

Розрахунок однокаскадного транзисторного підсилювача.

Мета: Розрахувати однокаскадний транзисторний підсилювач напруги змінного струму звукової частоти.

Питання для самопідготовки:

1. Яке призначення підсилювача?
2. За якою схемою вмикають транзистор у підсилювачі напруги звукової частоти?
3. Як діє негативний зворотний зв'язок на роботу підсилювача?

За способом під'єднання навантаження каскади підсилювачів потужності можна поділити на каскади з безпосереднім під'єднанням навантаження, резисторним і трансформаторним.

У резисторному каскаді підсилювача потужності (рисунок 6.1)) навантаження R_H під'єднується до вихідного ланцюга через конденсатор.

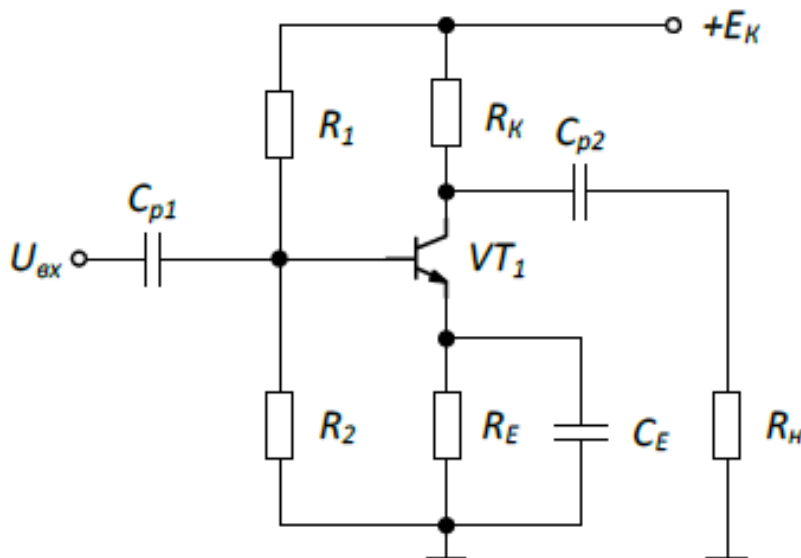


Рисунок 6.1 – Вихідний каскад із під'єднанням навантаження R_H до вихідного ланцюга через конденсатор

Постійний струм живлення в цьому випадку через навантаження не проходить, крім того, навантаження з'єднано із загальним проводом схеми, що нерідко є необхідною умовою. Цей спосіб побудови вихідних каскадів використовується в імпульсних підсилювачах напруги, в емітерних і витокових повторювачах, а також застосовується в операційних підсилювачах.

Резисторний каскад простий, не вимагає дорогих і громіздких деталей, має широку смугу робочих частот, але у нього дуже низький ККД. Від резисторного каскаду з транзистором важко отримати ККД не більше ніж 5–6 %. Тому, незважаючи на переваги, резисторні каскади в підсилювачах потужності застосовують лише при досить незначній вихідній потужності – не вище десятків або сотень міліват.

Найпростішим способом під'єднання опору навантаження R_H до каскаду підсилювача потужності є її безпосереднє введення у вихідний ланцюг підсилювального елемента. Розглянемо роботу однотактного безтрансформаторного каскаду (рисунок 6.2), в якому використовується під'єднання навантаження безпосередньо до колекторного кола.

