УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ

Oleg Stukach

TPU, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia

E-mail: tomsk@ieee.org

Усилитель мощности

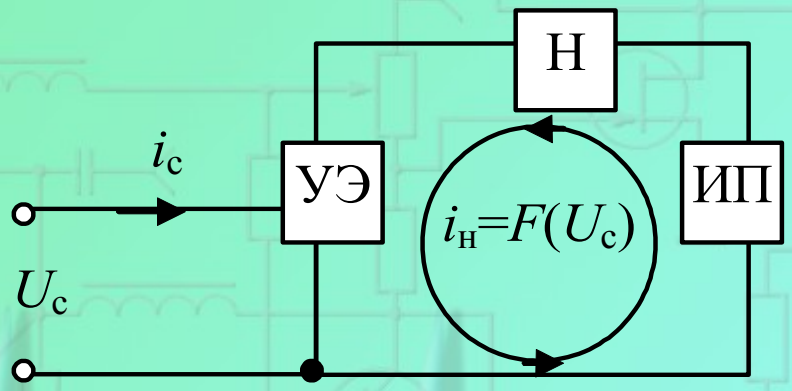
Характерной чертой усилителей мощности является высокое абсолютное значение выходной мощности

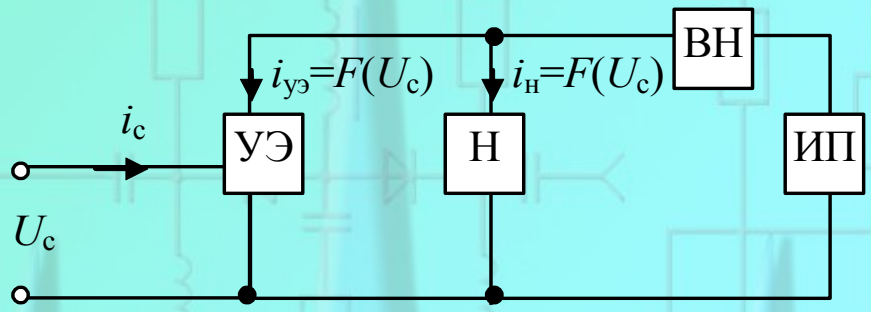
Важнейшей характеристикой усилителя становится коэффициент полезного действия (КПД)

$$\eta = \frac{P_o}{P_{\text{потр}}} 100\%$$

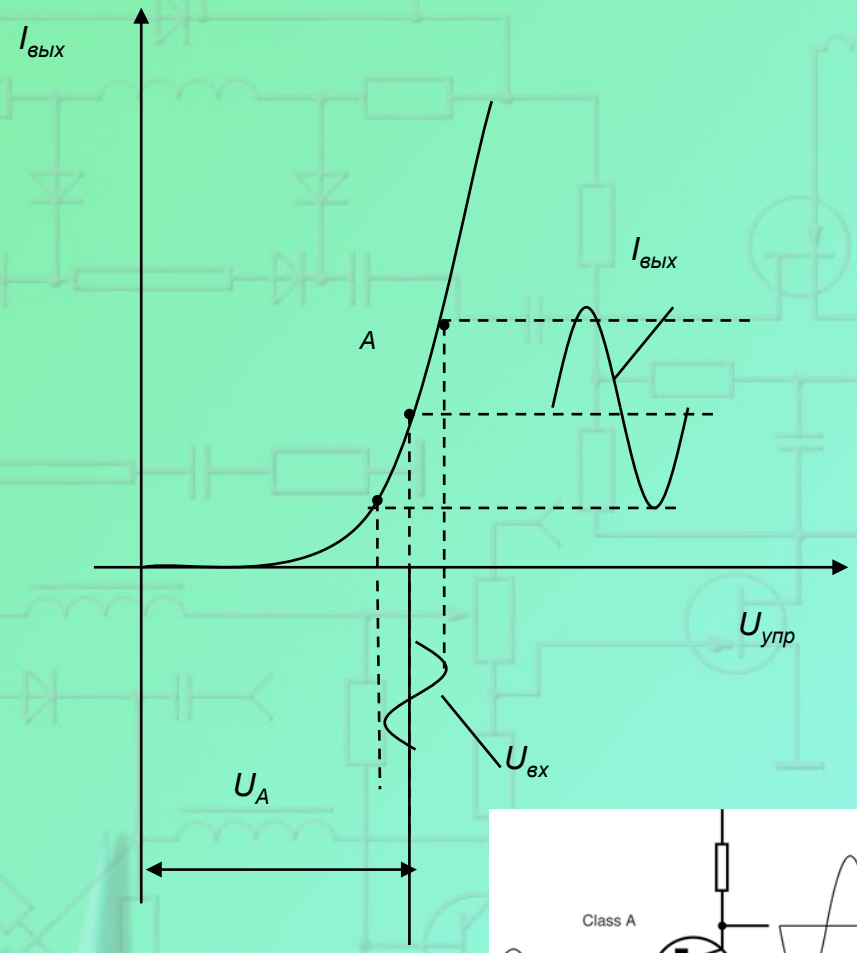
Линейные усилители мощности

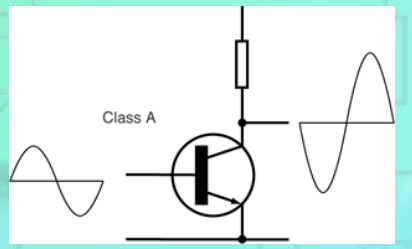
Под линейными обычно понимают усилители, в которых управляемые (активные, усилительные) элементы (УЭ) работают в непрерывном режиме





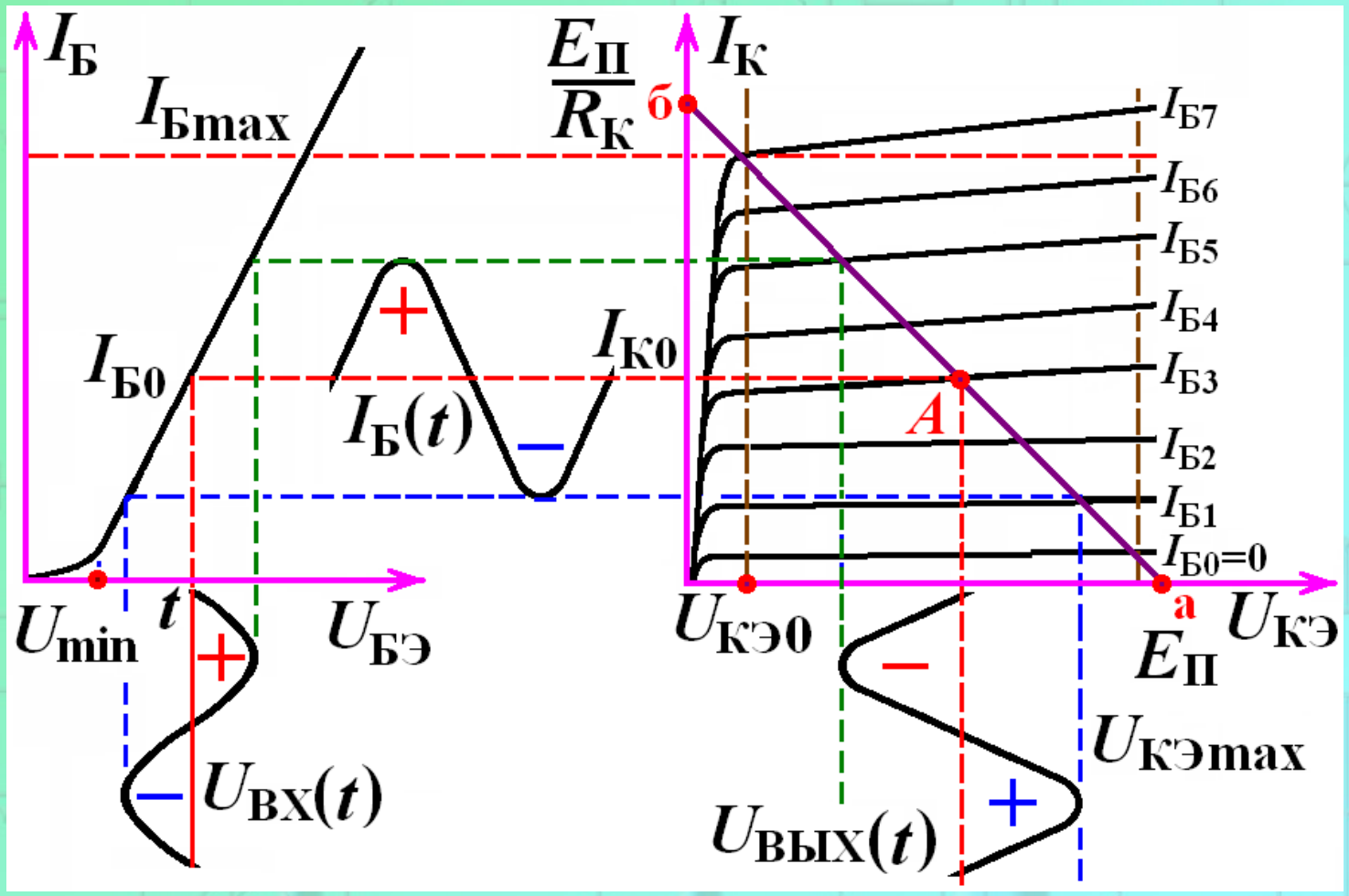
Режимы (классы) работы активных элементов



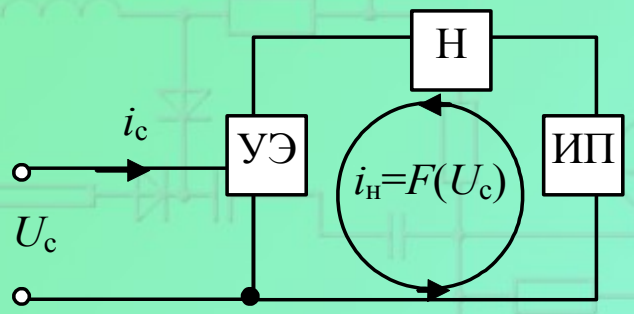


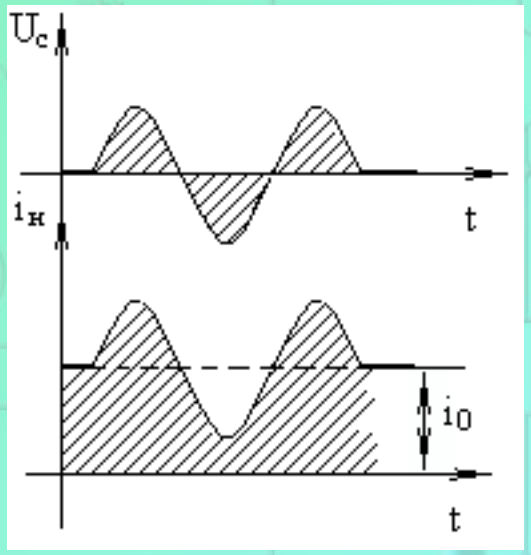
Класс А – режим, когда ток в выходной цепи активного элемента протекает в течение всего периода входного сигнала. Обязательно используется при разнополярных входных сигналах и одном активном элементе. Характеризуется сравнительно низким КПД и малыми нелинейными искажениями

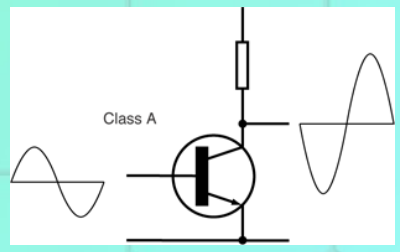
Усилитель класса А



Однотактный усилитель







В результате получение двуполярного сигнала в нагрузке возможно лишь с постоянным “пьедесталом”. Наличие “пьедестала” - потребление тока i_0 от источника питания при отсутствии сигнала (в режиме “покоя”) - свидетельствует о низком КПД такого усилителя, называемого *однотактным*

КПД схемы

$$\eta = \frac{P_o}{P_{\text{потр}}} 100\% \qquad P_0 = \frac{1}{2} U_{0m} I_{0m} \qquad \eta = \frac{1}{2} \frac{U_{0m} I_{0m}}{P_{\text{потр}}} 100\% < 50\%$$

Для построения усилителей, характеризуемых выходной мощностью в несколько сотен ватт, линейные усилители не пригодны из-за низкого КПД

КПД линейных усилителей

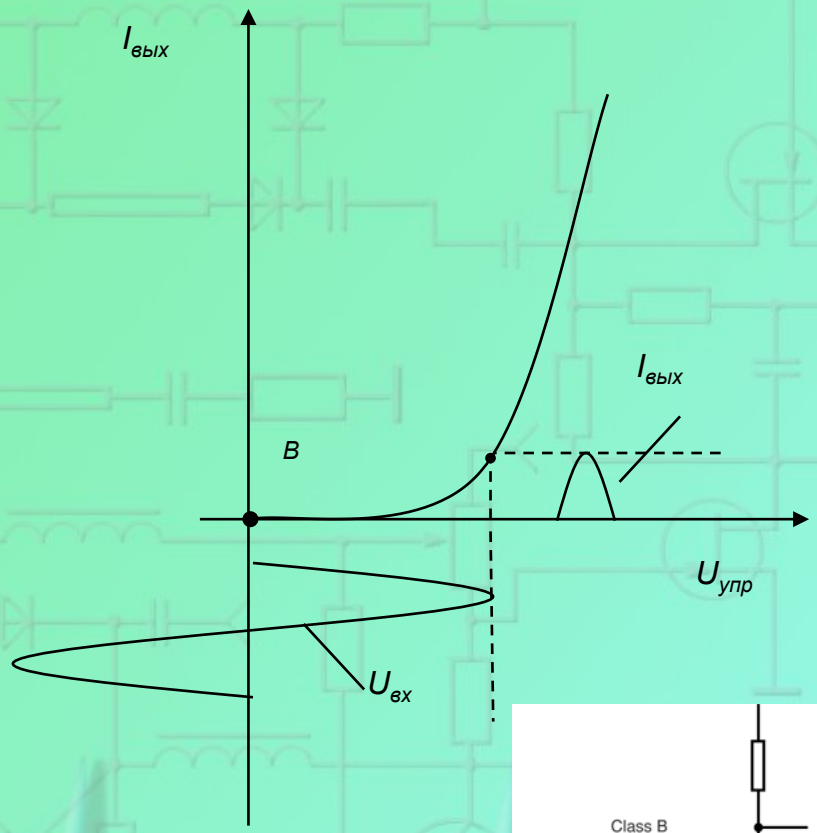
$$\eta = \frac{\frac{1}{T}\int_0^T U_m \cos\omega t i_m \cos(\omega t + \varphi)dt}{2E_{un} \cdot \frac{1}{T}\int_0^T i_{un\bullet}(t)dt} = \frac{\frac{U_m i_m}{2}\cos\varphi}{2E_{un} i_{un}^0}$$

