

# Глава 5

## Выходные и предвыходные каскады

### 5.1 Краткие теоретические сведения

Назначение выходного каскада усиления (ВКУ) – обеспечить при заданном сопротивлении нагрузки требуемый уровень сигнала (мощность) в нагрузке при допустимых линейных и нелинейных искажениях, а также возможно меньшем потреблением энергии от источника питания (максимальном КПД). В этом случае усилительный элемент (УЭ) должен обеспечить отдаваемую мощность

$$P_{отд} = \frac{U_{т.вых} I_{т.вых}}{2}$$

Усилительные элементы в ВКУ работают в режиме класса «А», «В» или в комбинационных режимах, например, «АВ», «Н».

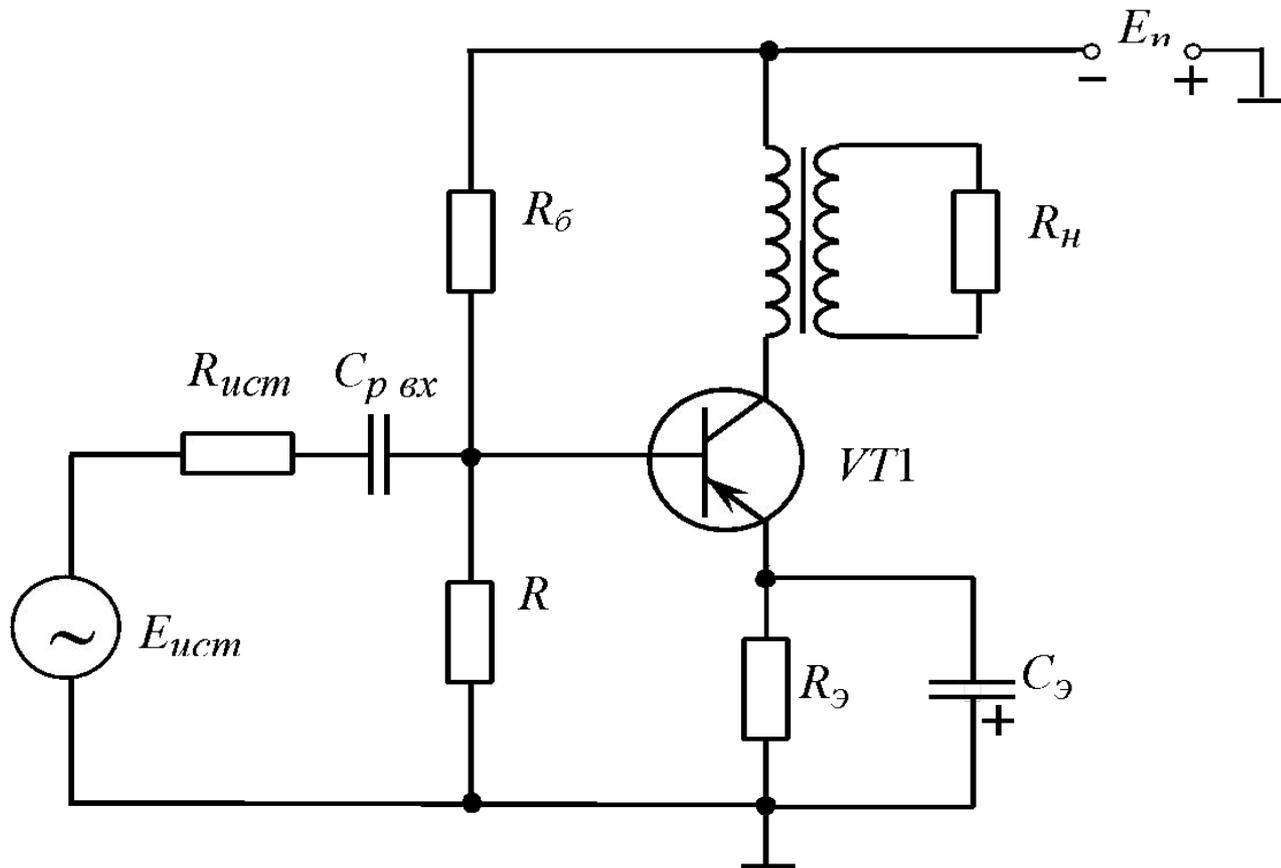
Мощные избирательные усилители (в радиопередающих устройствах) могут работать в режиме «С», «Е» или их разновидностях.

**Для режима класса «А»** рабочая точка (РТ) выбирается на середине линейного участка сквозной динамической характеристики (характеристики прямой передачи) усилительного элемента (УЭ). Этот режим чаще используются в предварительных каскадах усиления, а также в маломощных предвыходных и выходных каскадах при жестких требованиях к нелинейным искажениям в ВКУ. Максимально возможный КПД в режиме «А» составляет 50% (реальный – не более 30%).

**В режиме класса «В»** РТ выбирается при нулевом или очень малом напряжении смещения. Этот режим характеризуется высоким КПД (до 78,5%) и большими нелинейными искажениями, по сравнению с режимом класса «А». Для уменьшения искажений используются двухтактные схемы в классе «В», в которых используется не менее двух УЭ, работающих поочередно (для усиления положительного и отрицательного полупериодов).

## 5.2 Трансформаторный выходной каскад

На рисунке приведена схема однотактного усилителя мощности в режиме «А» с **трансформаторной схемой** связи с нагрузкой.



Однотактный усилитель мощности с трансформаторной связью с нагрузкой

Трансформаторная схема ВКУ имеет два основных **преимущества**:

- позволяет заданное сопротивление нагрузки преобразовать к оптимальному значению, при котором УЭ отдает максимальную мощность в нагрузку;
- позволяет повысить КПД ВКУ, так как уменьшает потери в выходной цепи в связи с малым сопротивлением первичной обмотки трансформатора по постоянному току, и обеспечить максимальную отдаваемую мощность для заданного режима работы.

$$U_{K0} = E_{\Pi} - i_{K0}R_{H=} \approx E_{\Pi} - i_{K0}R_{\Sigma},$$

где  $R_{H=}$  – сопротивление нагрузки по постоянному току:  $R_{H=} = R_{\Sigma} + r_1 \approx R_{\Sigma}$ , так как  $r_1 \ll R_{\Sigma}$ ;  $r_1$  – активное сопротивление первичной обмотки трансформатора.

Кроме этого, при трансформаторной связи усилительного каскада с источником трансформатор позволяет обеспечить равенство сопротивления источника входному сопротивлению трансформатора (условие согласования), при котором максимизируется коэффициент передачи по мощности.

К **недостаткам** трансформаторного каскада относится:

- большие размеры, масса и стоимость;
- сравнительно узкая полоса рабочих частот;
- большие фазовые искажения, затрудняющие обеспечить большую глубину общей ООС (в связи с опасностью самовозбуждения усилителя);
- невозможность выполнения усилителя по интегральной технологии.

**Режим работы транзистора** выбирается из следующих соображений:

1. Чтобы обеспечить получение заданной мощности в нагрузке ( $P_H$ ), рассеиваемая на коллекторе транзистора мощность в режиме класса «А» не должна быть меньше величины

$$P_K = \frac{2P_{омд}}{\xi\psi} = \frac{2P_H}{\eta_{тр}\xi\psi}$$

где  $\eta_{тр}$  – КПД выходного трансформатора (0,8 – 0,95);

$\xi = \frac{U_{mk}}{U_{кэ0}}$  - коэффициент использования транзистора по напряжению;

$\psi = \frac{I_{mk}}{i_{к0}}$  - коэффициент использования транзистора по току.

Коэффициенты использования по току и напряжению принимают одинаковыми и не превышающими 0,7 для получения достаточно малых нелинейных искажений.