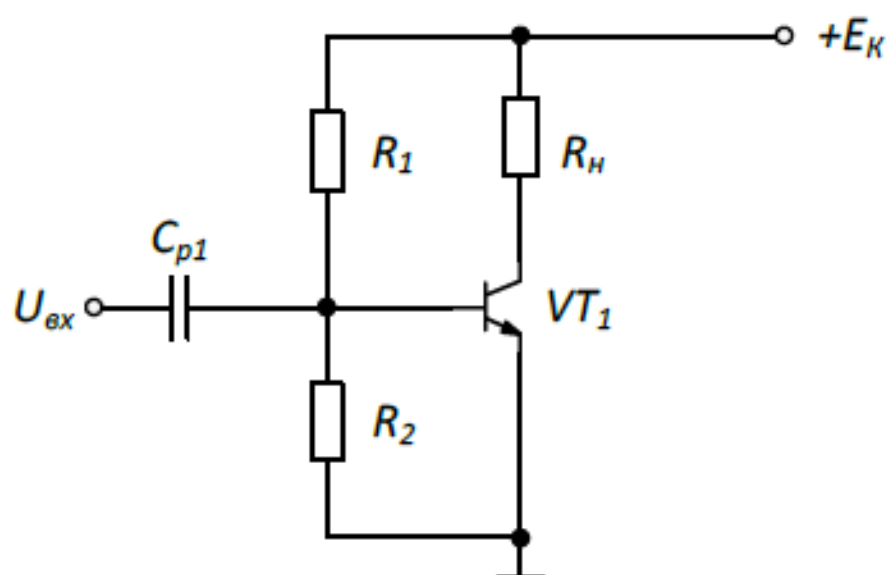


Рисунок 6.2 – Однотактний безтрансформаторний каскад

У цій схемі через навантаження проходить змінна і постійна складові струму. Для аналізу побудуємо прямі навантажень за постійним і змінним струмом (рисунок 6.3), які для цієї схеми збігаються, оскільки $R_{H+} = R_{H-}$.

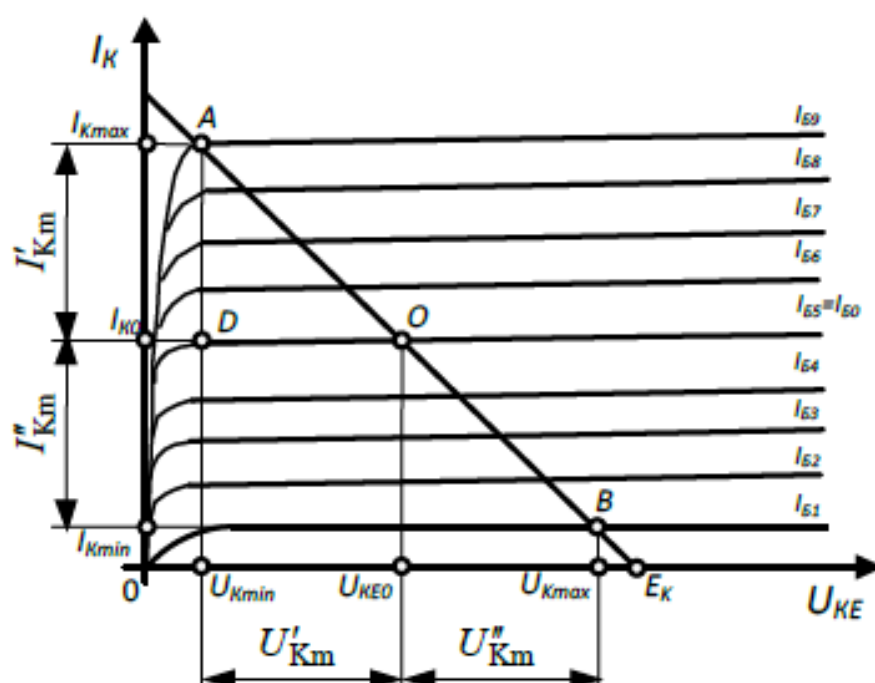


Рисунок 6.3 – Характеристики однотактного безтрансформаторного підсилювача потужності

Максимальна амплітуда напруги на колекторі

$$U_{Km} = \frac{(U_{Kmax} - U_{Kmin})}{2}. \quad (6.1)$$

Максимальна амплітуда вихідного струму каскаду

$$I_{Km} = I_{K0} - I_{Kmin}. \quad (6.2)$$

Потужність $P_{вих}$, що віддається транзистором, визначається площею трикутника AOD:

$$P_{вих} = P_H = 0,5 U_{Km} I_{Km}. \quad (6.3)$$

Припустимо, що підсилювальний елемент ідеальний і його залишкова напруга $U_{Kmax} = E_K$ та потужність $P_{вих}$ з (6.3) з урахуванням (6.1) і (6.2) визначаються як $P_{вих} = 0,25 E_K I_{K0}$. Потужність P_0 , споживана

підсилювальним каскадом від джерела живлення, визначиться виразом $P_0 = E_K I_{K0}$, оскільки споживаний каскадом струм $I_0 \approx I_{K0}$. Тоді максимально можливий ККД безтрансформаторного одноктного підсилювача потужності в режимі η становитиме $\eta = P_{\text{вих}} / P_0 \approx 0,25$.