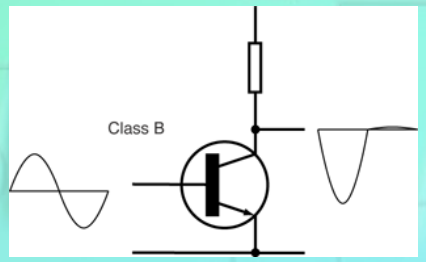
При чисто активной нагрузке (φ=0)

$$\eta = \frac{U_m i_m}{4E_{un} i_{un}^0}$$

Отсюда следует, что значение КПД зависит от использования напряжения источника питания $U_m/E_{ип}$ и использования тока источника питания $i_m/i_{ип0}$

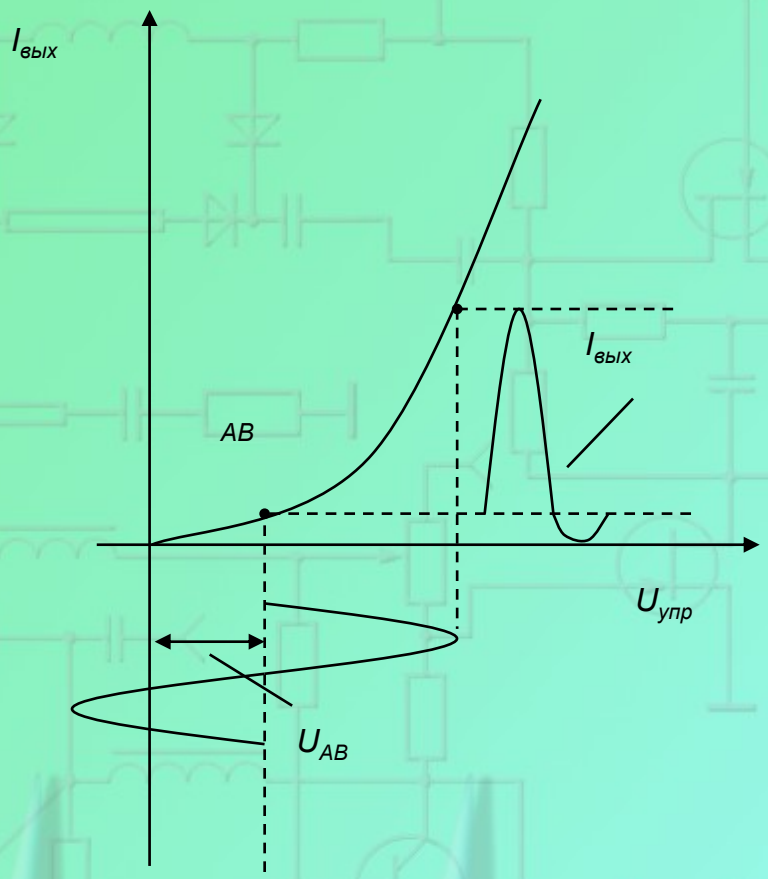
Режимы (классы) работы активных элементов





Класс В – режим работы активного элемента, при котором выходной ток протекает в течение половины периода входного сигнала. Характеризуется высоким КПД, но большими искажениями сигнала. Используют для усиления однополярных сигналов и при построении специальных двухтактных усилителей, для которых необходимо минимум два активных элемента

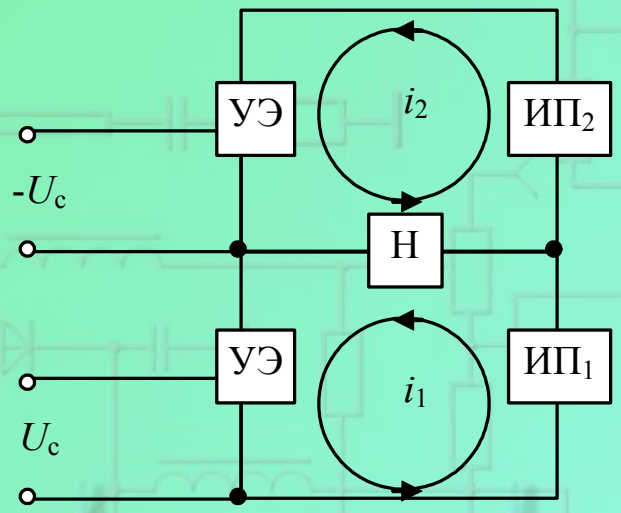
Режимы (классы) работы активных элементов

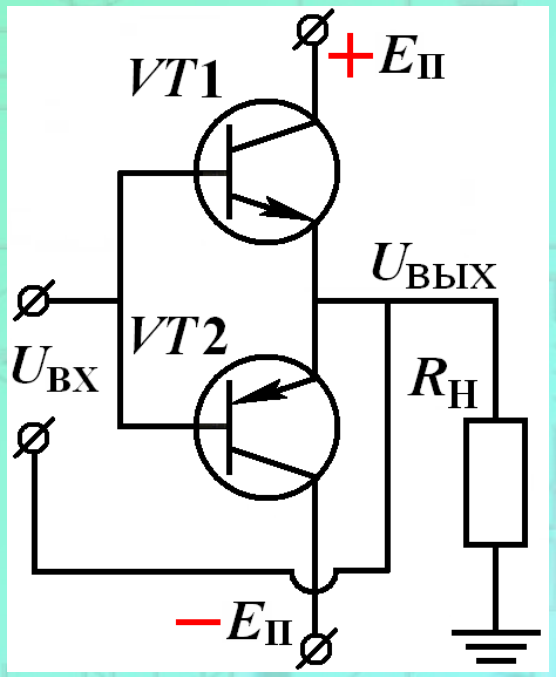


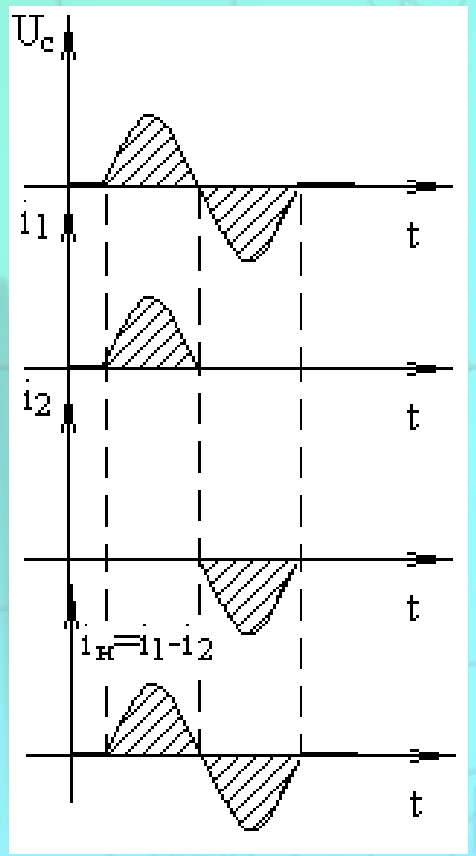
Класс АВ – выходной ток протекает больше чем полпериода, но меньше периода действия входного сигнала. Для усиления разнополярных сигналов необходимы два активных элемента. КПД больше, чем в классе А, но меньше, чем в классе В. Искажения значительно меньше, чем в классе В

Двухтактный усилитель

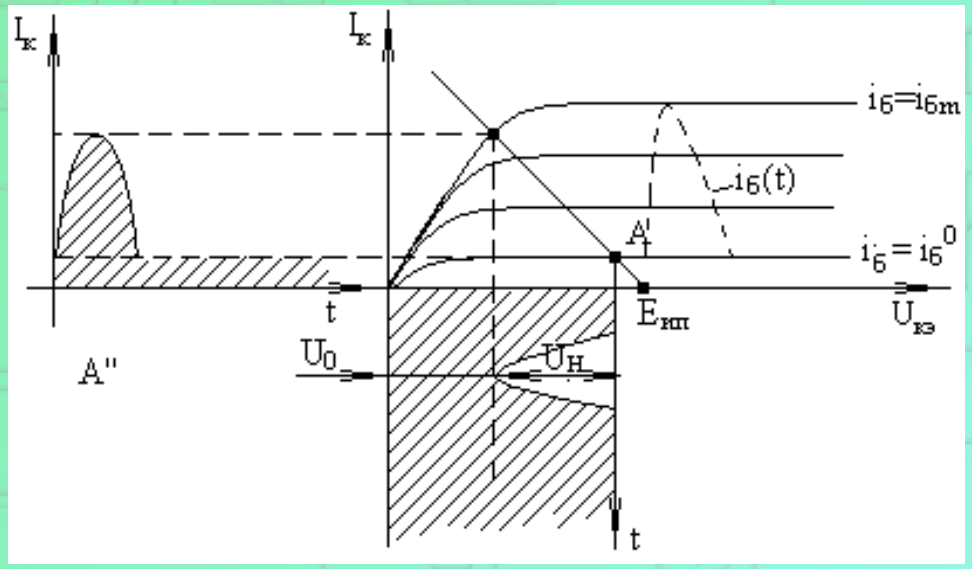
Экономичный режим воспроизведения знакопеременного сигнала при отсутствии или незначительном потреблении энергии от источника питания в режиме “покоя” возможен в двухтактных схемах усилителей

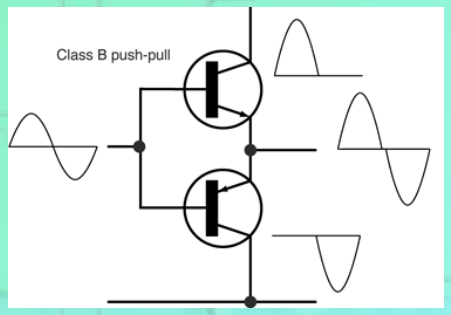






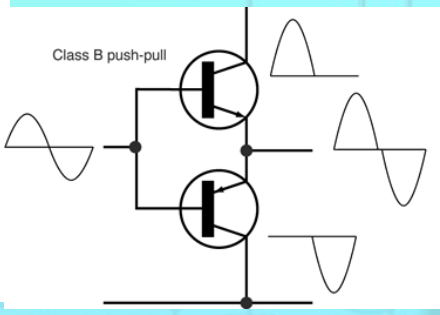
Диаграммы напряжения и тока для одного плеча двухтактной схемы



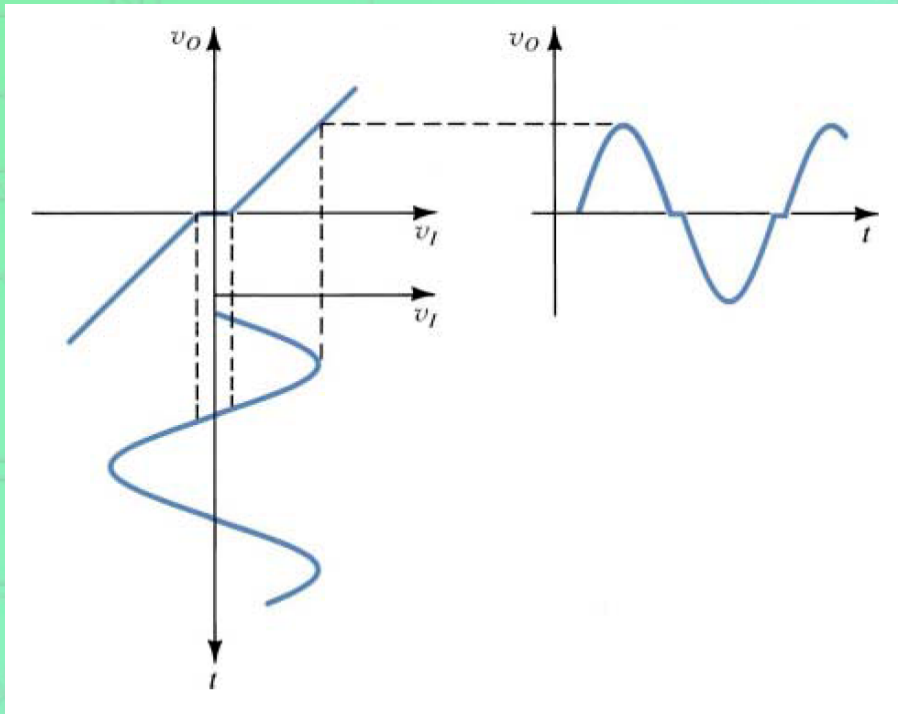


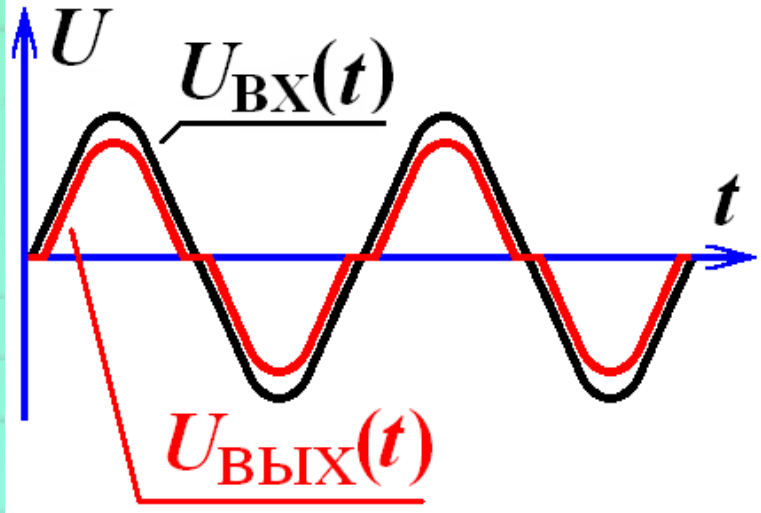
Достижение заданной мощности в нагрузке при высоких значениях амплитуды напряжения и низких значениях амплитуды тока