С другой стороны,  $P_K = U_{K0} i_{K0}$ . Поэтому для любого напряжения на коллекторе ток коллектора не должен быть ниже величины

$$i_{K0} \geq \frac{P_K}{U_{K0}}.$$

2. Напряжение на коллекторе  $U_{KЭ0}$  не должно быть слишком малым, то есть не должно выбираться вблизи области насыщения транзистора. Для большинства транзисторов, предназначенных для усиления сигналов,  $U_{KЭ.нас}$  не превышает (0,5 ÷ 2) В. Поэтому  $U_{KЭ0}$  мин должно быть не менее (1,5 ÷ 3)  $U_{KЭ.нас}$  (с учетом запаса на нестабильность рабочей точки). С другой стороны, максимальное значение  $U_{KЭ0макс}$  не должно превышать (0,7 ÷ 0,8)  $E_n$ , поскольку часть выходного напряжения будет падать на сопротивлении  $R_{Э}$ , которое выполняет функцию стабилизации постоянного коллекторного тока.

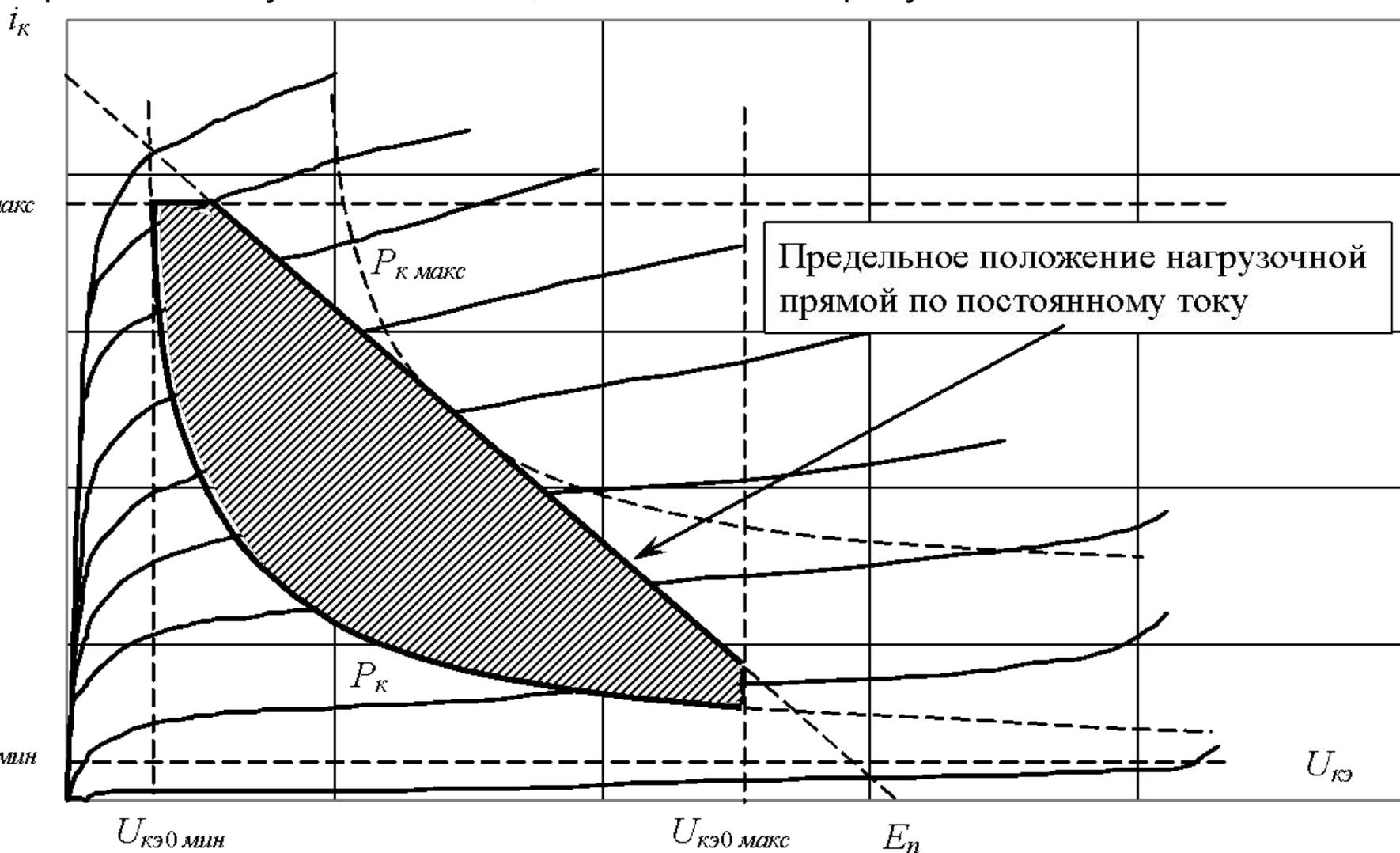
3. Постоянный коллекторный ток  $i_{к0}$  также не должен быть слишком малым. Для маломощных транзисторов при  $i_{к0} < 2\text{мА}$  усилительные свойства транзистора резко снижаются. С другой стороны,  $i_{к0}$  не должно приближаться к максимально допустимому значению коллекторного тока ( $i_{к0\text{доп}}$ ), заданному в справочнике для данного транзистора. С учетом амплитуды переменной составляющей  $i_{к0\text{макс}} < 0,45 i_{к0\text{доп}}$ .

4. При любом напряжении на переходе  $к-э$  рассеиваемая на транзисторе мощность  $P_{к} = U_{кэ0} i_{к0}$  не должна превышать значение максимально допустимой мощности  $P_{к\text{макс}}$ , заданной в справочнике для данного транзистора.

5. Нагрузочная прямая по постоянному току не должна пересекать линию  $P_{к\text{макс}}$ , поскольку, учитывая дестабилизирующие факторы, рабочая точка может сместиться в область, ограниченную линией  $P_{к\text{макс}}$ , что приведет к перегреву и выходу транзистора из строя. При выбранном  $U_{кэ0}$  ток коллектора в рабочей точке не должен превышать значение

$$i_{к0} \leq \frac{2P_{к\text{макс}}}{U_{к0}}$$

Таким образом, рабочая точка может быть выбрана в области, ограниченной условиями 1–5, как показано на рисунке.



Область выбора рабочей точки транзистора  
Глава 5. Выходные и  
предвыходные каскады

Желательно выбирать рабочую точку вблизи линии  $P_K$ , поскольку при больших токах возрастает рассеиваемая на коллекторе транзистора мощность, что приведет к повышению температуры  $p-n$  перехода (саморазогреву транзистора), а следовательно к большей нестабильности режима работы.

При использовании БТ для получения малых нелинейных искажений коэффициент использования  $\xi = \psi = 0,5 \dots 0,7$ .

Максимальная отдаваемая мощность транзистора обеспечивается при оптимальной нагрузке:

$$R_{K\sim} = R_{opt} = \frac{\xi U_{K0}}{\psi i_{K0}} = \frac{U_{K0}}{i_{K0}}.$$

Поскольку входное сопротивление трансформатора равно:

$$R_{ex.тр} = R_{K\sim} = \frac{R_H}{\eta_{тр}^2},$$

то

$$R_{onm} = R_{\kappa\sim} = \frac{R_H}{\eta_{onm\ mp}^2},$$

откуда

$$\eta_{onm} = \sqrt{\frac{R_H}{R_{onm\ mp}}}.$$

Расчет выходного каскада производится графоаналитическим методом, для чего используются входные и выходные статические характеристики транзистора и строятся выходные динамические характеристики (нагрузочные прямые), под которыми понимается зависимость выходного тока транзистора от напряжения при заданной нагрузке. Поскольку цепи выходного постоянного и переменного тока (и, следовательно, сопротивления цепей) разные, то различают нагрузочные прямые по постоянному и переменному току.

Нагрузочная прямая (выходная динамическая характеристика) по постоянному току, необходимая для расчета элементов, обеспечивающих режим работы транзистора, строится в соответствие с уравнением Кирхгофа для выходной цепи (по которой проходит постоянная составляющая выходного тока):

$$E_n = U_{кэ} + i_k R_{H=}$$

где  $R_{H=} = R_{э} + R_{к}$  – для резисторного каскада с эмиттерной стабилизацией;  
 $R_{H=} = R_{э} + r_1 \approx R_{э}$  – для трансформаторных ВКУ с эмиттерной стабилизацией, так как сопротивление первичной обмотки трансформатора  $r_1$  очень небольшое.