Опір навантаження, необхідний для отримання такого ККД, що має місце лише при повному використанні струму і напруги живлення:

$$R_{K\sim} = \frac{U_{Km}}{I_{Km}} = \frac{E_K}{2 \cdot I_{K0}}. \quad (6.4)$$

Наявність залишкових напруги $U_{K\min}$ і струму $I_{K\min}$ зменшує максимальний ККД реального підсилювального каскаду. Практичний ККД одноктного безтрансформаторного каскаду, як правило, не перевищує 20 %. До переваг схеми можна віднести її простоту, відсутність втрат потужності у вихідному пристрої, додаткових нелінійних і частотних спотворень, можливість підсилення сигналів у широкій смузі частот, а до недоліків – низький ККД, проходження через навантаження постійної складової струму живлення і наявність на навантаженні постійного потенціалу щодо загального проводу (через акустичну систему неприпустимо). Але потрібно відзначити, що безпосереднє включення під'єднання навантаження застосовується в двотактних безтрансформаторних каскадах

Більш високий ККД має одноктний трансформаторний каскад підсилювача потужності (рисуюнок 6.4).

Трансформатор служить вихідним пристроєм, який пов'язує вихідний ланцюг підсилювача з зовнішнім навантаженням і дозволяє одержати для підсилювального елемента оптимальний опір навантаження, тобто узгодити вихід з опором навантаження.

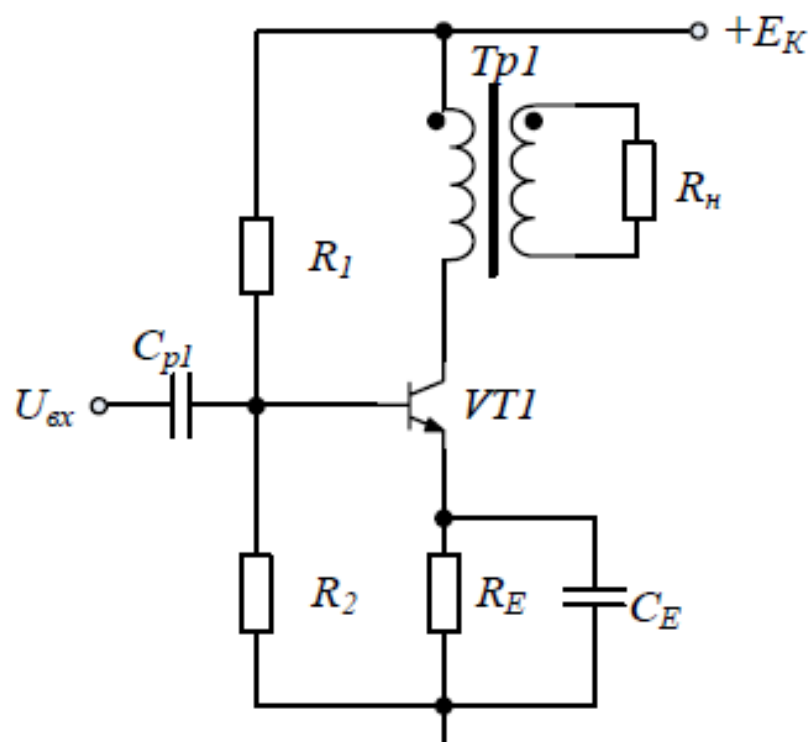


Рисунок 6.4 – Вихідний однотактний трансформаторний каскад

Підсилювальні каскади із трансформаторним зв'язком застосовують тоді, коли необхідно оптимальне узгодження опору навантаження і вихідного опору підсилювального каскаду. Максимальна передача потужності від джерела сигналу в навантаження має місце при рівності опорів джерела (R_z) і навантаження (R_H). Тому якщо R_z і R_H різні, то їх можна узгодити за допомогою трансформатора, для якого в ідеальному випадку справедливі співвідношення

$$R'_H = R_H / n^2, \quad R'_z = R_z n^2,$$

де R'_H та R'_z – відповідно опір навантаження, перерахований в первинну обмотку трансформатора, і опір генератора, перерахований у вторинну обмотку;

$n = W_2 / W_1$ – коефіцієнт трансформації;

W_1 та W_2 – кількість витків у відповідних обмотках.