Диаграммы напряжения и тока для одного плеча двухтактной схемы



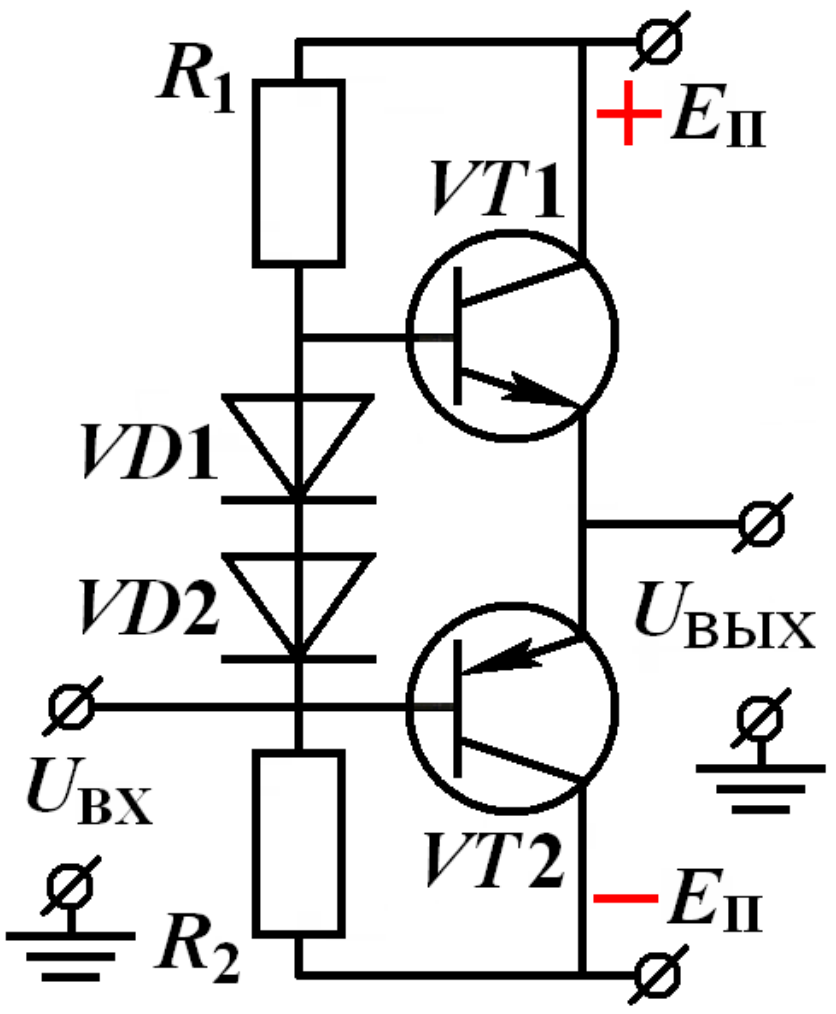
Двухтактный усилитель

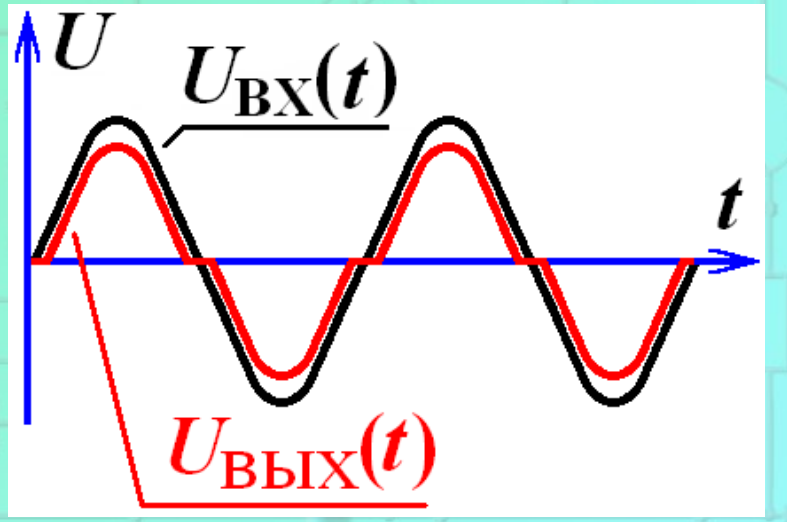




Искажения типа «ступенька»

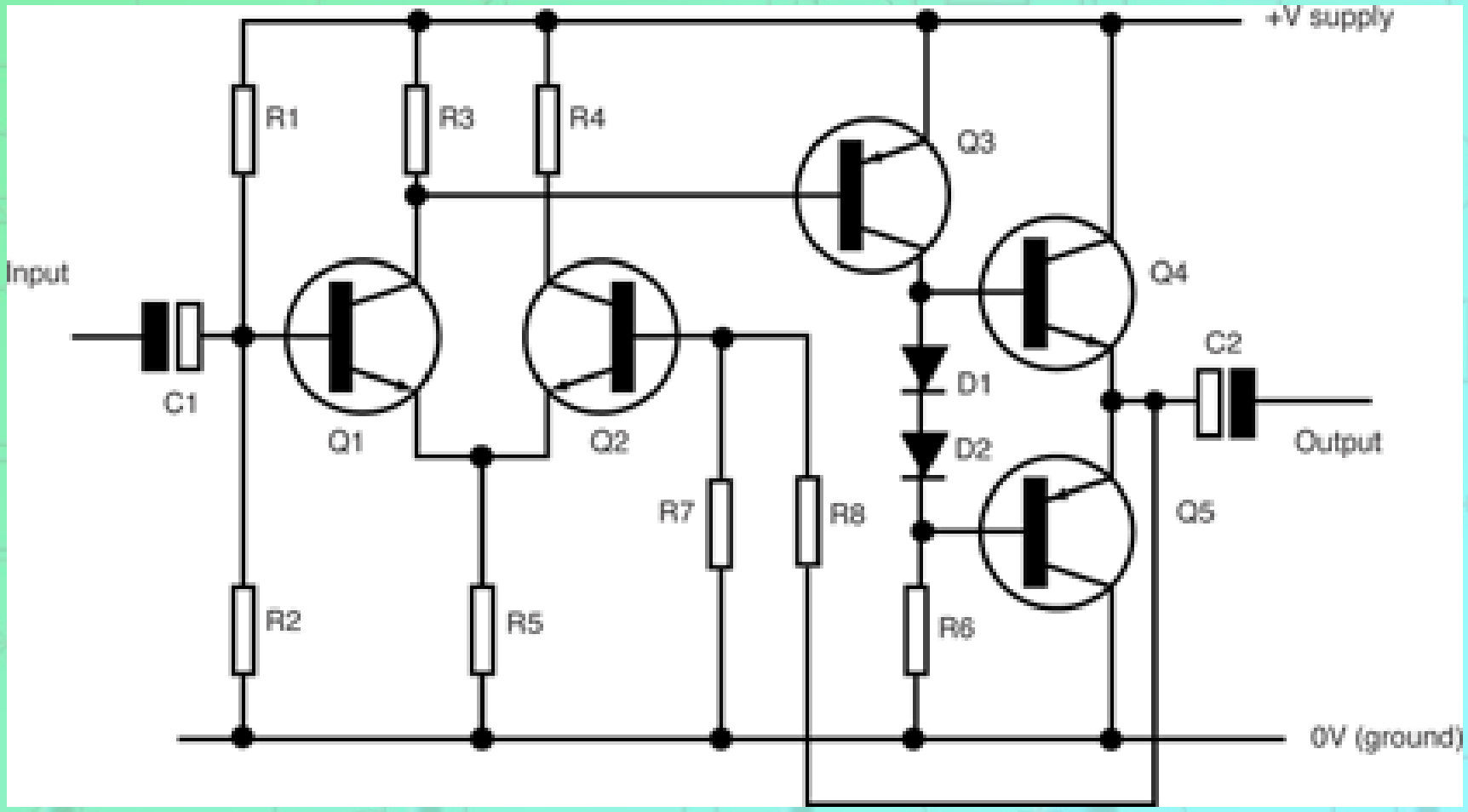
Двухтактный усилитель



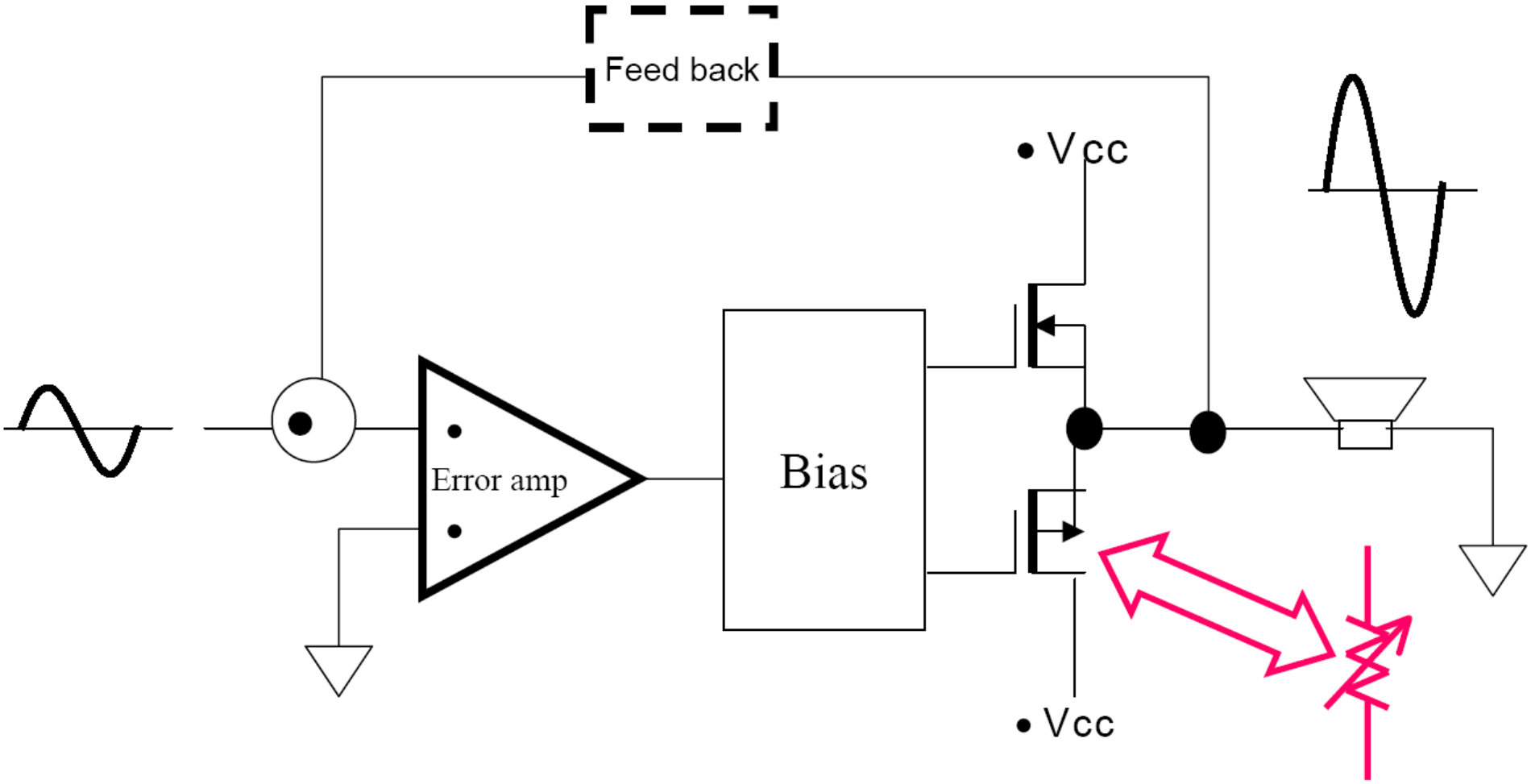


Искажения типа «ступенька»

Двухтактный усилитель



Двухтактный усилитель



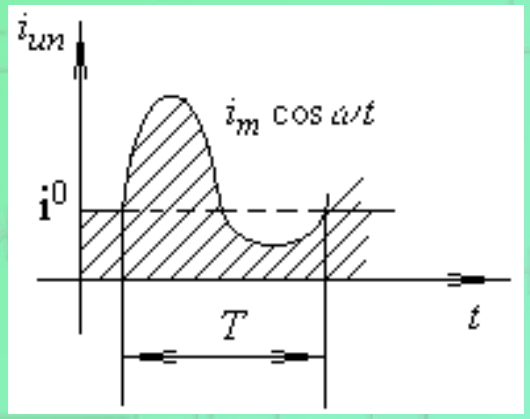
Максимально возможное значение КПД двухтактного усилителя

$$\eta = \frac{P_н}{P_{пп}} = \frac{\frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} U_н(t) i_н(t) dt}{\frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} E_{пп}(t) i_{пп}(t) dt}$$

Принято определять предельное значение КПД линейных усилителей при гармоническом сигнале в нагрузке

$U_н(t)=Um\cos\omega t$; $i_н(t)=im\cos(\omega t+\varphi)$

Коэффициент использования тока источника питания



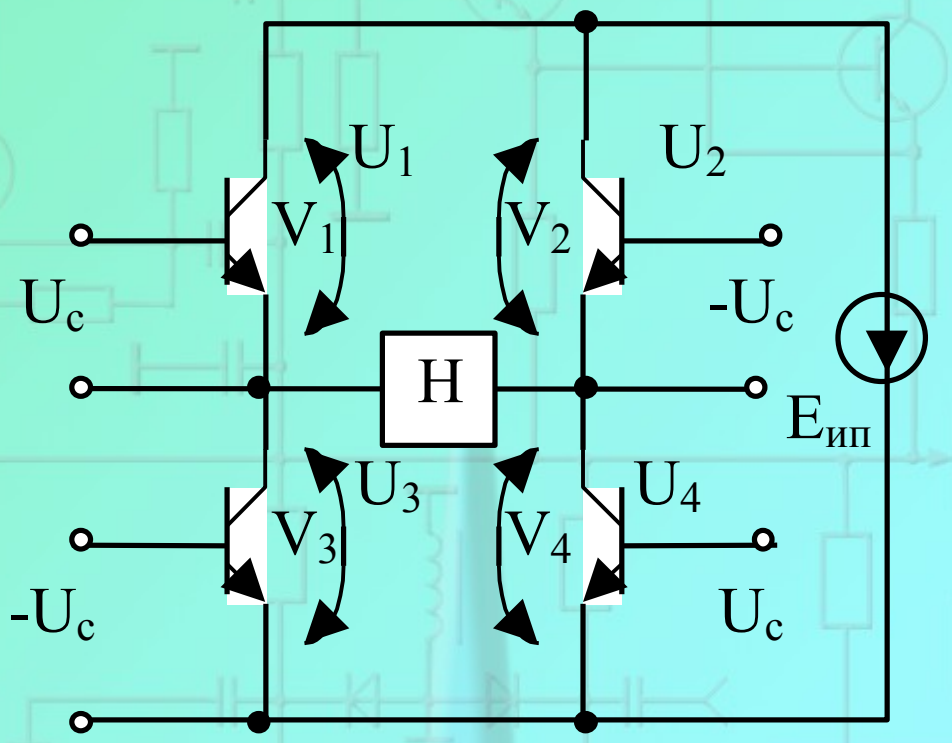
$$i_{un}^0 = i^0 + \frac{1}{T}\int_0^{T/2} i_m \cos\omega t dt - \frac{1}{T}\int_0^{T} i^0 \cos\omega t dt = i^0 + \frac{i_m}{\pi} - \frac{i^0}{\pi}$$