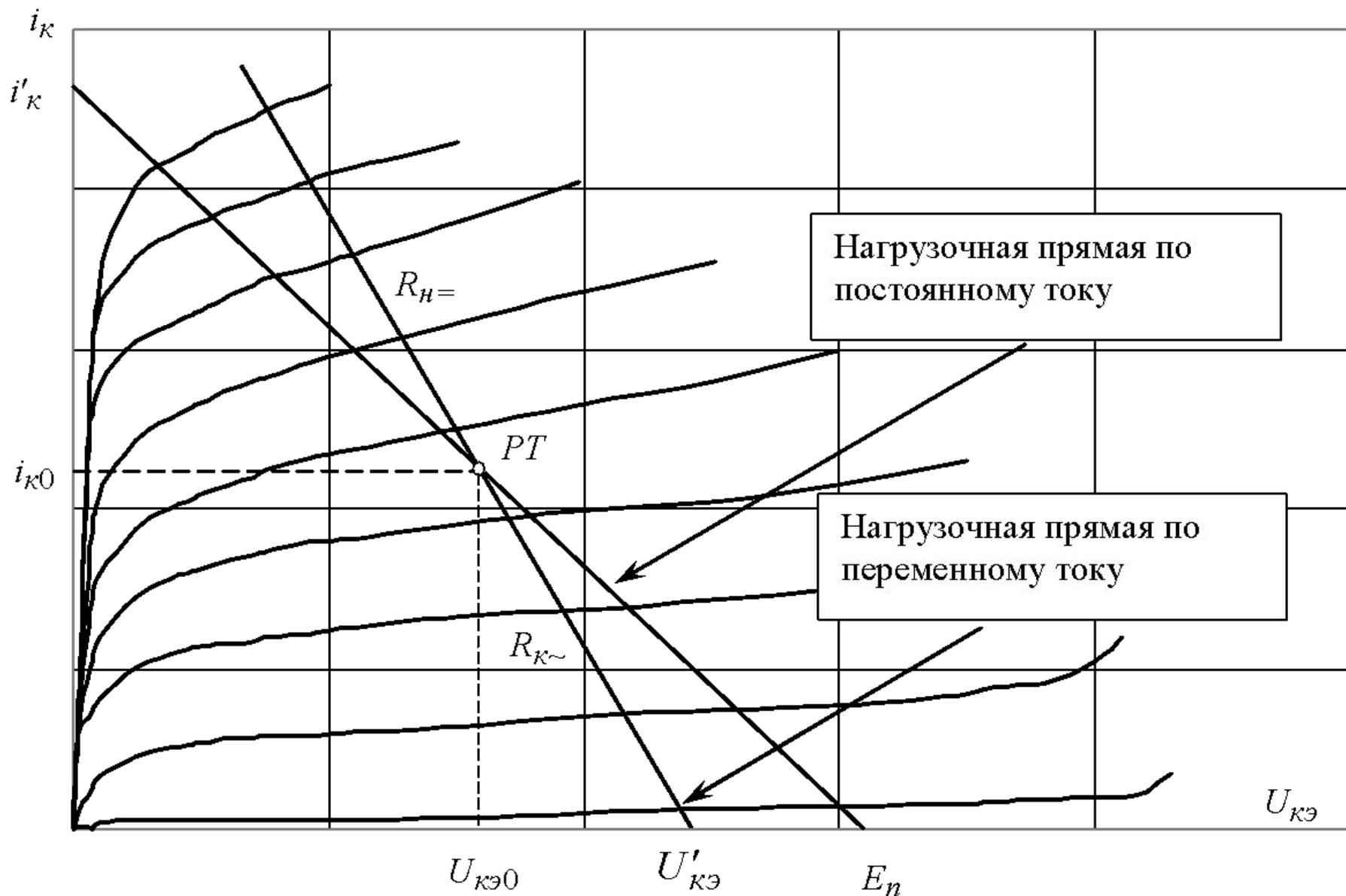
Нагрузочная прямая по постоянному току строится по двум точкам:

1. При  $i_k=0$ ,  $U_{кэ}=E_n$ ;
2. При  $U_{кэ}=0$ ,  $i'_k=E_n/R_H$ .

Динамическая характеристика по переменному току связывает мгновенные значения тока и напряжения при усилении сигнала. Для построения нагрузочной прямой на оси напряжений откладывается точка

$$U'_{кэ} = U_{кэ0} + i_{к0} R_{к\sim}$$

Тогда нагрузочная прямая пройдет через точку ( $i_k=0$ ,  $U_{кэ}=U'_{кэ}$ ) и рабочую точку ( $i_k=i_{к0}$ ,  $U_{кэ}=U_{кэ0}$ ), как показано на рисунке.



Построение выходных динамических характеристик транзистора

Чем больше величина  $R_{K\sim}$ , тем положе идёт нагрузочная прямая. Следует иметь в виду, что в резисторных каскадах нагрузочная прямая по переменному току всегда круче, чем по постоянному току, так как

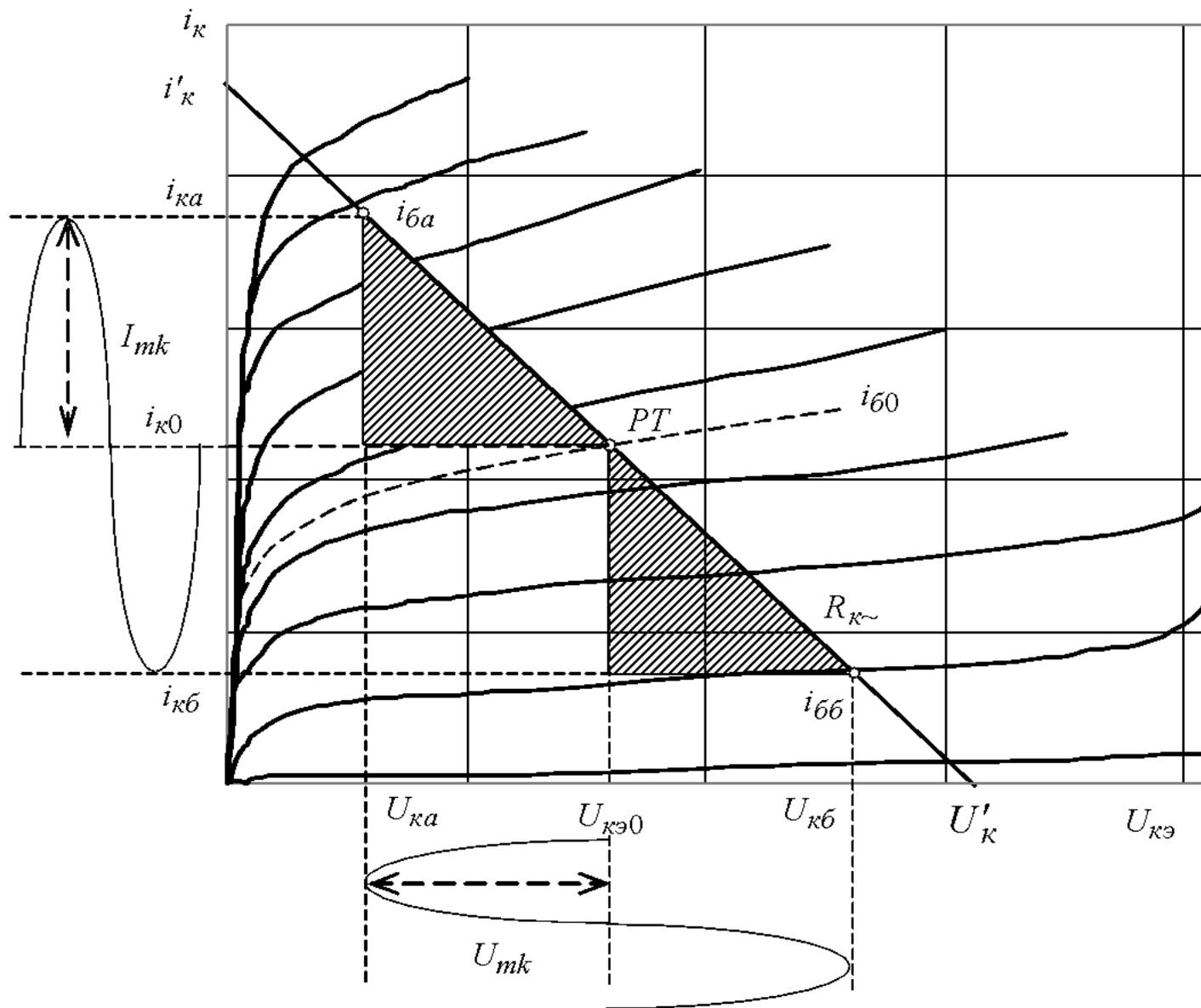
$R_{H\sim} = R_K + R_{\Sigma}$  всегда больше, чем

$$R_{K\sim} = \frac{R_K R_H}{R_K + R_H}$$

Для трансформаторных каскадов положение динамической характеристики зависит не только от  $R_{K\sim}$ , но и от коэффициента трансформации. В этом случае  $U'_{K\Sigma}$  может даже превысить  $E_n$  за счет самоиндукции трансформатора.