Оскільки в режимі оптимального узгодження необхідне дотримання співвідношень

$$R'_H = R_z, \quad R'_z = R_H,$$

то коефіцієнт трансформації для оптимального узгодження

$$\eta = \sqrt{R_H / R_z}.$$

У трансформаторному підсилювачі має місце

$$R_{H=} = r_1, \quad R_{H\sim} = r_1 + r'_2 + R'_H,$$

де r_1 та r'_2 – активні опори (опори втрати) в первинної та вторинної обмотки трансформатора;

R'_H - перерахований в ланцюг первинної обмотки опір навантаження.

Враховуючи те, що опір r_1 є не що інше, як активний опір мідного дроту первинної обмотки в трансформаторних підсилювачах, буде виконуватися співвідношення $R_{H=} \ll R_{H\sim}$.

Розрахунок каскаду виконаємо графо-аналітичним методом із використанням статичних ВАХ. Робоча область вихідних ВАХ обмежена декількома параметрами, як показано на рисунку 6.5.

Робоча область обмежена гіперболою допустимої потужності розсіювання на колекторі $P_{Kдон}$, яка будується в координатах (I_K, U_{KE}) за формулою

$$I_K = \frac{P_{Kдон}}{U_{KE}}$$

Оскільки із збільшенням температури довкілля допустима потужність розсіювання зменшується, то гіпербола повинна бути побудована з урахуванням цієї зміни.

Робоча область також обмежена максимально допустимими для даного типу транзистора значеннями

струму колектора $I_{K\text{доп}}$ і напруги колектор-емітер $U_{KE\text{доп}}$. У довідковій літературі, як правило, зазначаються два значення максимально допустимого струму колектора: постійного й імпульсного. Аналогічні значення зазначають і для напруги колектор-емітер.

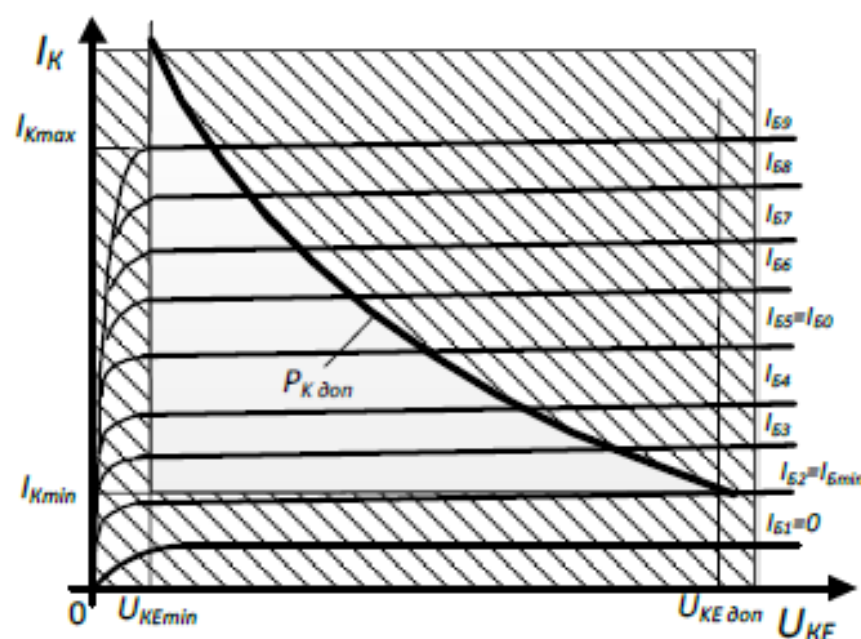


Рисунок 6.5 – Робоча область вихідних вольт-амперних характеристик

Для отримання мінімальних нелінійних спотворень робоча область обмежена мінімальним значенням струму бази $I_{B\text{min}}$, йому відповідає мінімальне значення струму колектора $I_{K\text{min}}$, а також мінімальним значенням напруги $U_{KE\text{min}} > U_{KE\text{нас}}$. Вибором значень $I_{B\text{min}}$ і $U_{KE\text{min}}$ відсікаються найбільш нелінійні ділянки вхідної і вихідної вольт-амперних характеристик, що дозволяє зменшити нелінійні спотворення каскаду.

Граничні параметри враховують при виборі типу транзистора і в процесі розрахунку каскаду. На рисунку 6.6 наведена діаграма роботи трансформаторного каскаду із спільним емітером.