Очевидно, что значение *iип0*, соответствующее максимуму *i*, достигается *i*=π. Полагая, что предельные значения *u*=1 и *i*=π, получаем максимальное значение КПД двухтактного каскада при гармоническом выходном сигнале:

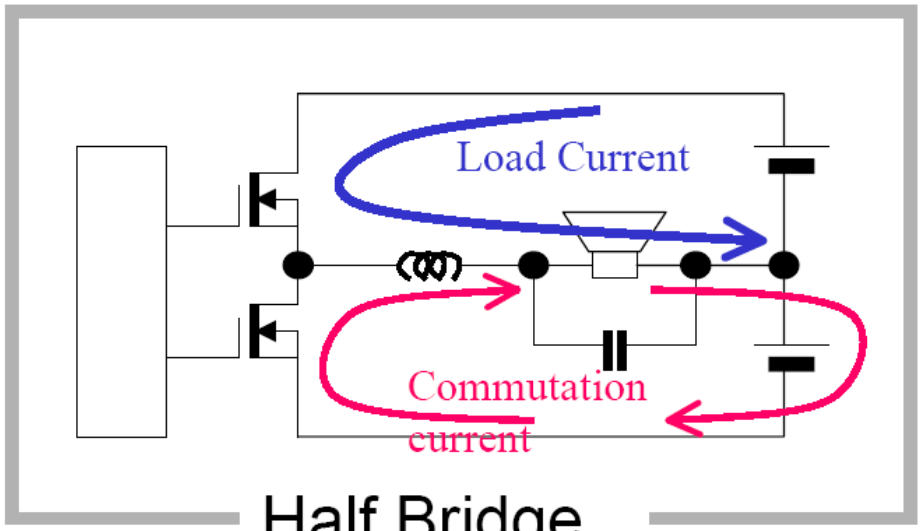
$$\eta_{max} = \frac{\pi}{4} \approx 78\% \qquad \eta = \frac{U_m i_m}{4 E_{un} i_{un}^0}$$

Мостовая схема

Требуемое напряжение источника питания при одной и той же амплитуде сигнала в нагрузке в мостовой схеме почти в 2 раза ниже, чем в ранее рассмотренных схемах. В результате и требуемое значение *U*кэ доп для транзисторов мостовой схемы также уменьшается в два раза.

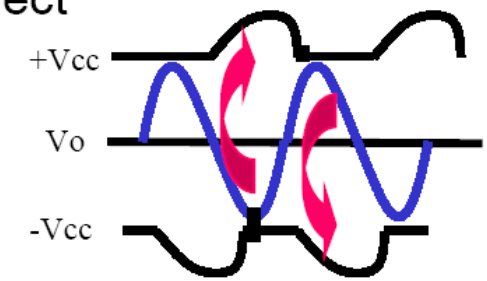


Мостовая схема



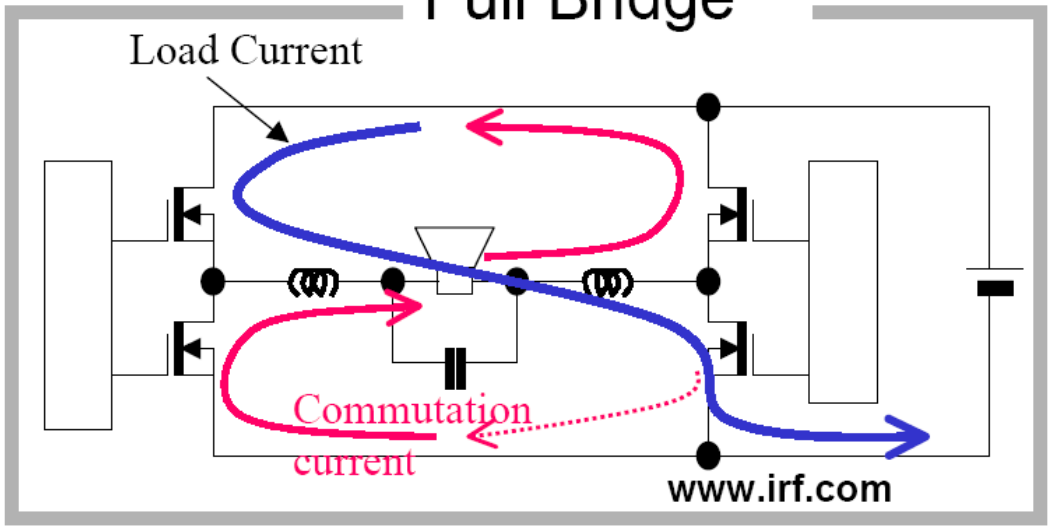
Half Bridge

Supply voltage Pumping effect



$$\Delta V_{BUS}\,\max = \frac{V_{BUS}}{8 \cdot \pi \cdot f_{PWM} \cdot R_{LOAD} \cdot C_{BUS}}$$

Full Bridge



-Significant at low frequency output

-Significant at low load impedance

-Significant at small bus capacitors

-Largest at duty = 25%, and 75%

Особенности использования современных мощных транзисторов

- Допустимая мощность рассеивания
- Зависимость напряжения коллекторного перехода от температуры корпуса

Схема Дарлингтона

Для снижения мощности управления применяется схема составного транзистора, в котором ток управления уменьшен пропорционально усилению по току базы дополнительного транзистора VT1, который может быть значительно менее мощным, чем основной

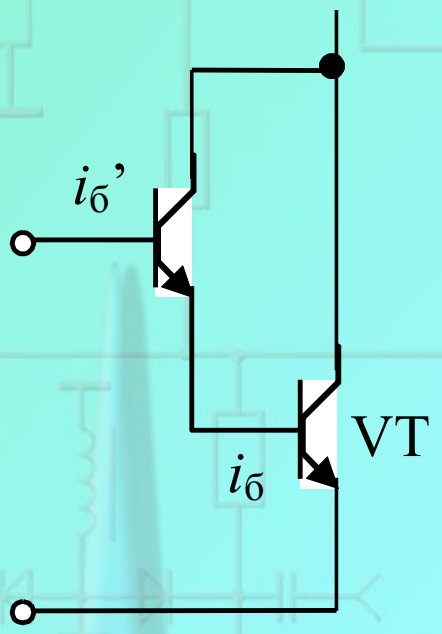
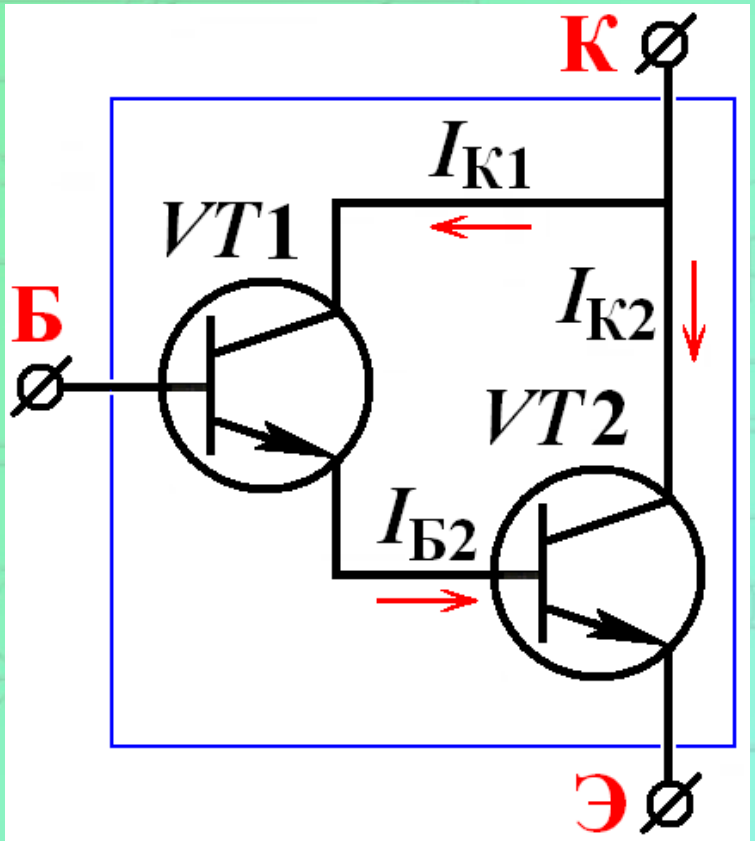


Схема Дарлингтона



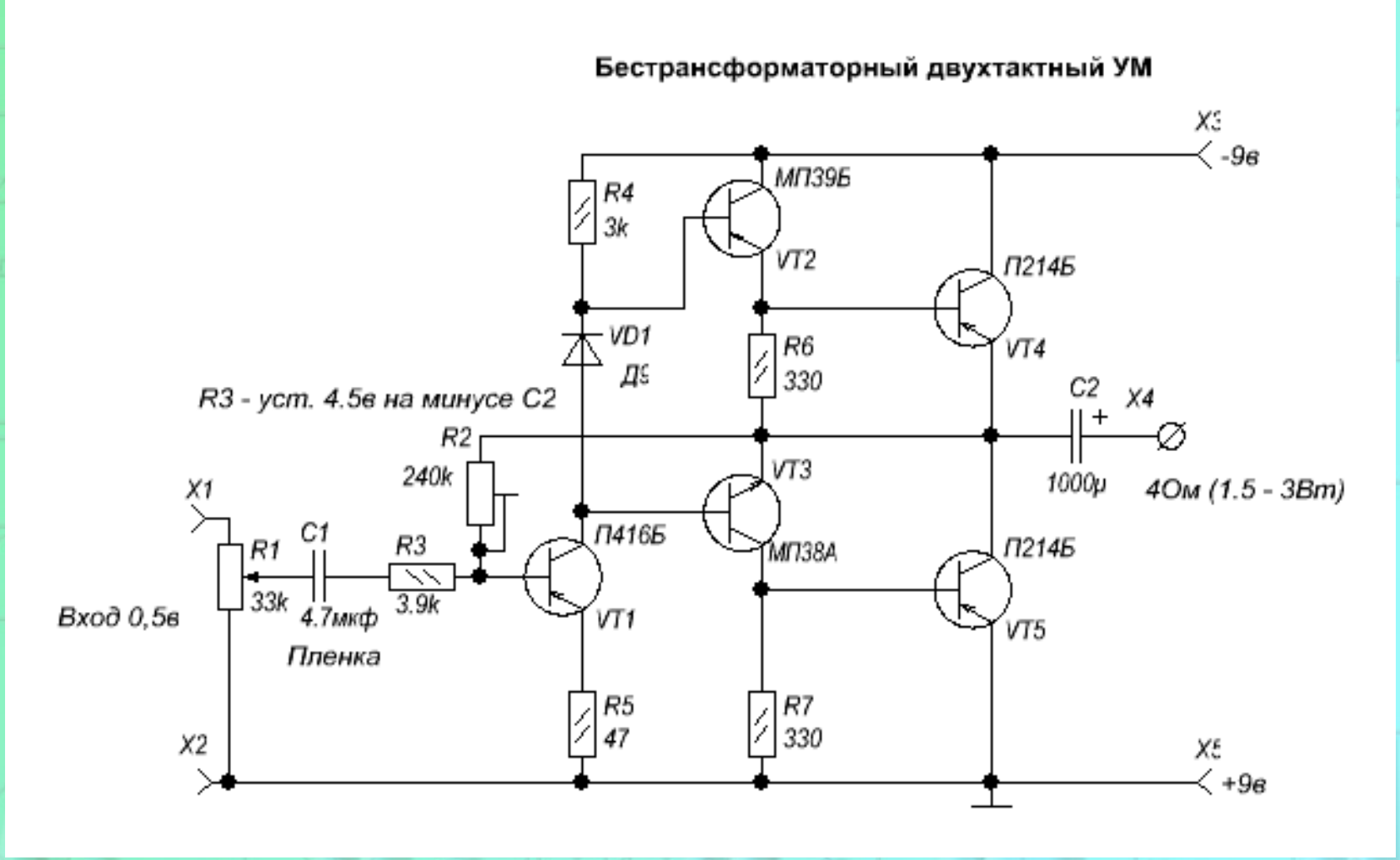
Ток коллектора составного транзистора:

$I_К = I_{К1} + I_{К2}$

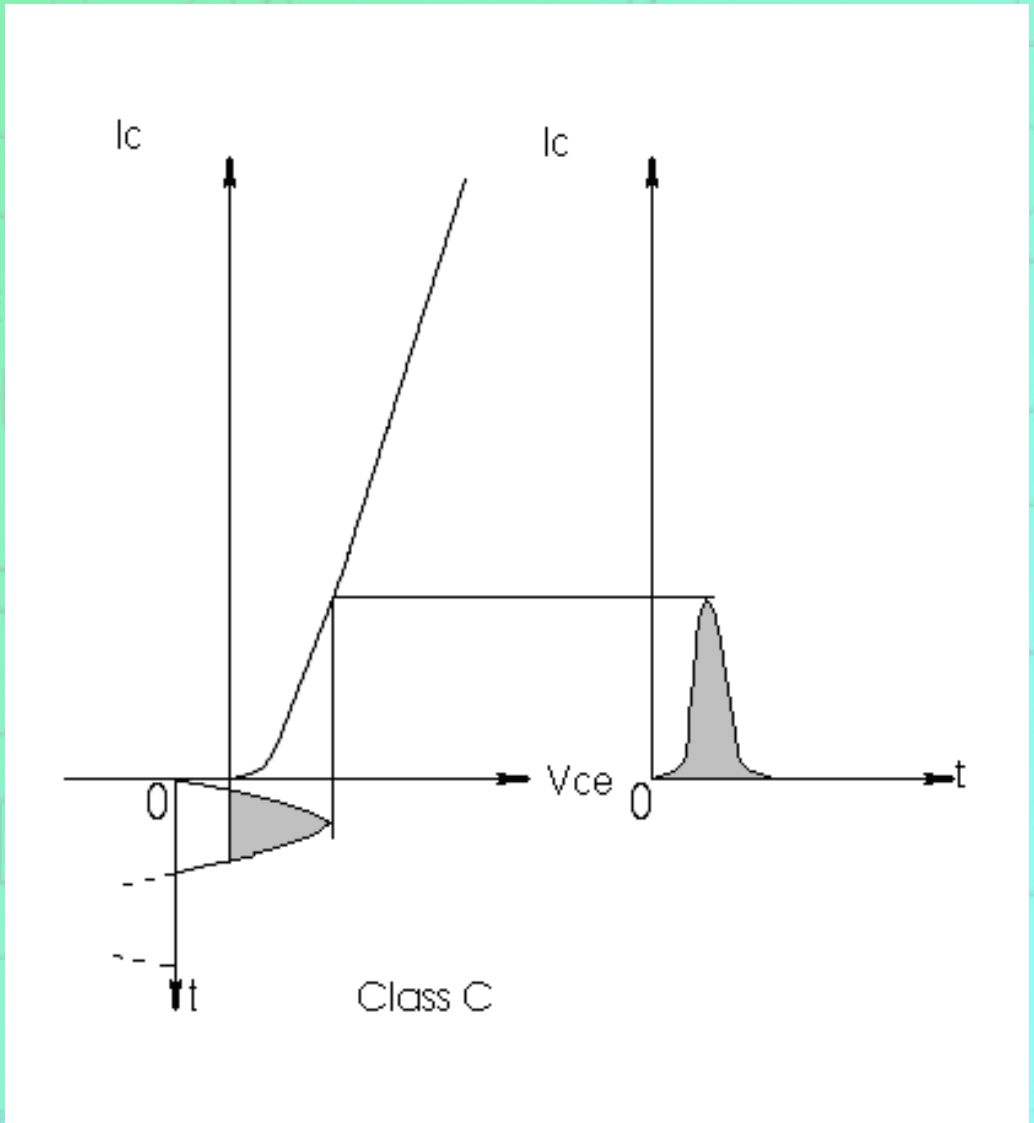
$I_{К1} = h_{21Э(1)} \cdot I_{Б1}$

$I_{К2} = h_{21Э(2)} \cdot I_{Б2} = h_{21Э(2)} \cdot I_{Э1} = h_{21Э(2)} \cdot I_{Б1}(1 + h_{21Э(1)})$

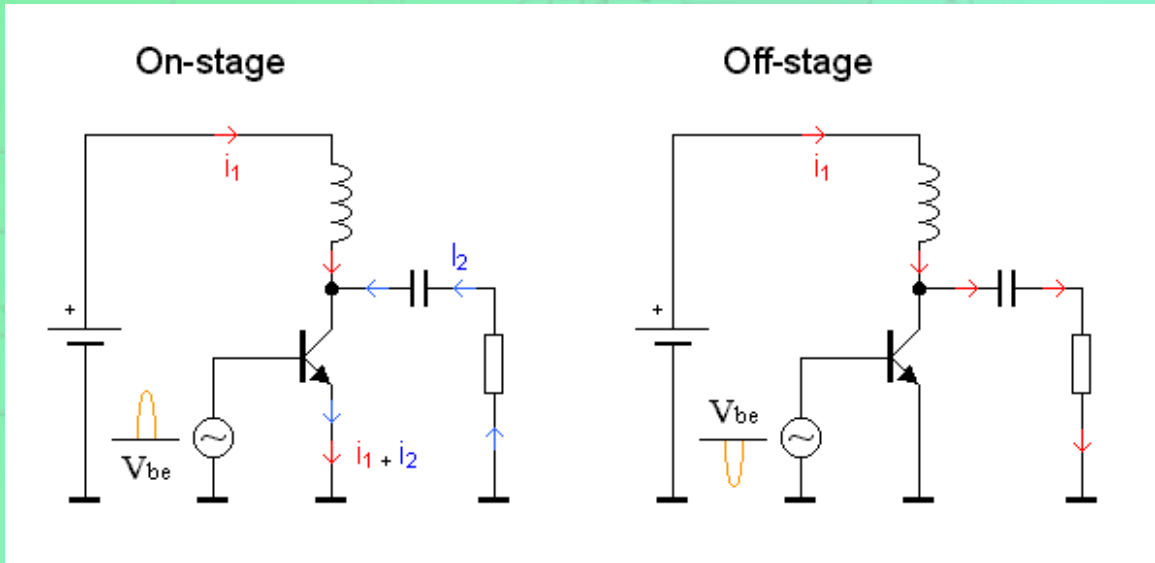
Схема Дарлингтона (пример)

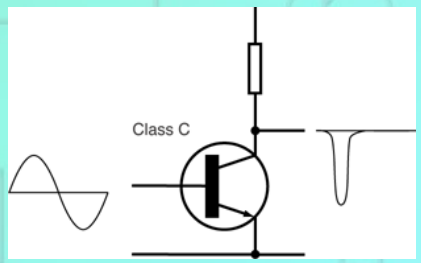


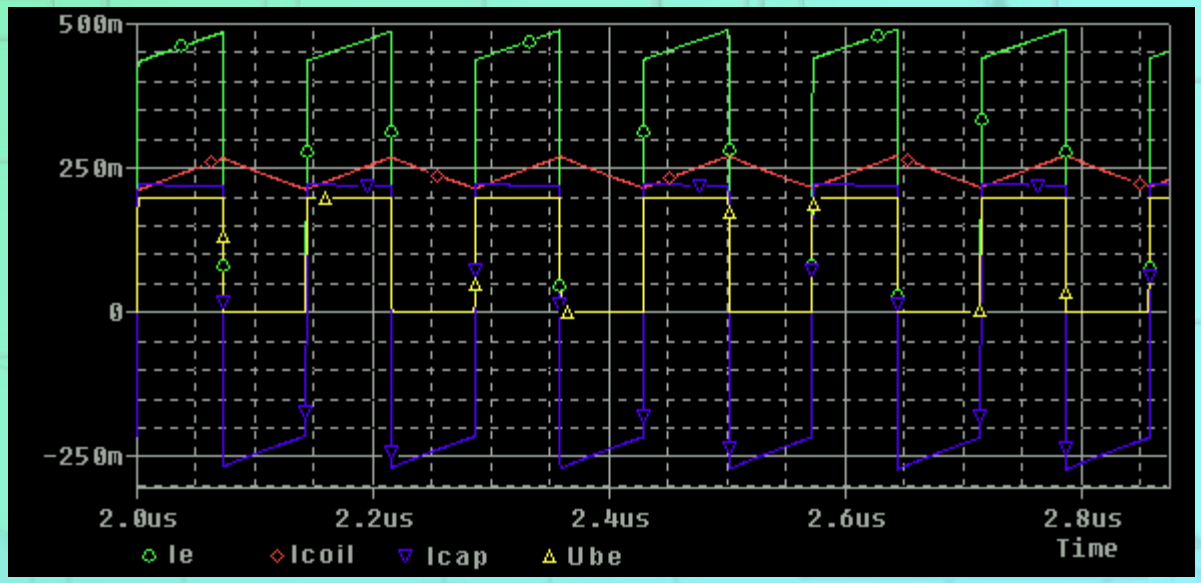
Класс С



Класс С


On-stage
Off-stage
i1
i2
+
Vbe
i1 + i2


Class C

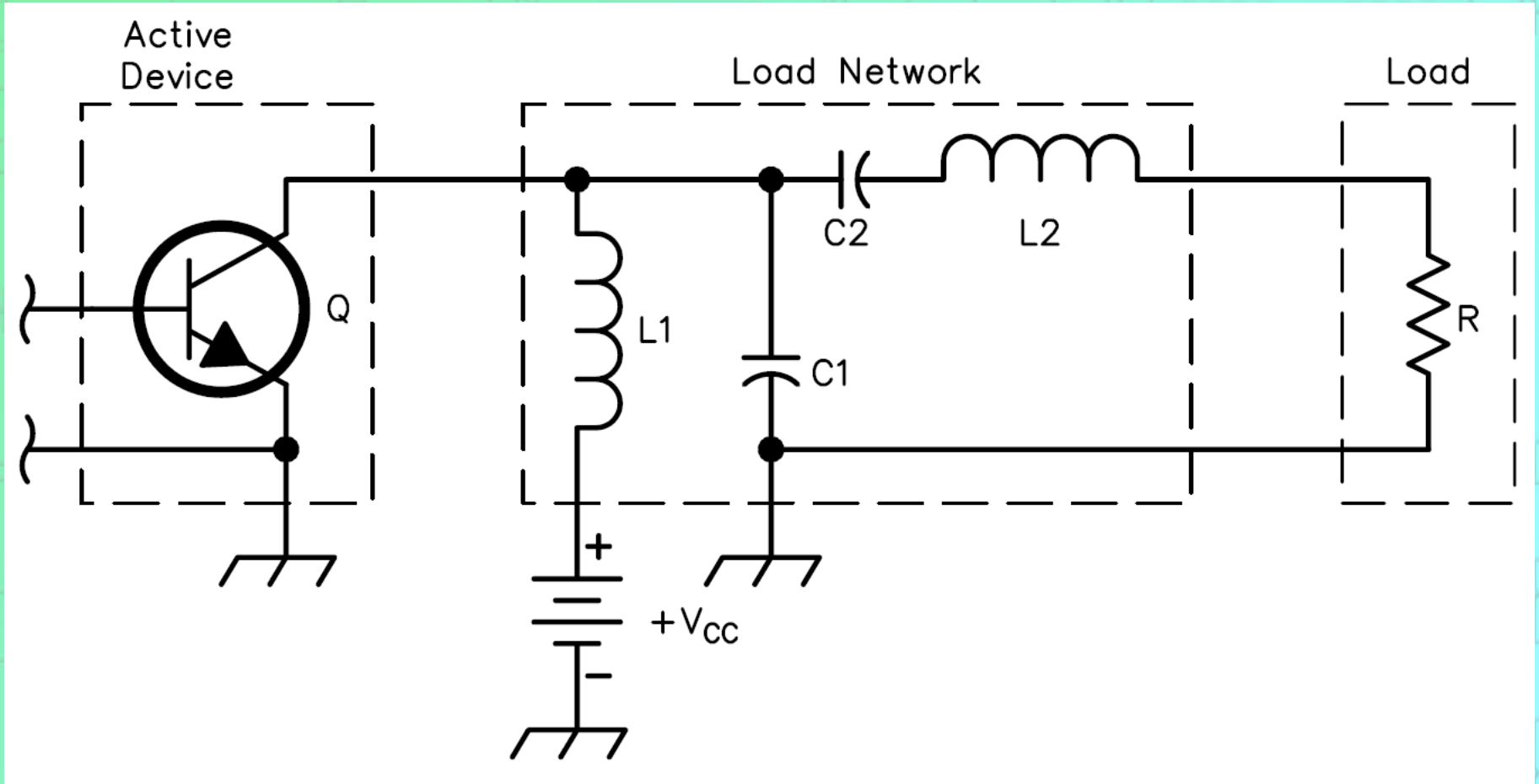

500m
250m
0
-250m
2.0us
2.2us
2.4us
2.6us
2.8us
Time
Ie
Icoil
Icap
Ube

Усилители мощности ключевого типа

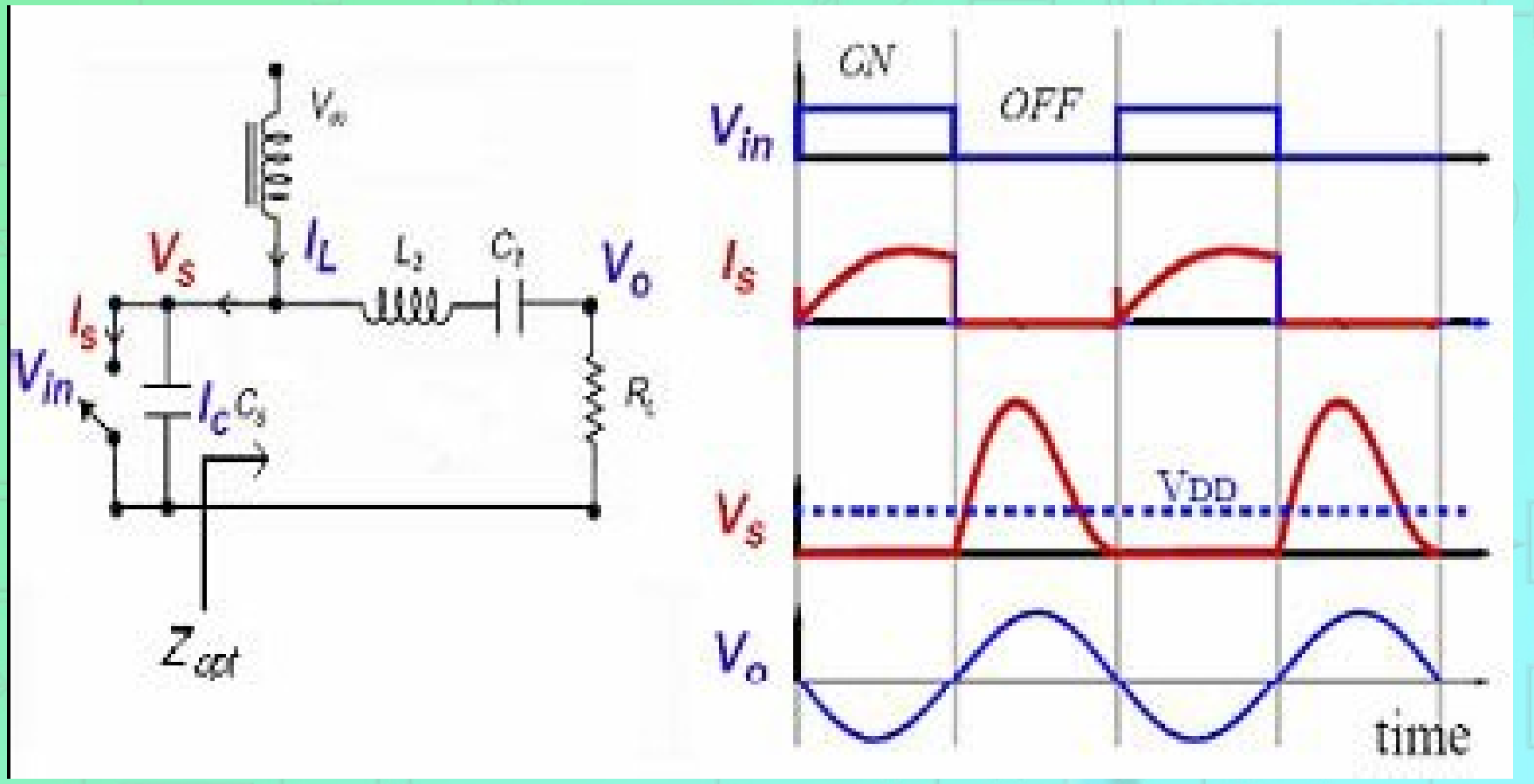
Для построения усилителей, характеризуемых выходной мощностью в несколько сотен ватт, линейные усилители не пригодны из-за низкого КПД