Динамическая характеристика по переменному току позволяет определить ряд параметров усилительного каскада (амплитуды входных и выходных токов и напряжений, отдаваемую усилительным элементом мощность, КПД, коэффициенты усиления).

На рисунке показана оптимальная динамическая характеристика по переменному току и треугольники мощности.



Построение треугольников мощности

Оптимальная нагрузочная прямая по переменному току строится для оптимального сопротивления, которое при выбранном режиме работы.

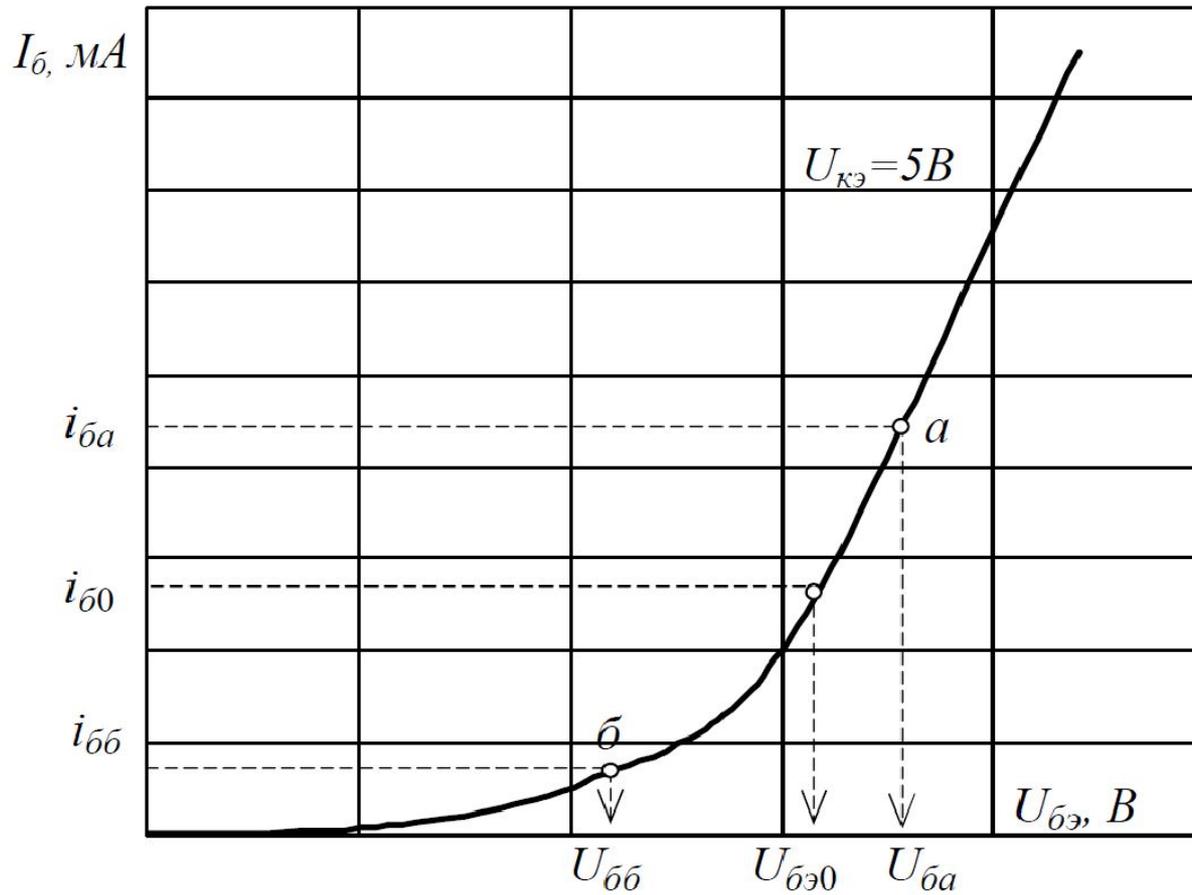
Отдаваемая усилительным элементом мощность равна:

$$P_{отд} = \frac{I_{mk} U_{mk}}{2}.$$

Амплитуды выходных токов и напряжений, а также входного переменного тока, можно определить графически по выходным статическим характеристикам и треугольникам мощности для крайних точек (а, б) изменения сигнала:

$$I_{mk} = \frac{i_{ка} - i_{кб}}{2}; U_{mk} = \frac{U_{кб} - U_{ка}}{2}.$$

Амплитуда входного напряжения определяется по входной динамической характеристике (которая совпадает со статической при  $U_{кэ} > 0$ ) и крайним точкам изменения тока базы (рисунок):



Входная характеристика транзистора

Из графических построений можно определить коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности

$$K_T = \frac{I_{mk}}{I_{mб}} \quad K = \frac{U_{mk}}{U_{mб}} \quad K_M = K_T K$$

входное сопротивление транзистора

$$R_{вхэ} = \frac{U_{mб}}{I_{mб}}$$

а также коэффициент полезного действия усилительного элемента

$$\eta = \frac{P_{омд}}{P_k} = \frac{U_{mk} I_{mk}}{2U_{кэ0} i_{к0}}$$

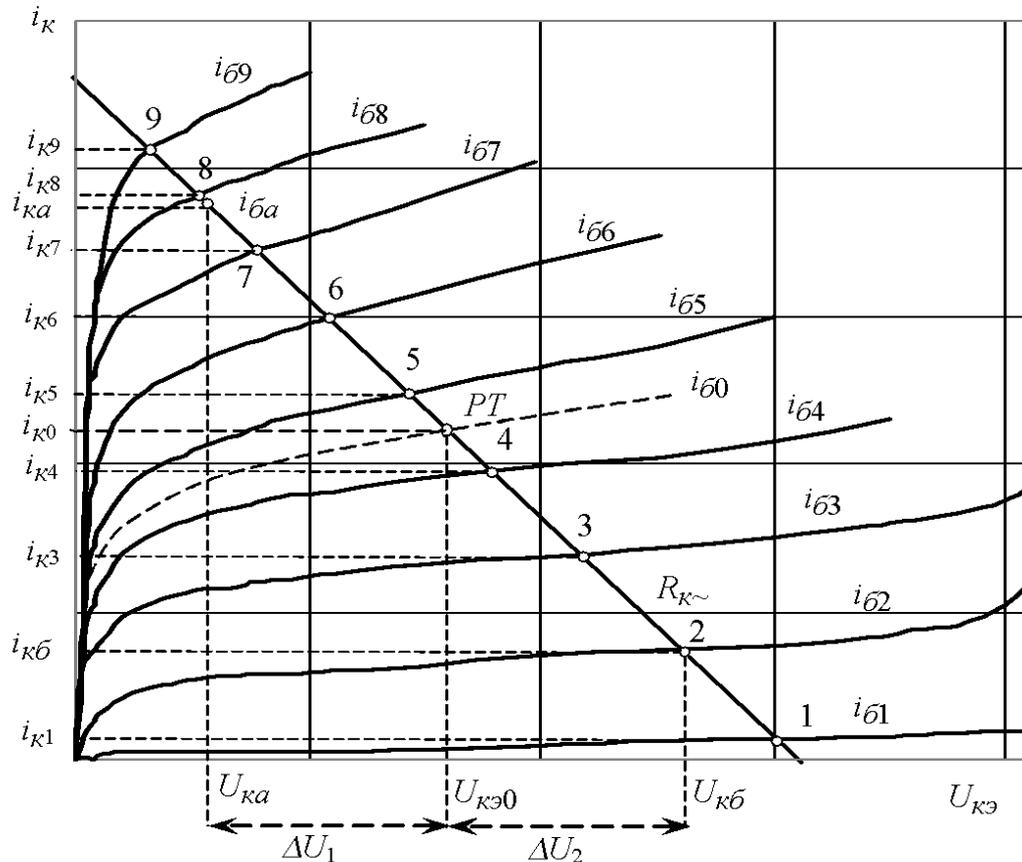
Поскольку выходные каскады работают в условиях возможно более полного использования статических и динамических характеристик, в этих каскадах могут возникать заметные нелинейные искажения из-за влияния нелинейности характеристик транзисторов. Коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник  $K_g$ ) определяется графоаналитическим методом с применением метода пяти ординат по сквозной динамической характеристике  $i_k(e'_{уст})$ , где