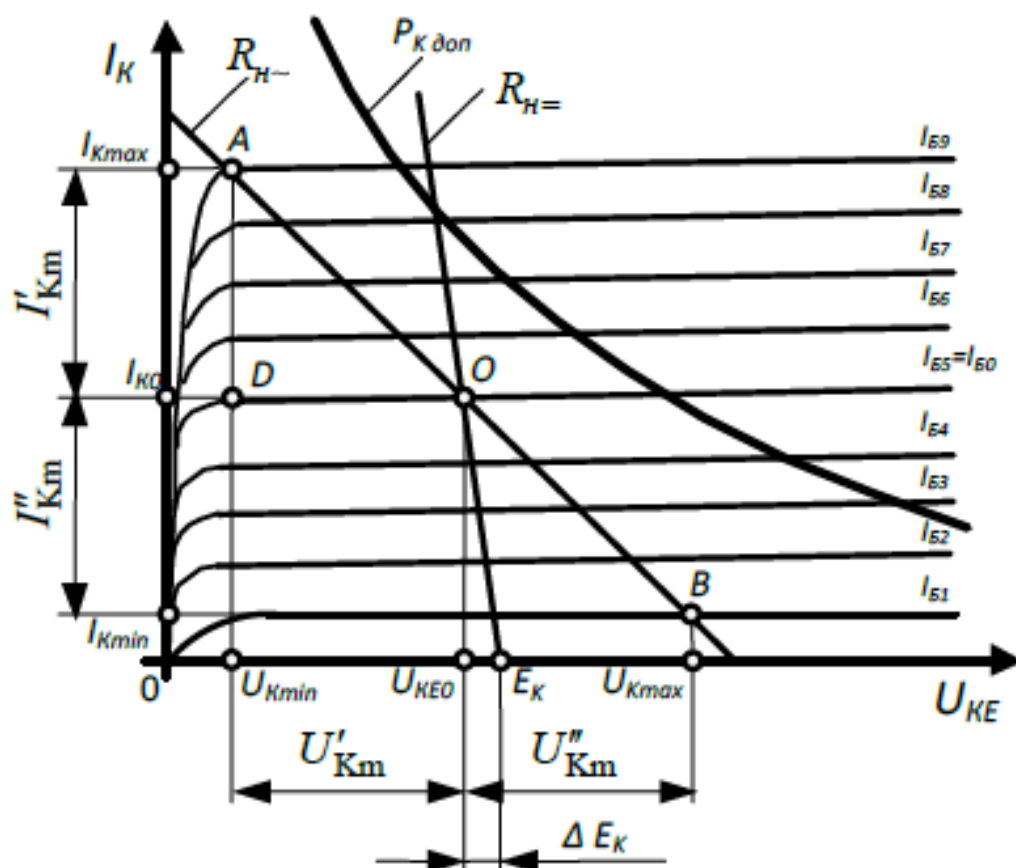


Рисунок 6.6 – Характеристики однотактного каскаду підсилення потужності з трансформаторним зв'язком

Необхідно зазначити, що напруга U_{KE} , що відповідає точці В з лінії навантаження, істотно перевищує E_K . Це можливо лише за наявності трансформатора і пояснюється тим, що енергія, накопичена індуктивністю намагнічення, при зменшенні струму викликає появу ЕРС самоіндукції.

Порядок побудови лінії навантаження такий. Спочатку будується лінія навантаження за постійним струмом. Транзистор в однотактному трансформаторному каскаді навантажений за постійним струмом малим опором первинної обмотки трансформатора. Якщо $R_E = 0$, то напруга на колекторі мало відрізняється від напруги E_K джерела живлення і лінія навантаження за постійним струмом пройде дуже круто вгору з точки E_K на осі напруги (пряма $R_{H=}$). Робоча точка О каскаду знаходиться

на цій прямій навантаження і її положення визначається величиною $U_{KE0} = E_K - \Delta E_K$, де ΔE_K – спад напруги на активному опорі первинної обмотки трансформатора при вибраному значенні струму спокою колектора.

