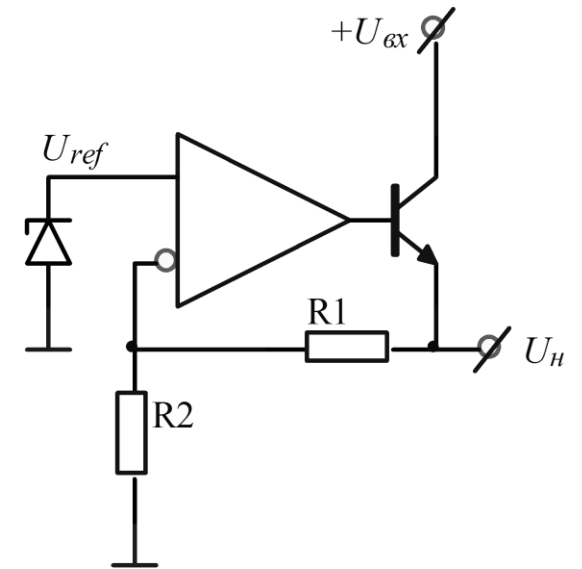
$$U_H \approx U_{ref}$$



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

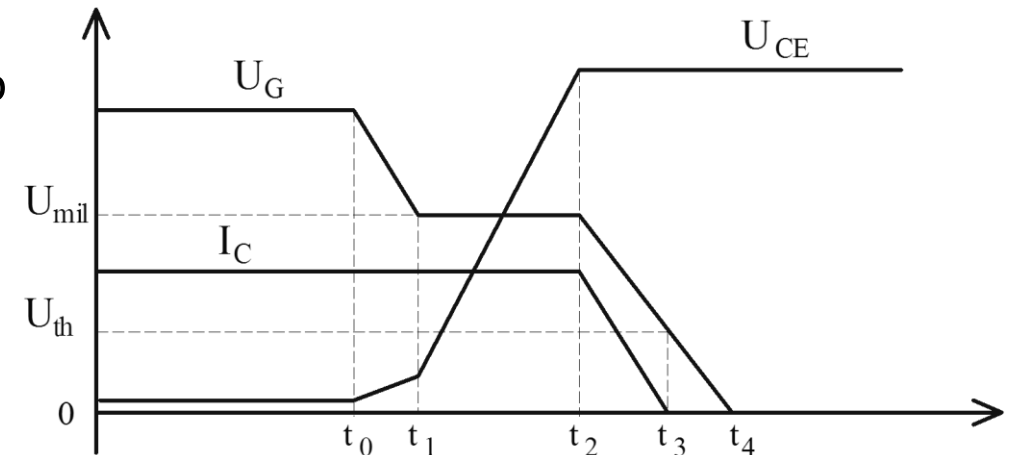
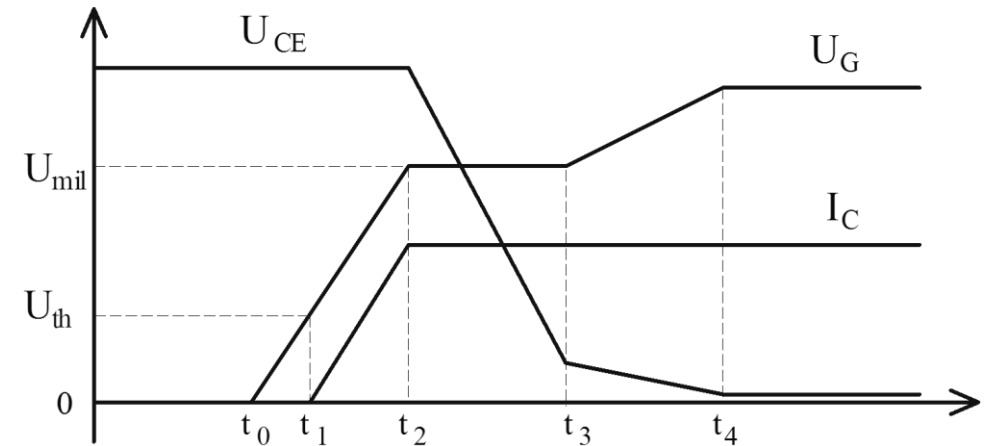
$$\text{Пульсации } \Delta U_H \approx \frac{r_{\text{диф}}}{R_1} U_1$$