$$e'_{уст} = i_b R'_{уст} + U_{бэ},$$

$$R'_{уст} = \frac{R_\delta R_{вхэ}}{R_\delta + R_{вхэ}},$$

$$R_\delta = \frac{R_\sigma R}{R_\sigma + R}.$$

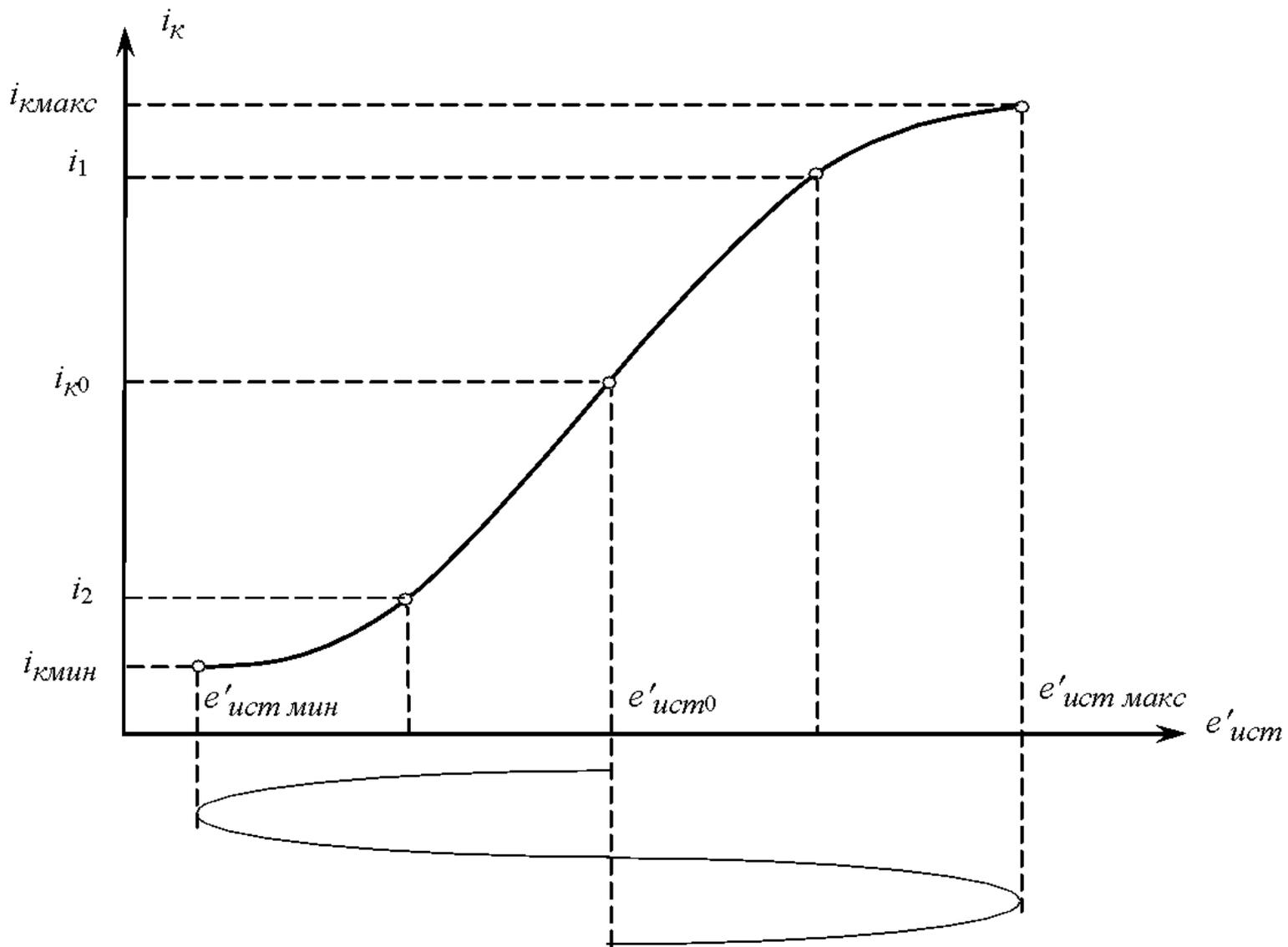
Для построения сквозной динамической характеристики используется нагрузочная характеристика по переменному току. Значения токов коллектора определяются в точках пересечения нагрузочной прямой со статическими характеристиками транзистора (для различных токов базы), как показано на рисунке. На характеристике отмечено 9 точек пересечения.



Определение токов коллектора и базы для построения сквозной динамической характеристики  
 Глава 5. Выходные и предвыходные каскады

Порядок построения сквозной динамической характеристики:

1. Для отмеченных точек пересечения определяются токи коллектора и соответствующие значения токов базы. Достаточно взять 5 – 7 точек.
2. По входной статической характеристике для найденных токов базы определяются соответствующие значения напряжения  $U_{бэ}$ .
3. С учетом эквивалентного сопротивления источника  $R'_{ист}$  определяются соответствующие значения  $e'_{ист}$  и строится искомая характеристика.
4. По оси абсцисс интервал между  $e'_{ист \text{ мин}}$  и  $e'_{ист \text{ макс}}$  делится на четыре равные части и находятся токи  $i_{кмакс}$ ,  $i_1$ ,  $i_{к0}$ ,  $i_2$ ,  $i_{кмин}$ .



Сквозная динамическая характеристика

По формулам метода пяти ординат находятся амплитуды выходного тока основной частоты ( $I_{m1}$ ), амплитуды гармоник ( $I_{m2}$ ,  $I_{m3}$ ,  $I_{m4}$ ) и среднее значение выходного тока ( $i_{cp}$ ):

$$I_{m1} = \frac{i_{\max} - i_{\min} + i_1 - i_2}{3}$$

$$I_{m2} = \frac{i_{\max} + i_{\min} - 2i_{k0}}{4}$$

$$I_{m3} = \frac{i_{\max} - i_{\min} + 2(i_1 - i_2)}{6}$$

$$I_{m4} = \frac{i_{\max} + i_{\min} - 4(i_1 + i_2) + 6i_{k0}}{12}$$

$$i_{cp} = \frac{i_{\max} + i_{\min} + 2(i_1 + i_2)}{6}$$

Если расчеты выполнены верно, то должно выполняться равенство:

$$i_{\text{макс}} = i_{\text{ср}} + I_{m1} + I_{m2} + I_{m3} + I_{m4}$$

Коэффициент гармоник выходного каскада будет определяться по формуле:

$$K_{\Gamma_{\text{вых}}} = \frac{\sqrt{I_{m2}^2 + I_{m3}^2 + I_{m4}^2}}{I_{m1}} \cdot 100\%$$