Усилители, в которых управление энергией сигнала в нагрузке осуществляется элементами, работающими в ключевом режиме, называются ключевыми усилителями

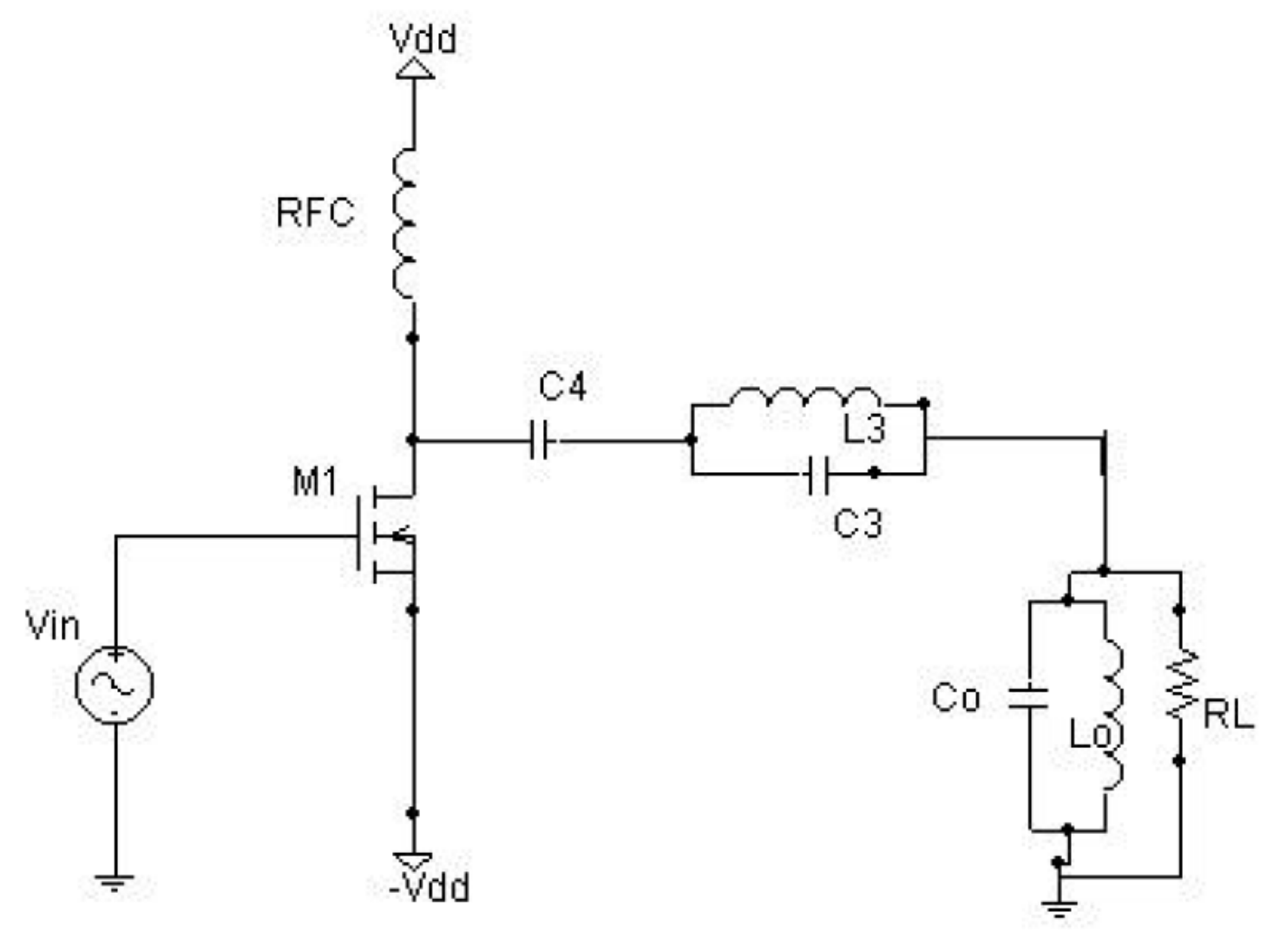
Класс E



Класс E


V_{∞}
V_S
I_L
L_2
C_1
V_O
I_S
V_{in}
I_C
C_S
R_L
Z_{opt}
ON
OFF
V_{in}
I_S
V_S
VDD
V_O
time

Класс F



Класс F

$$V_d(\theta) = V_{DD} + V_{om} \cdot \sin\theta + V_{om3} \cdot \sin(3\theta)$$

$$V_{om3} = \frac{V_{om}}{9} \qquad V_{om} = \frac{9}{8} \cdot V_{DD}$$

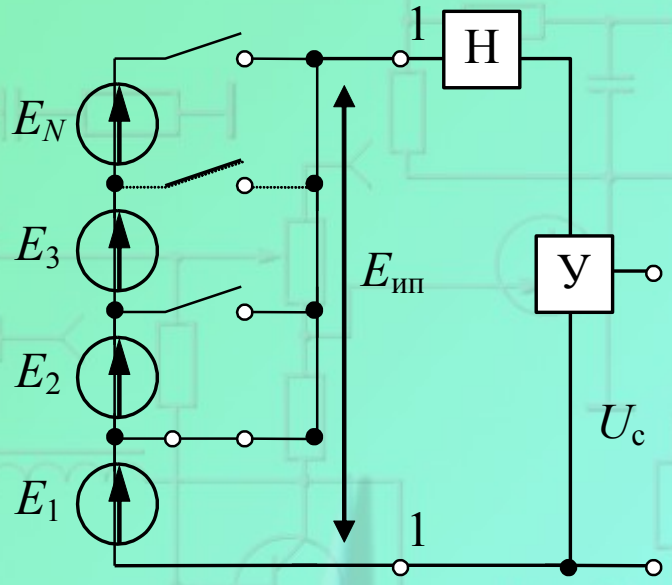
$$I_{dc} = \frac{I_{dm}}{\pi} \qquad P_{dc} = V_{DD} \cdot \frac{I_{dm}}{\pi}$$

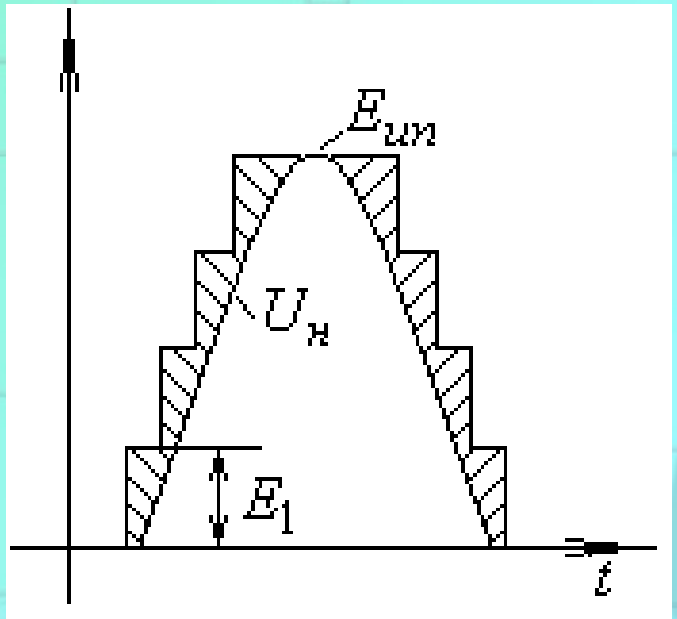
$$I_{om} = \frac{I_{dm}}{2} \cdot \sin\theta \quad , \qquad P_{o\max} = \frac{I_{dm}}{4} \cdot V_{om} \quad ,$$

$$\eta_{\max} = \frac{P_{o\max}}{P_{dc}} \cdot 100 = \frac{\frac{I_{dm}}{4}}{\frac{I_{dm}}{\pi}} \cdot \frac{\frac{9}{8} V_{DD}}{V_{DD}} \cdot 100 = 88.36\%$$

Реализация ключевого режима (класс I)

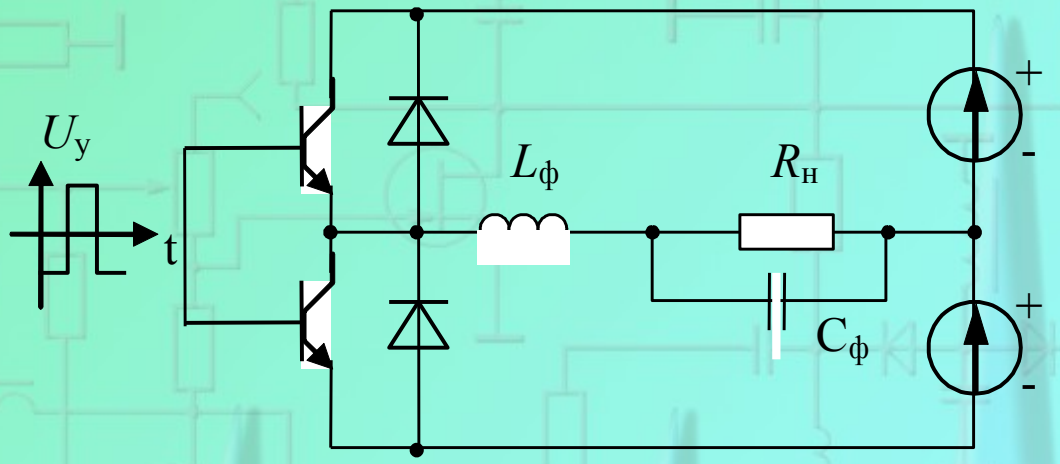
- напряжение источника питания должно “следить” за изменением напряжения на нагрузке
- напряжение нагрузки должно “повторять” напряжение источника питания



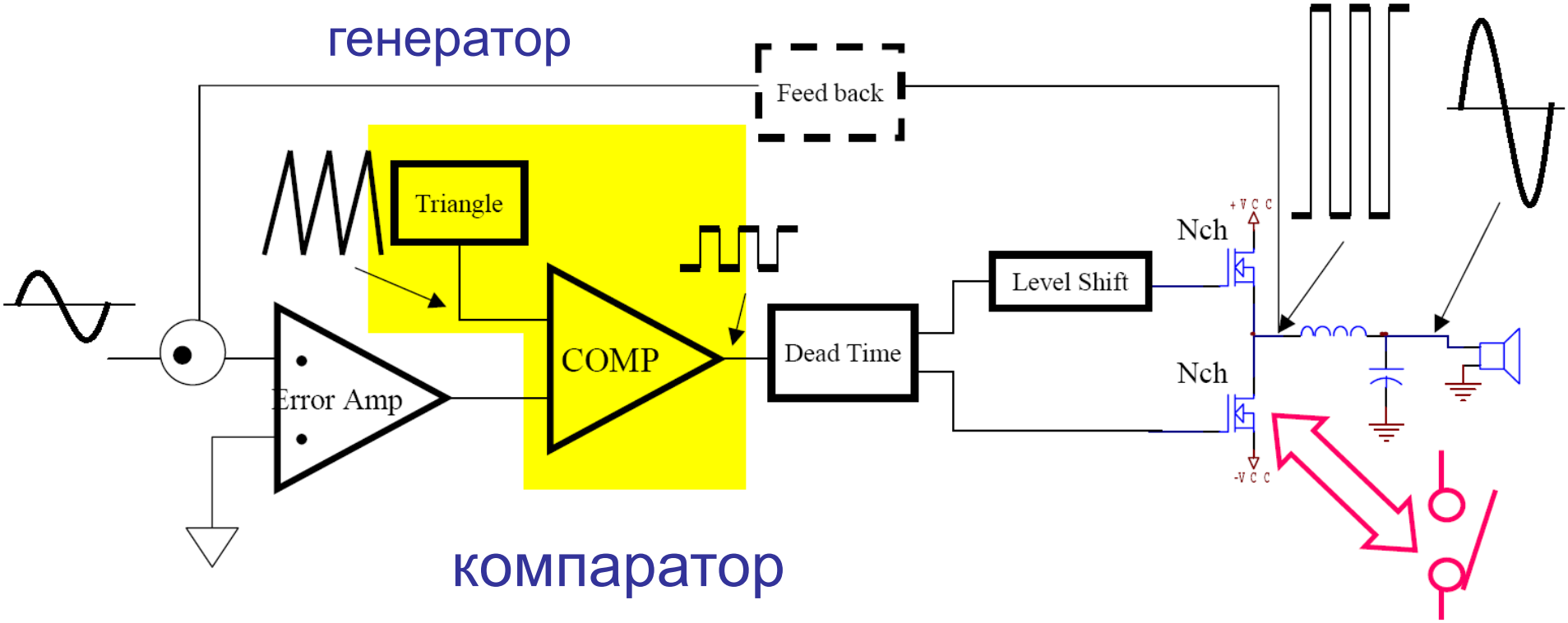


Схемотехника ключевых усилителей

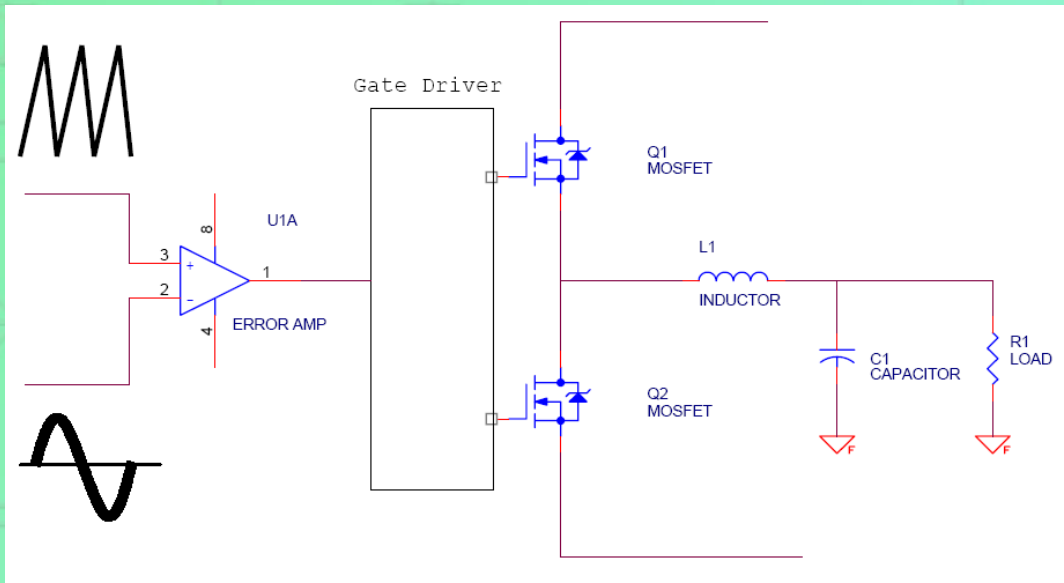
При передаче положительной или отрицательной полярности сигнала увеличивается длительность соответственно положительных или отрицательных импульсов управления, в спектре которых появляются составляющие с частотой сигнала, которые фильтром не подавляются и поступают в нагрузку