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

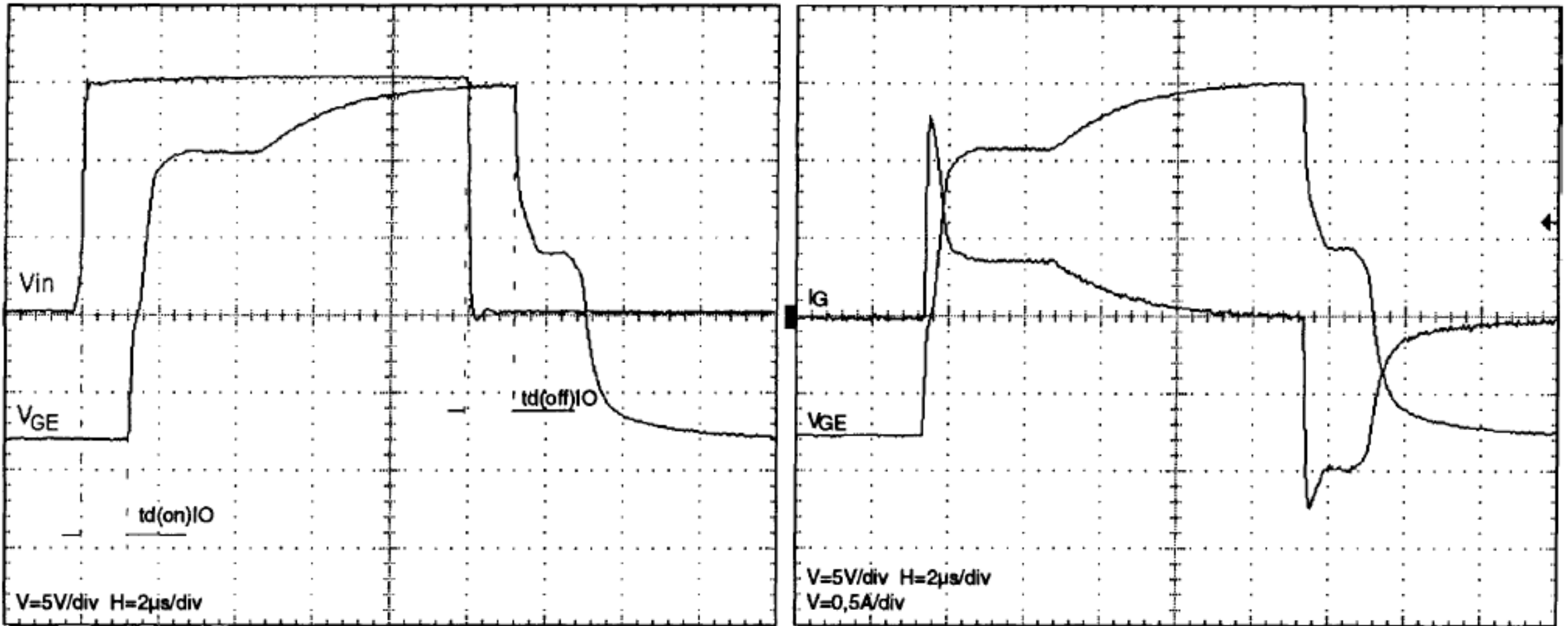


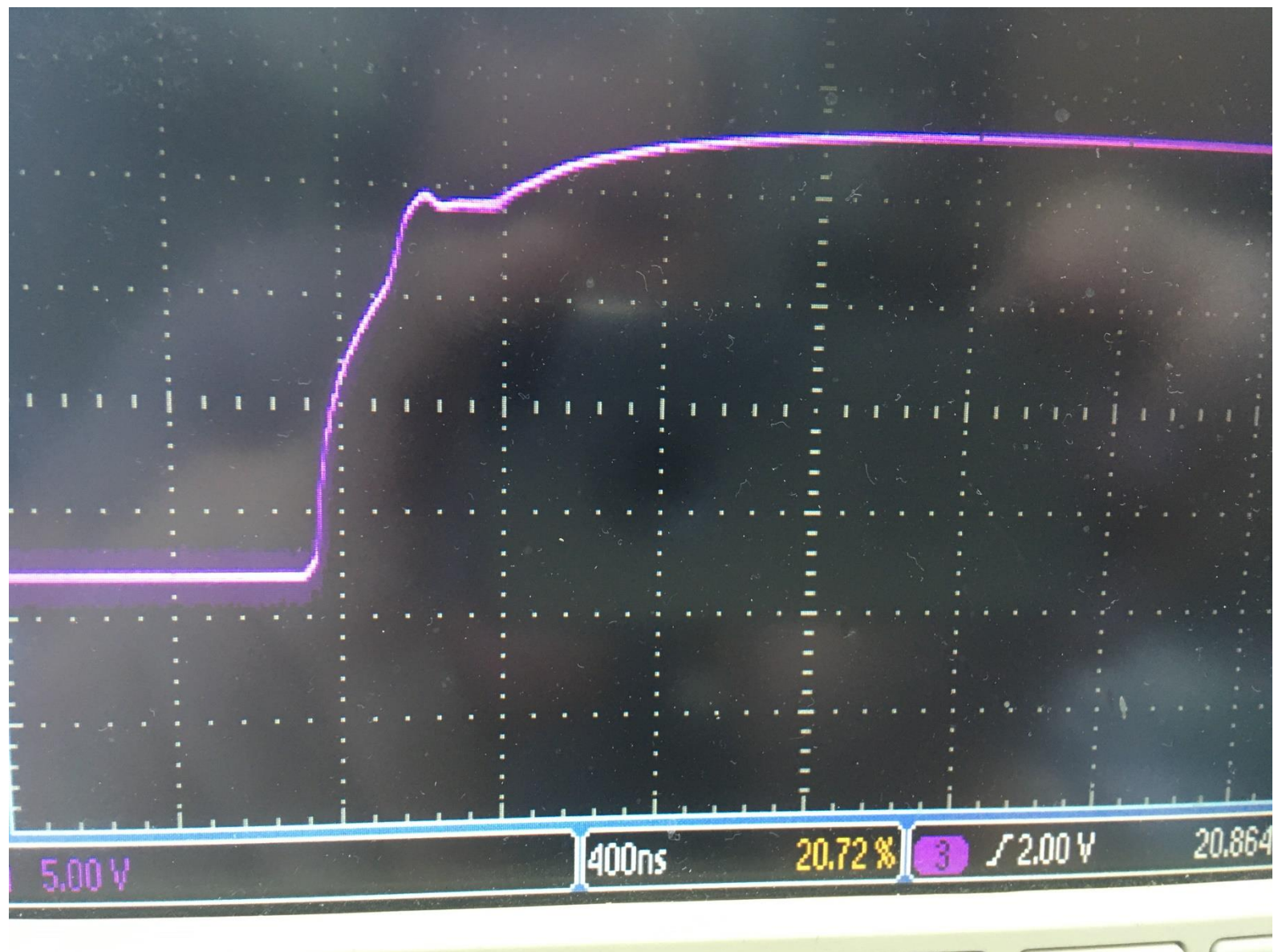
Ключевой режим работы транзистора (IGBT, MOSFET)

На интервале t_0 - t_1 напряжение затвора (U_G), плавно нарастая, достигает величины отсечки (U_{th}). С момента отсечки через транзистор начинает протекать ток, величина которого определяется напряжением затвора – это линейная область работы. К моменту t_2 ток транзистора достигает максимальной величины, определяемой нагрузкой. До этого момента происходила зарядка входной емкости транзистора C_{GE} . В этот момент напряжение на затворе практически перестает расти до момента t_3 , это явление называется эффектом Миллера. Во время «плато Миллера» происходит перезарядка емкостей C_{GC} и C_{CE} , при этом напряжение на коллекторе уменьшается до значений, близких к напряжению насыщения. Эффективная величина емкости Миллера примерно в 3-5 раз больше входной. По завершении плато Миллера напряжение на затворе еще немного растет – снова заряжается входная емкость и напряжение коллектора достигает минимальных значений, определяемых величиной тока коллектора. Энергетические потери определяются площадью под кривыми тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер.



Реальные формы напряжений драйвера, затвора и тока затвора IGBT





Импульсные преобразователи энергии

Если период функции равен T и длительность положительной части импульса равна τ

Коэффициент заполнения

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

D - коэффициент заполнения (Duty cycle)

S - скважность.

Схемы импульсных преобразователей будем рассматривать в идеализированном виде – падение напряжения на открытом транзисторе, время переключения и токи утечки будем считать нулевыми, поэтому изображение транзистора в схемах заменим на изображение ключа.