## 5.3 Бестрансформаторный выходной каскад

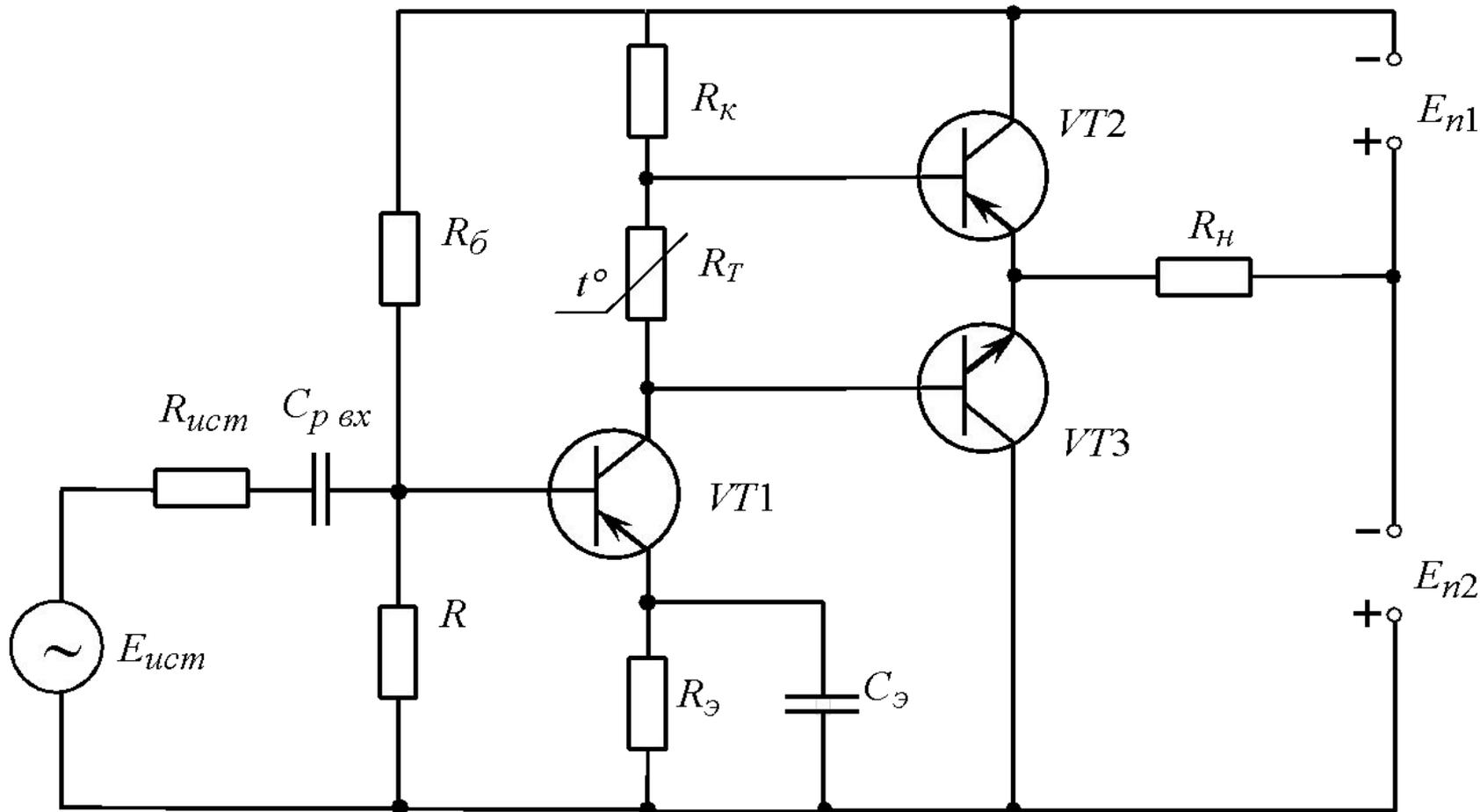
**Бестрансформаторные усилители**, работающие в режиме класса «В», целесообразно применять в случае, если нагрузка близка к оптимальной. Эти усилители широко используются в аппаратуре радиосвязи и радиовещания, поскольку позволяют обеспечить достаточно высокую мощность (до 200 Вт) при высокой стабильности параметров и динамическом диапазоне, малых искажениях, габаритах, весе и стоимости.

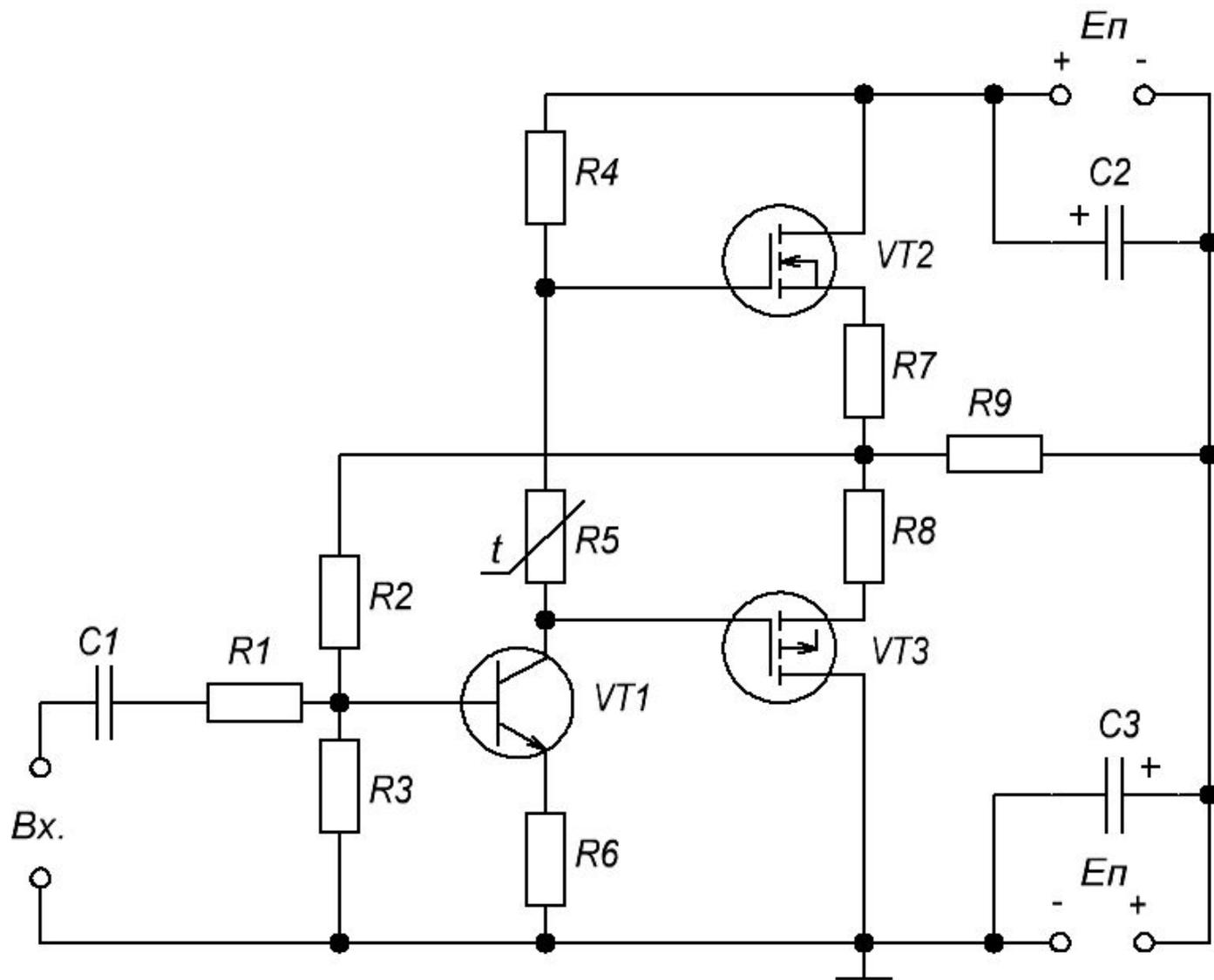
Очень часто бестрансформаторные выходные каскады строятся по двухтактной схеме на биполярных или полевых комплементарных или квазикомплементарных (составных) транзисторах.

Поскольку режим В предполагает ток покоя равный нулю, то двухтактные выходные каскады в этом режиме применяются в составе интегральных микросхем (операционные усилителя, схемы аналоговой и смешанной (аналого-цифровой и цифро-аналоговой) обработки сигналов.