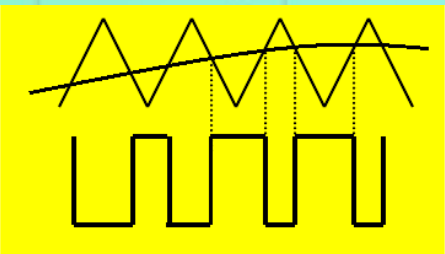


Класс D


генератор
Feed back
Triangle
Error Amp
COMP
Dead Time
Level Shift
Nch
Nch
+VCC
-VCC
компаратор

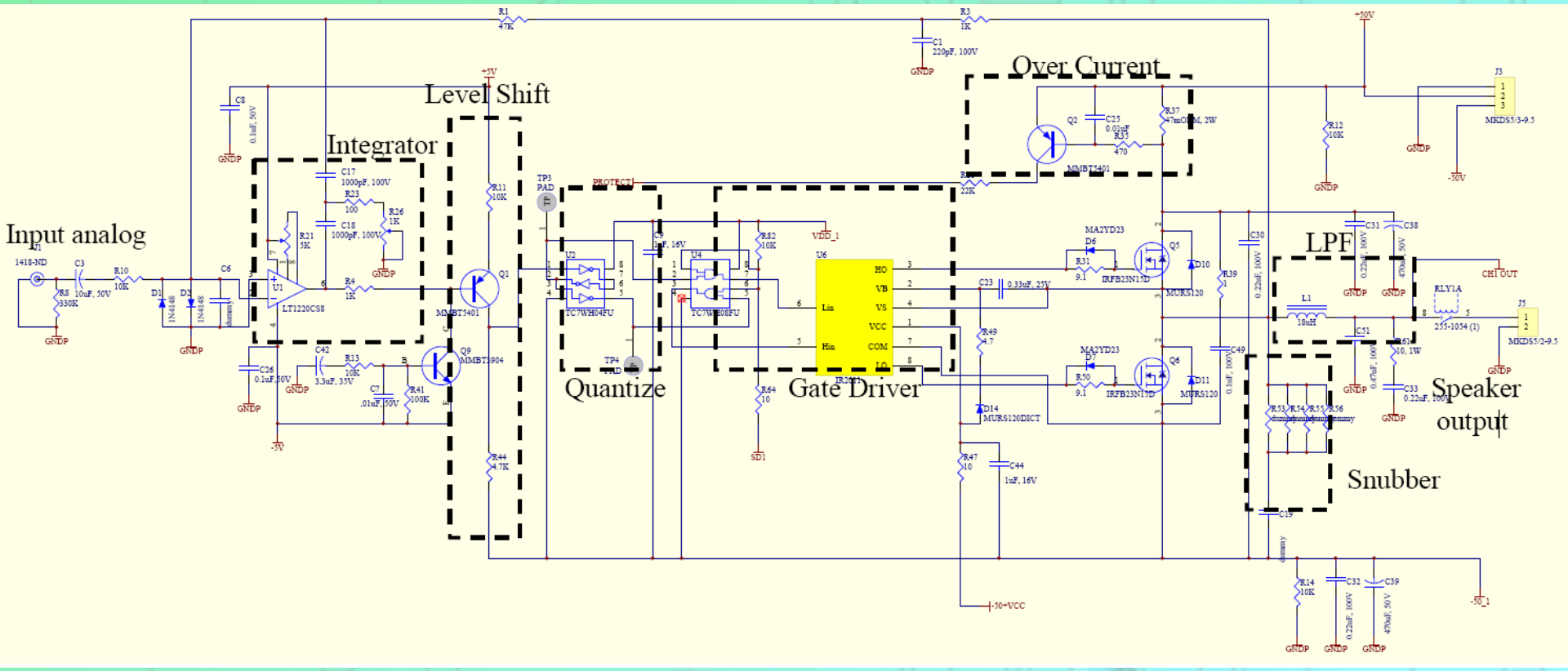
Класс D





Выходной сигнал компаратора во много раз больше опорного синусоидального сигнала

Класс D


Input analog
Integrator
Level Shift
Over Current
Quantize
Gate Driver
LPF
Speaker output
Snubber

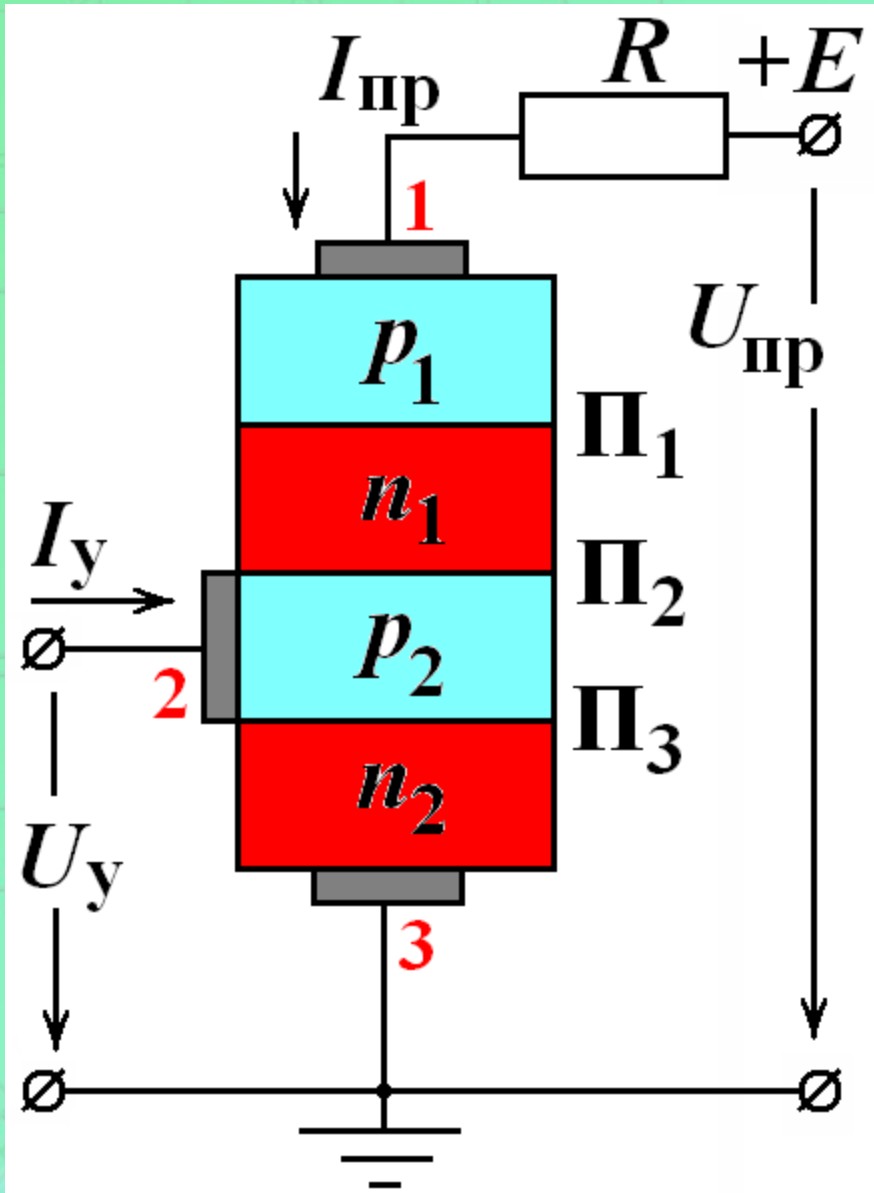
Тиристор

Oleg Stukach
TPU, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia E-mail: tomsk@ieee.org

Тиристоры

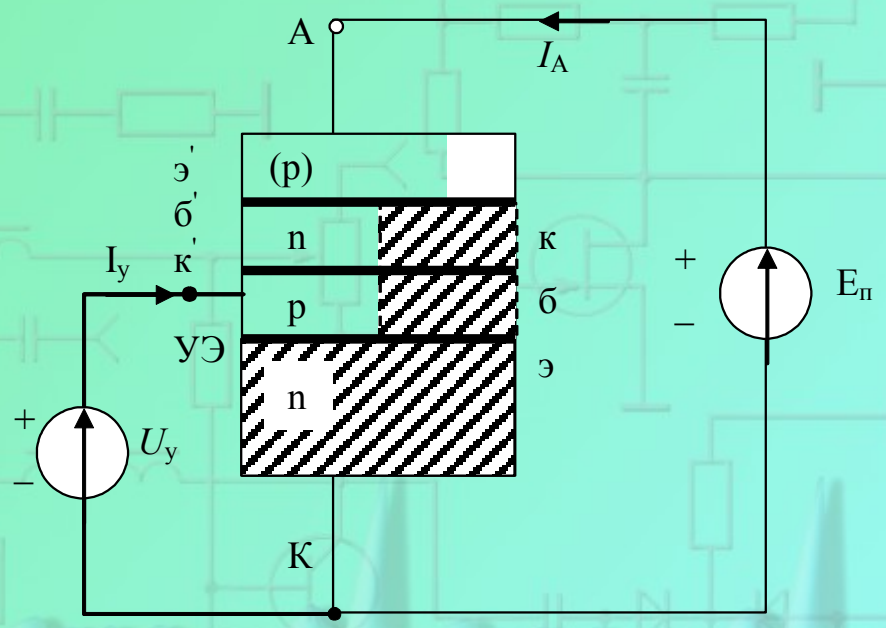
- Тиристоры – это электрически управляемые элементы, особенностью которых является работа *только в ключевом режиме*.

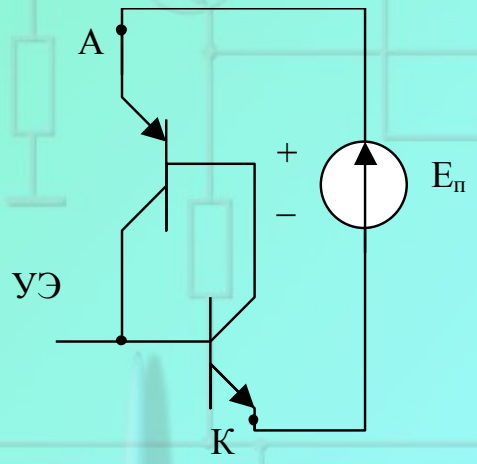
Структурное устройство тиристора

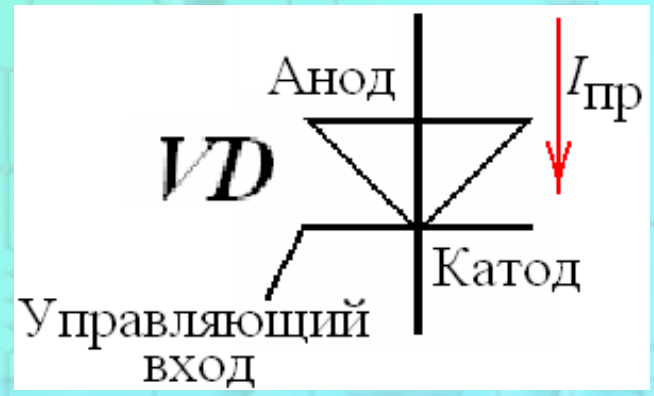


1,2,3 – выводы анода, управляющего электрода и катода.