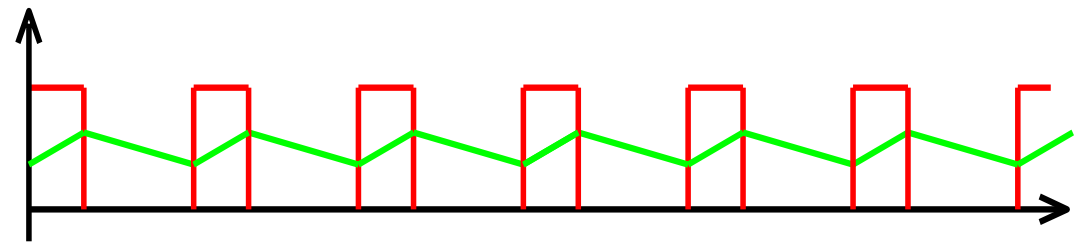
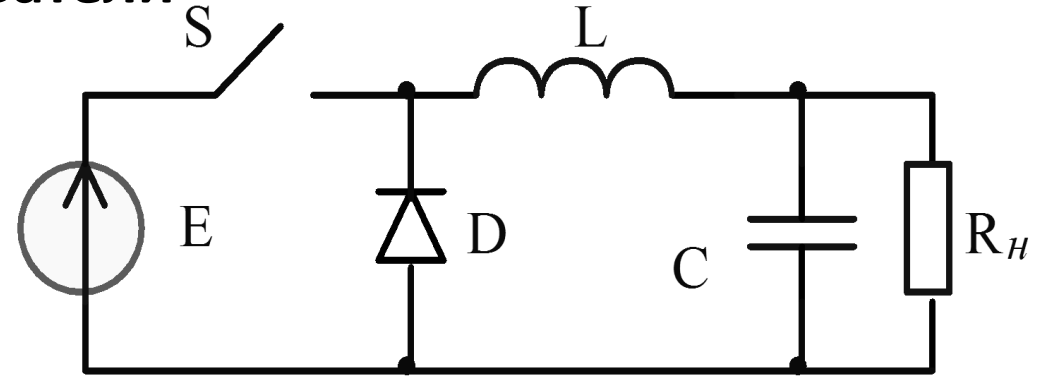
DC-DC - преобразователи

Основные типы преобразователей.

1. Понижающий преобразователь. (BUCK)

Принцип работы:

В замкнутом состоянии ключа ток от источника протекает через индуктивность, питая нагрузку. При этом также происходит зарядка конденсатора. При размыкании ключа ток индуктивности не может стать нулевым по правилам коммутации - открывается диод замыкая этот ток. Напряжение нагрузки определяется током индуктивности и разрядом конденсатора. Далее процесс повторяется сначала.



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:

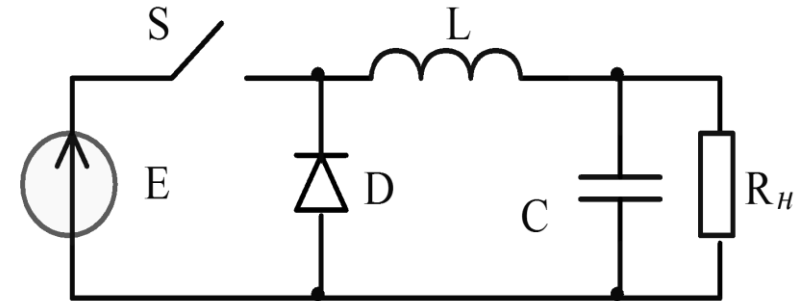
$$L \frac{di_L}{dt} = E - U_C$$

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

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:

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

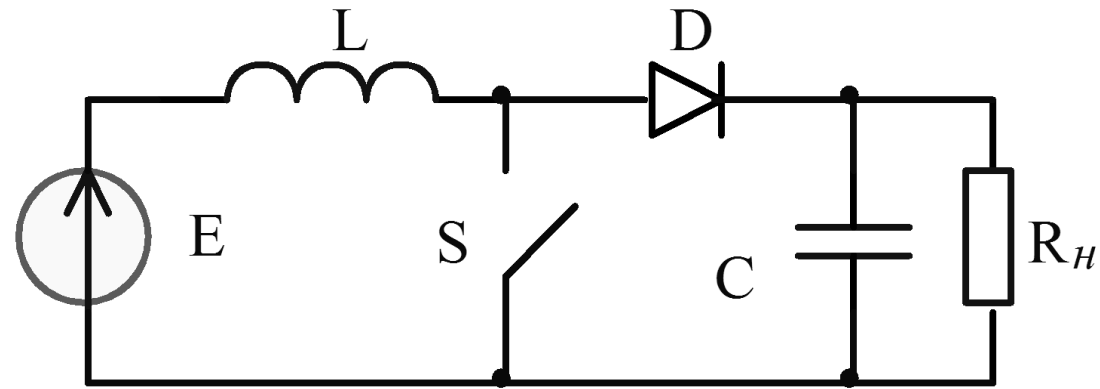
$$C \frac{dU_C}{dt} (D + 1 - D) = \left(i_L - \frac{U_C}{R}\right)D + \left(i_L - \frac{U_C}{R}\right)(1 - D) = i_L - \frac{U_C}{R}$$

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

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

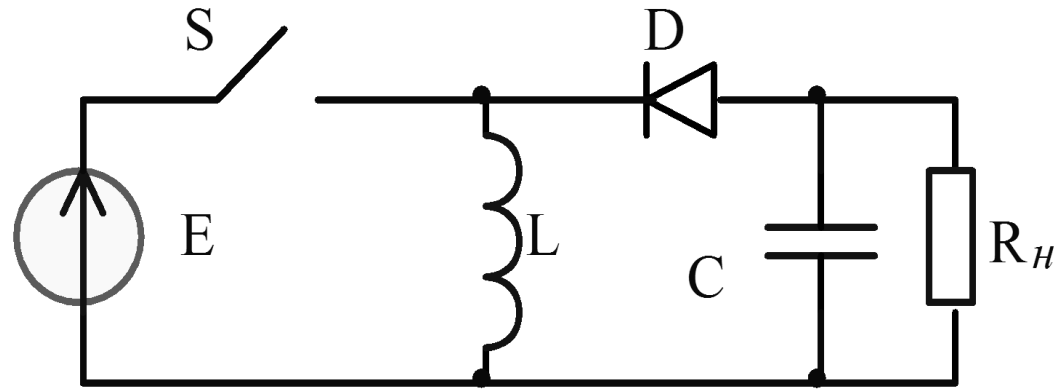
DC-DC - преобразователи

2. Повышающий преобразователь. (BOOST)

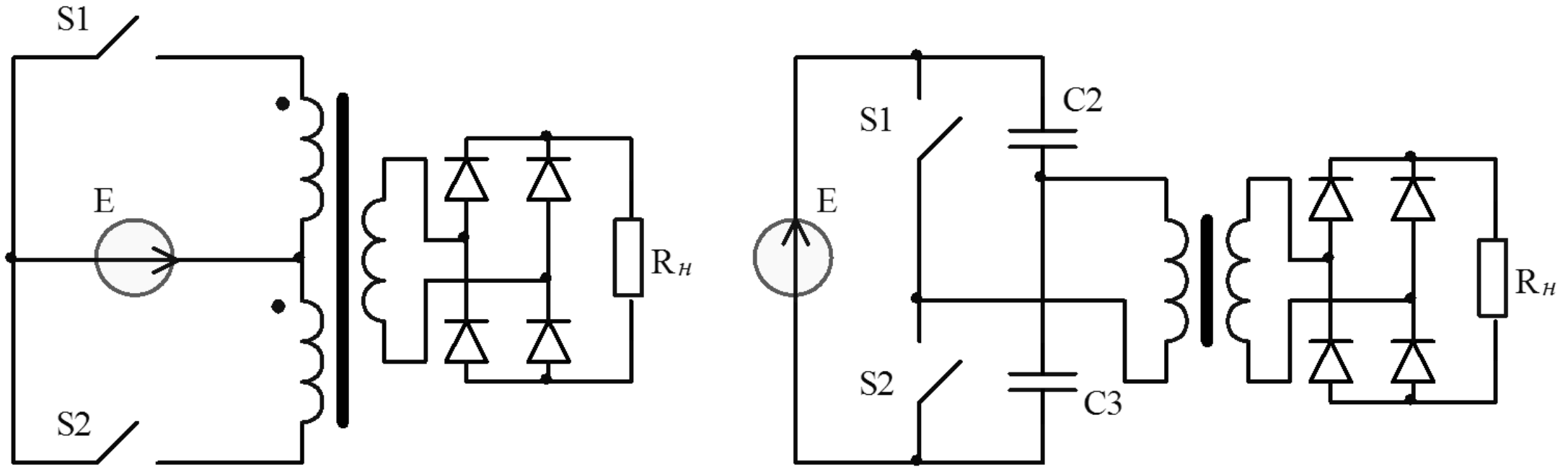


DC-DC - преобразователи

3. Инвертирующий преобразователь. (BUCK-BOOST)