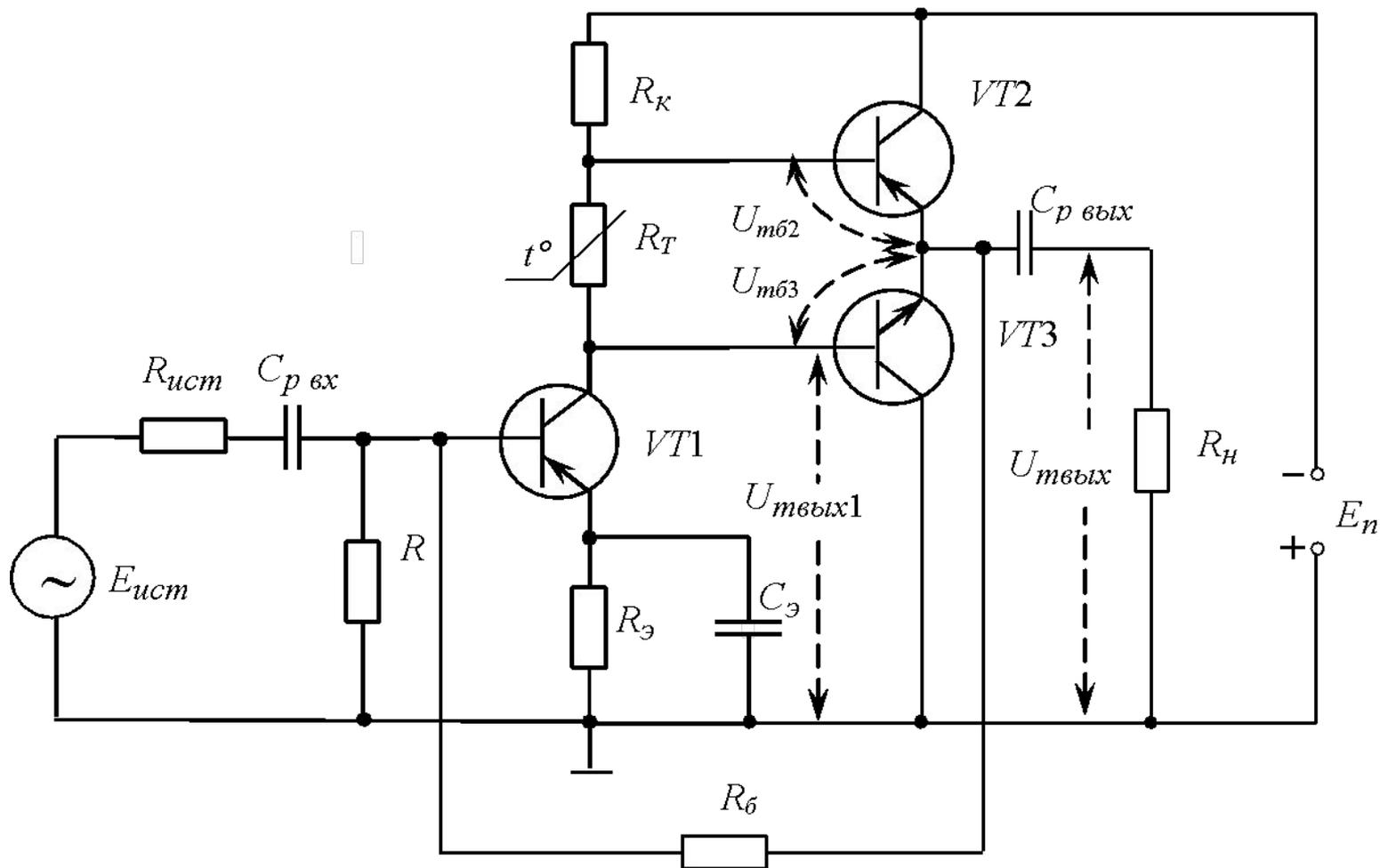
**\*Комплементарные транзисторы** – это пара транзисторов с одинаковыми (насколько это возможно сделать технологически) характеристиками, но с разным типом проводимости.

На рисунке представлен вариант схемы, состоящей из двухтактного выходного и однотоктного предвыходного каскадов усиления. Выходной каскад построен на комплементарных биполярных транзисторах  $VT2$ ,  $VT3$ , работающих в режиме «В» и двумя источниками питания.