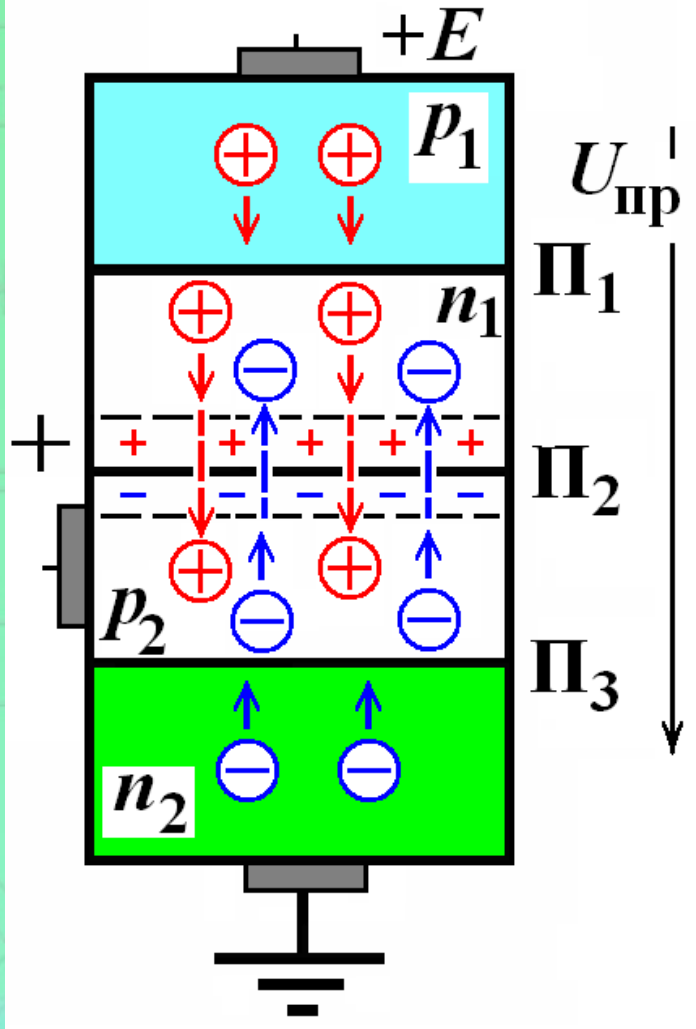
Условное графическое изображение тиристора





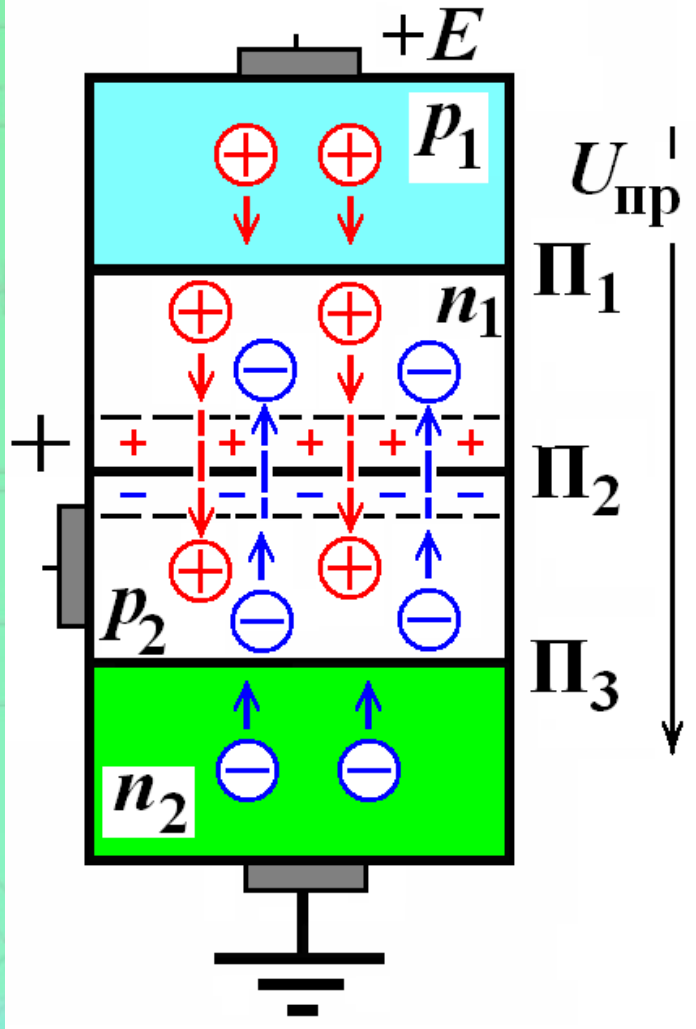


Принцип работы тиристора



Если между анодом (А) и катодом (К) приложено положительное напряжение, то обе транзисторные структуры оказываются в активном усилительном режиме. Благодаря усилительным свойствам даже кратковременное задание тока базы одному транзистору через управляющий элемент (УЭ) приводит к лавинообразному нарастанию тока в этой кольцевой структуре. В результате оба транзистора оказываются в насыщении, а сопротивление участка анод-катод снижается до минимально возможной величины. Войдя в насыщение, транзисторы теряют усилительные свойства и теряют управляемость – запереть их воздействием на УЭ невозможно

Принцип работы тиристора



Переходы П1 и П3 открыты, а переход П2 — закрыт, питающее напряжение $U_{ПР}$ приложено к П2, ток тиристора мал и тиристор заперт.

При повышении $U_{ПР}$ ток тиристора увеличивается незначительно, пока напряжение $U_{ПР}$ не приблизится $U_{ВКЛ}$.

Происходит лавинный пробой в П2 движущимися электронами и дырками.

Тиристор может находиться в двух устойчивых состояниях: открытом и закрытом.

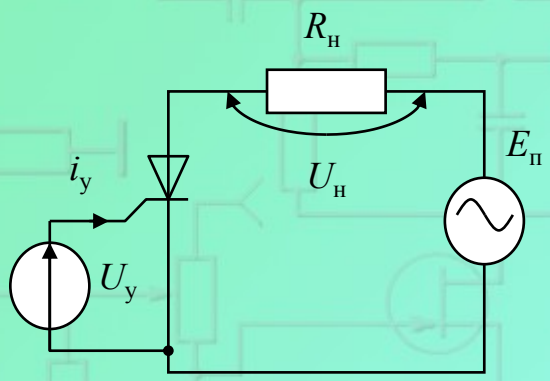
Маломощный положительный импульсный сигнал подается на вход управления и открывает тиристор, цепи анод – катод появляется ток $I_{ПР}$.

Чтобы закрыть тиристор необходимо снизить этот ток до значения, меньше чем $I_{ВКЛ}$. Тиристор также можно открыть большим по величине прямым напряжением $U_{ВКЛ}$. Простейшим тиристором с двумя выводами: анод и катод, является динистор. Он также работает в ключевом режиме и открывается при превышении напряжением между выводами величины $U_{ВКЛ}$.

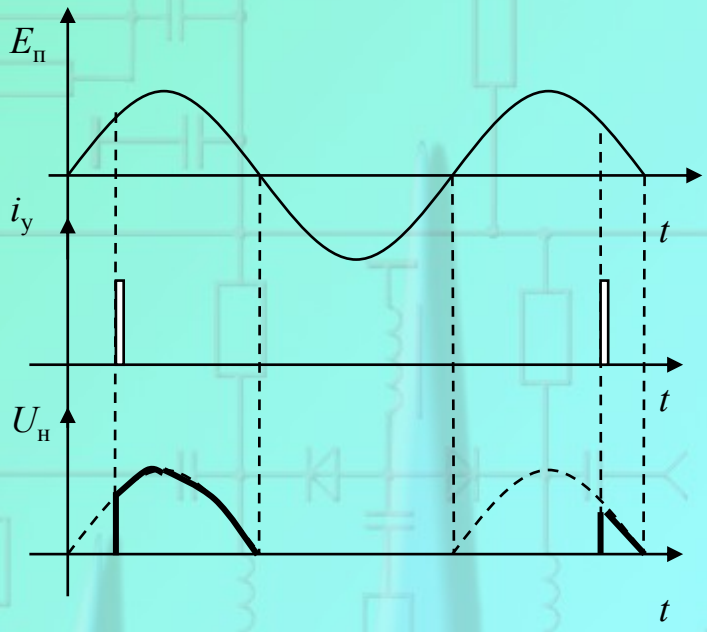
Запирание тиристора

- Запирание транзистора возможно за счет смены полярности напряжения анод-катод на противоположную. При знакопеременном источнике отключение происходит автоматически каждую отрицательную полуволну.

Схема тиристорного регулятора переменного напряжения

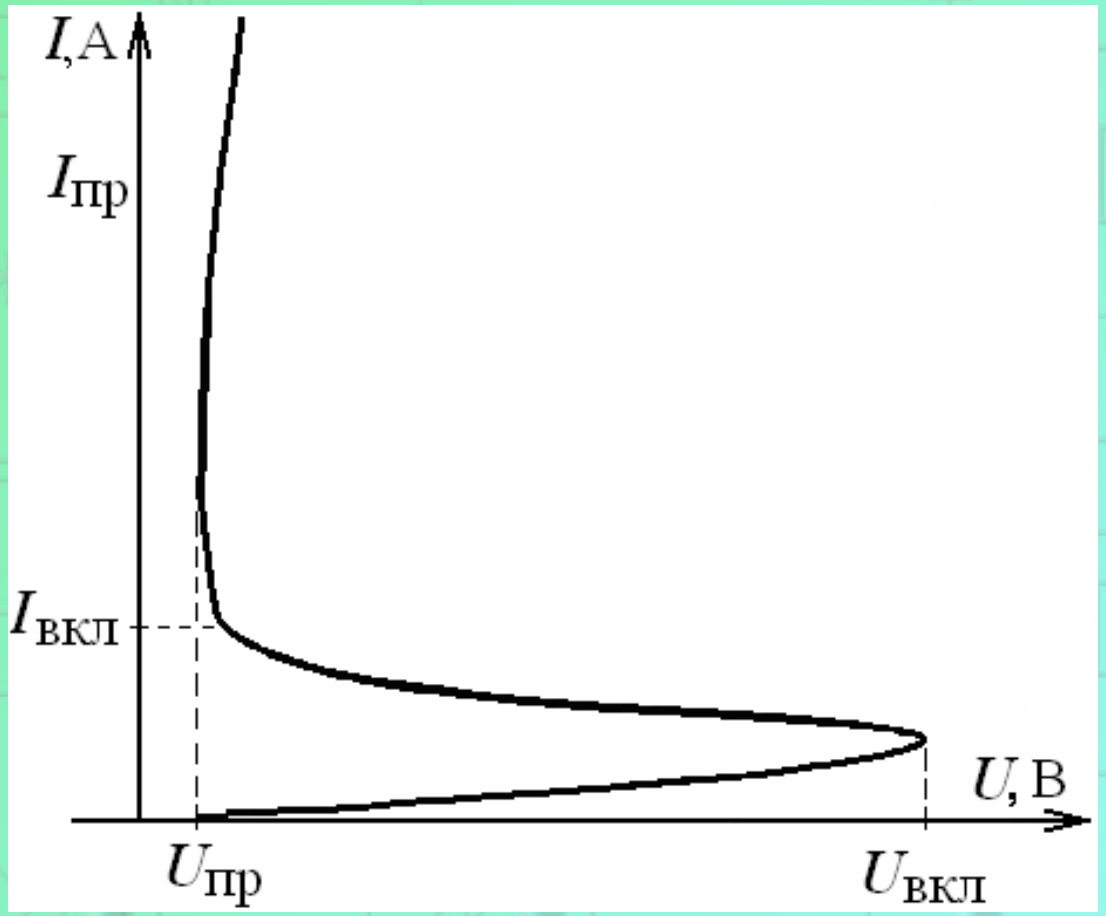


а



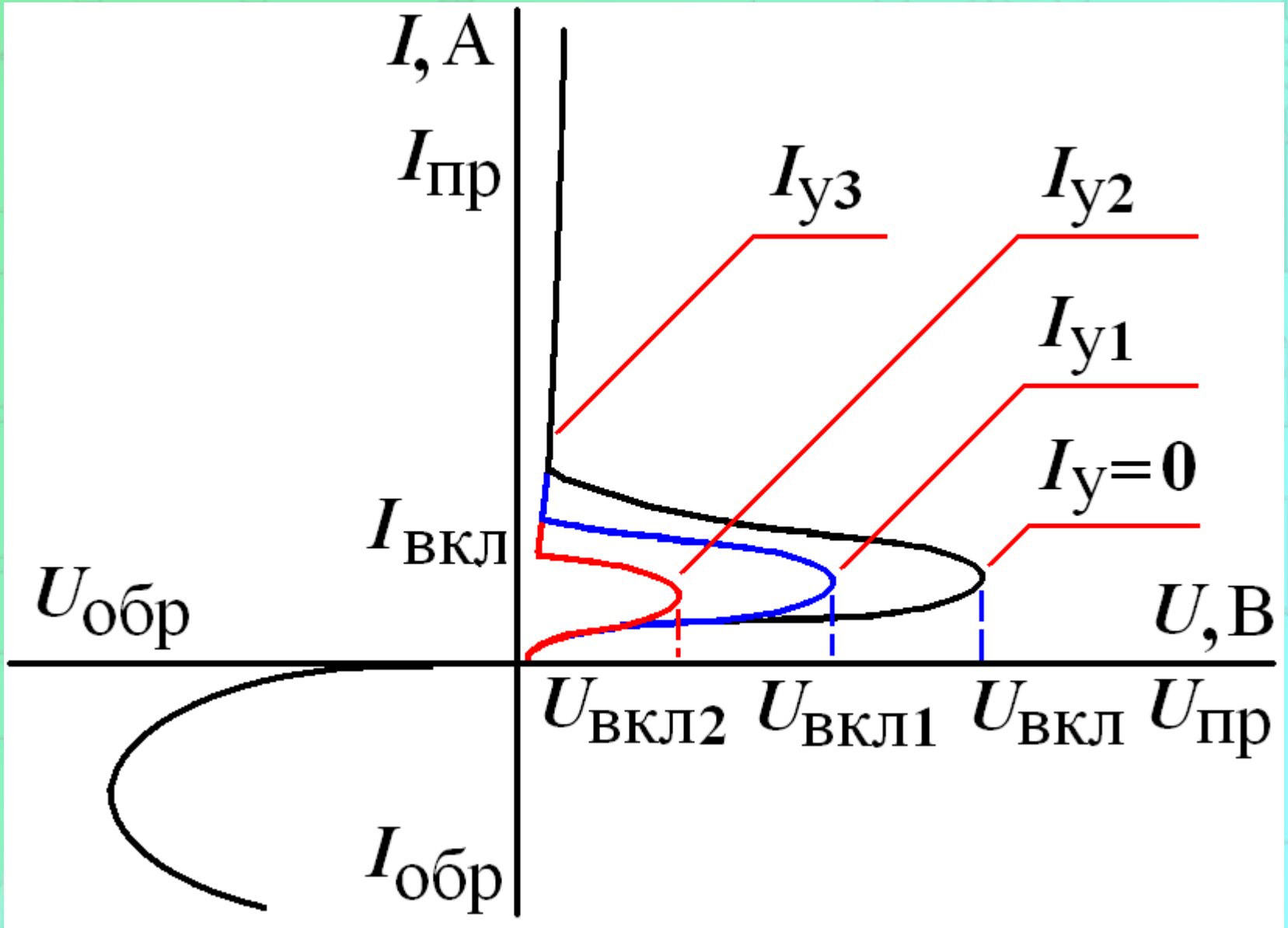
б

Вольтамперная характеристика тиристора



Выпускаются тиристоры на токи до десятков кА, $U_{вкл}$ десятки кВ

Они применяются в управляемых выпрямителях, инверторах, коммутационной аппаратуре



Вольтамперная характеристика тиристора при разных токах управления