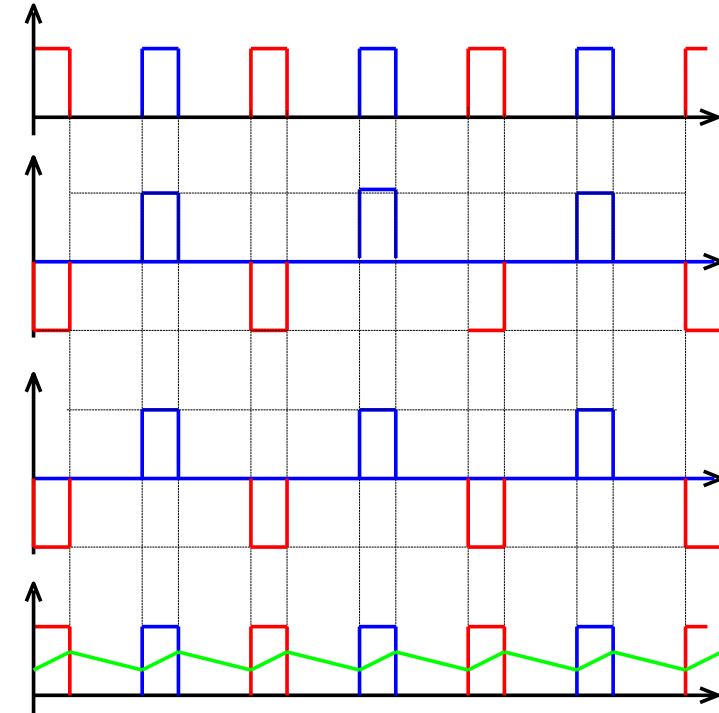
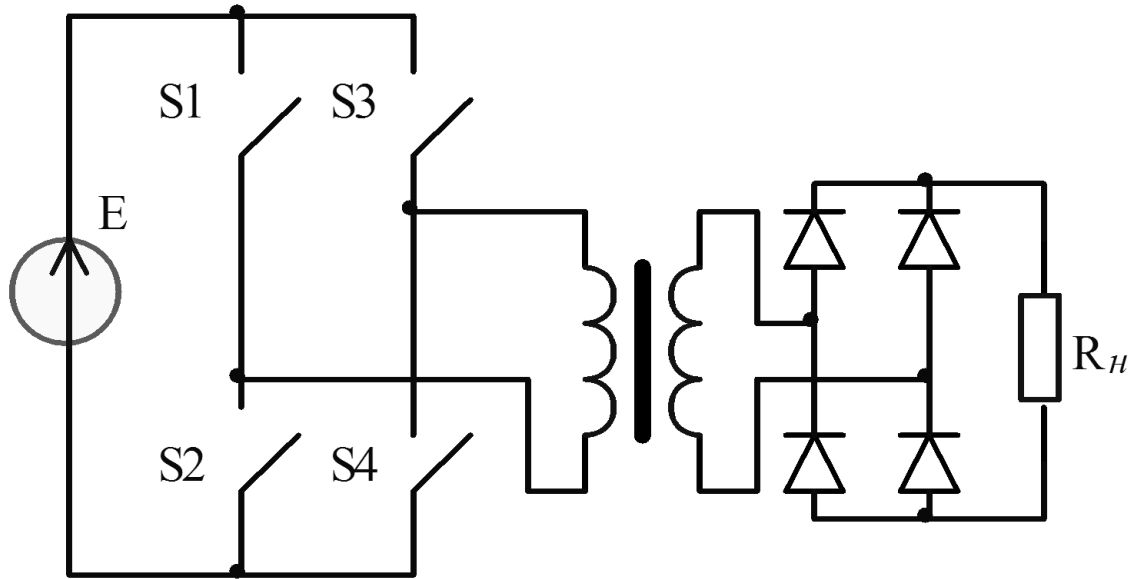
Преобразователи с трансформаторной развязкой