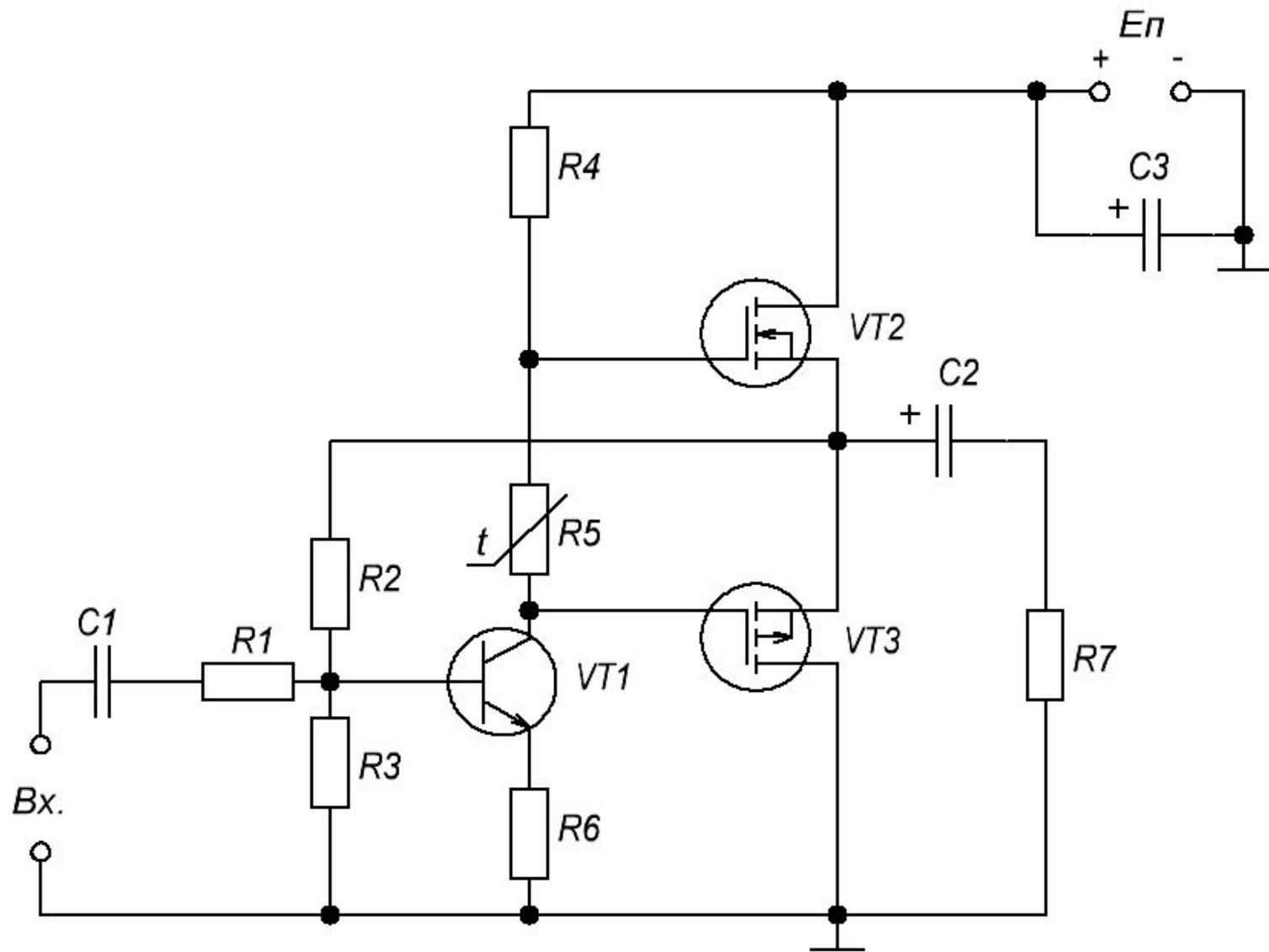




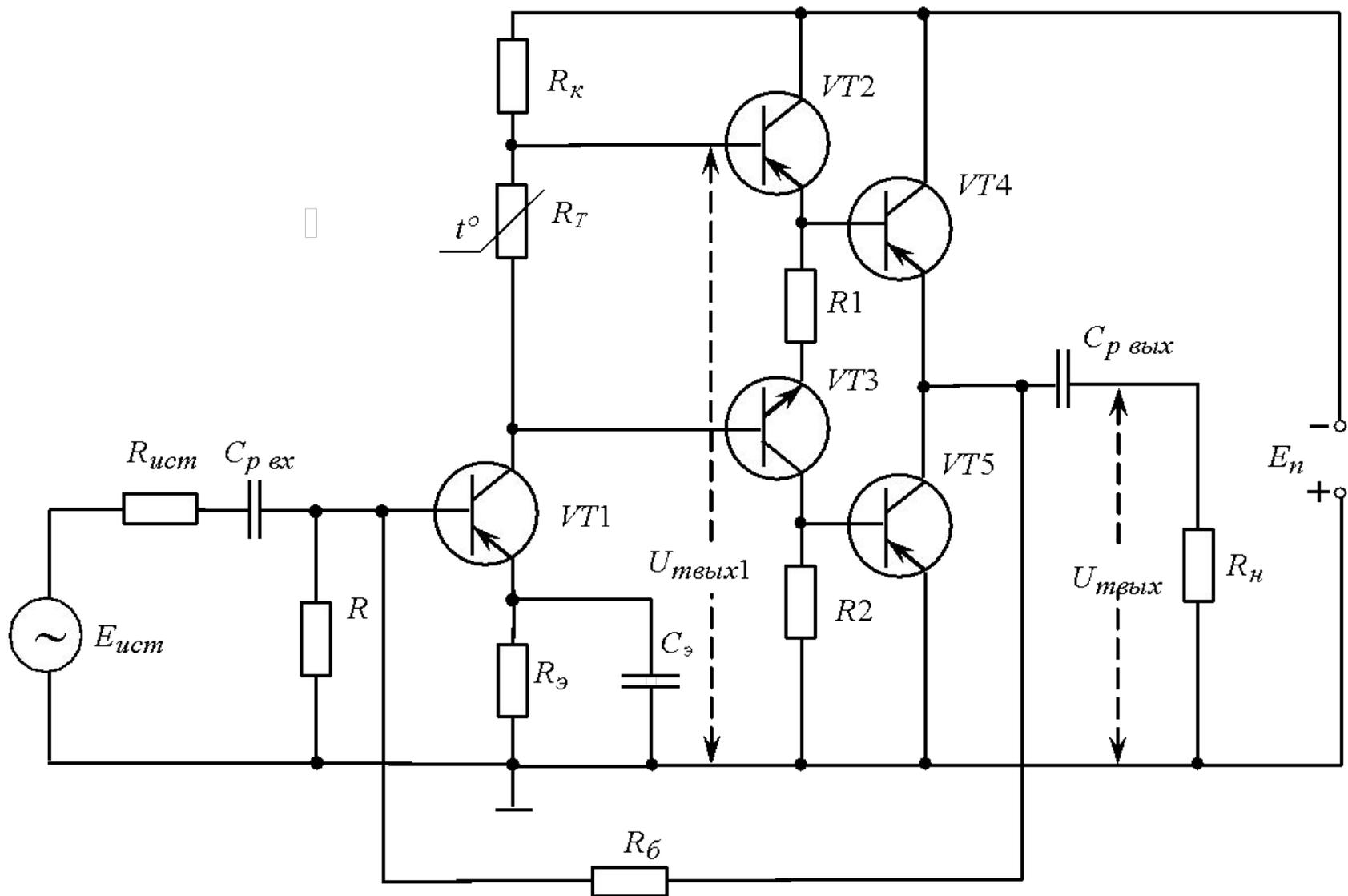
Усилитель мощности на полевых транзисторах с двуполярным источником питания



Усилитель мощности на комплементарных биполярных транзисторах с одним источником питания



Усилитель мощности на комплементарных полевых транзисторах с одним источником питания



Усилитель мощности на составных транзисторах с одним источником питания

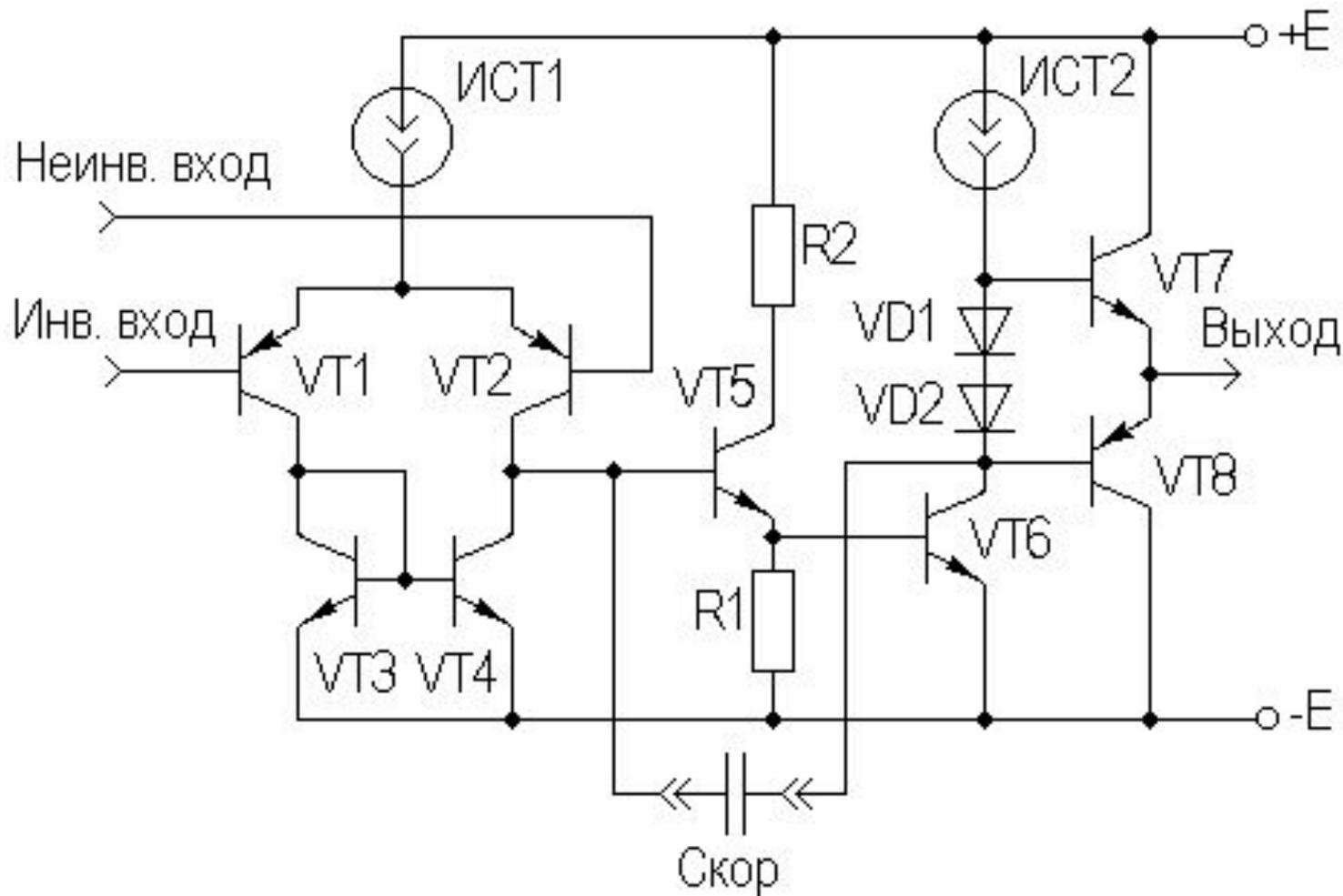


Схема простого операционного усилителя.  
Выходной каскад построен на транзисторах VT7, VT8