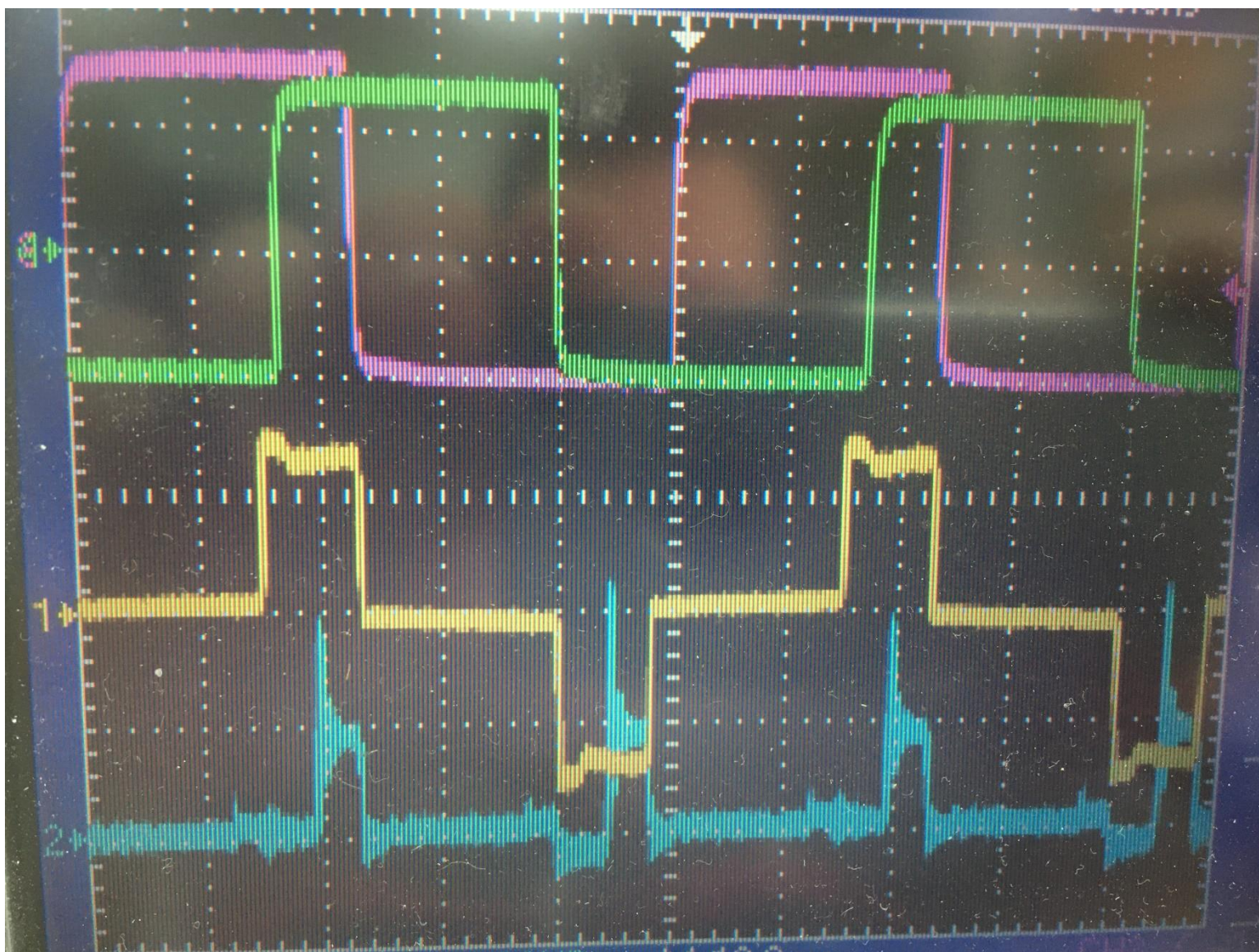
Двухтактные преобразователи (передача энергии два раза за период). Слева преобразователь по топологии «тяги-толкай» (Push-Pull), справа полумост (Half Bridge). На следующем слайде полный мост (Full Bridge).

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.



Горчаков К.М. Аналоговая электроника