Робоча точка O одночасно повинна знаходитися на лінії навантаження каскаду за змінним та постійним струмами. Тому для побудови цієї лінії навантаження необхідно знайти одну з крайніх її точок на вихідних характеристиках транзистора, як правило, за цю точку обирають точку A , що лежить на перегині однієї з вихідних характеристик. Таке розміщення точки A забезпечує для вибраного режиму найменші нелінійні спотворення при найменшому споживанні потужності джерела живлення. Визначене значення $I_{K\max}$ не повинно перевищувати $I_{K\text{доп}}$ для даного типу транзистора. Через точки A і O проводиться лінія навантаження каскаду за змінним струмом (пряма $R_{H\sim}$). Точку B не розміщують нижче за характеристику, зняту при $I_B = 0$, що визначається також умовами одержання мінімальних спотворень при мінімальному споживанні енергії від джерела живлення. При побудові лінії навантаження прагнуть забезпечити рівність ділянок $AO \approx OB$. Тоді амплітуди вихідного струму і напруги в обидва півперіоди будуть однаковими, тобто $I'_{Km} = I''_{Km} = I_{Km}$ і $U'_{Km} = U''_{Km} = U_{Km}$.

Максимальна амплітуда змінної складової на колекторі транзистора:

$$U_{Km} = U_{KE0} - U_{K\min} = E_K - \Delta E_K - U_{K\min}. \quad (6.5)$$

Максимальна величина напруги на колекторі, як бачимо з рисунка 6.6, дорівнює $U_{K\max} = 2U_{Km} + U_{K\min}$. Ця величина не повинна перевищувати значення, максимально допустимого для даного типу транзистора.

Максимальна амплітуда струму у вихідному колі

транзистора

$$I_{K_m} = I_{K0} - I_{K_{\min}}. \quad (6.6)$$

Потужність, що віддається транзистором, чисельно дорівнює площі трикутника ADO (трикутника потужності), тобто $P_{\text{вих}} = 0,5 U_{K_m} I_{K_m}$. У навантаження ж передаватиметься потужність сигналу, $P_H = \eta_{tr} P_{\text{вих}}$, де η_{tr} – ККД вихідного трансформатора.

При практичних розрахунках навантаження каскаду підсилення потужності вважають чисто активним. Тому оптимальне навантаження $R_{K\sim} = U_{K_m} / I_{K_m}$, в яке транзистор віддає максимальну потужність, може бути визначене з урахуванням лише активних опорів обмоток вихідного трансформатора і навантаження $R_{K\sim} = r_1 + r_2' + R_H'$.

Потужність, споживана підсилювальним каскадом від джерела живлення за період дії вхідного сигналу, визначається як $P_0 = E_K I_{K0}$. Тоді ККД підсилювача потужності

$$\eta_A = \frac{P_{\text{вих}}}{P_0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_{K_m} \cdot U_{K_m}}{I_{K0} \cdot E_K} = \frac{1}{2} \cdot \psi \cdot \xi.$$

Позначимо відношення:

$\psi = \frac{I_{K_m}}{I_{K0}}$ – коефіцієнт використання струму живлення;

$\xi = \frac{U_{K_m}}{E_K}$ – коефіцієнт використання напруги

живлення.

Як випливає з формул (6.5) і (6.6), завжди виконуються такі нерівності: $I_{K_m} < I_{K0}$, $U_{K_m} < U_{KE0}$, $U_{KE0} < E_K$, тоді $\psi < 1$, $\xi < 1$, а ККД каскаду $\eta_A < 0,5$. Таким чином, ККД трансформаторного каскаду, що працює в режимі А, менше 50 %, із збільшенням коефіцієнтів

використання ψ і ξ (при малих значеннях E_K , $U_{K\min}$ і $I_{K\min}$), ККД наближається до 50 %, але завжди менше за це значення. Проте надмірне зменшення $U_{K\min}$ і $I_{K\min}$ приводить до різкого збільшення нелінійних спотворень підсиленого сигналу. Тому трансформаторні однотактні підсилювачі потужності мають ККД близько 25–40 %.

Для розрахунку параметрів вхідного кола каскаду на вхідну характеристику, зняту при $U_{KE0} \neq 0$, переносять крайні точки A і B з прямою навантаження за змінним струмом і визначають розмах вхідного струму і напруги, а потім розраховують значення вхідного опору $R_{ex\sim}$ і потужність P_{ex} вхідного сигналу:

$$R_{ex\sim} = \frac{2U_{Km}}{2I_{Bm}}, \quad P_{ex} = \frac{2U_{Bm} \cdot 2I_{Bm}}{8}.$$

Потужність P_K , що розсіюється колектором транзистора $P_K = P_0 - P_{вих}$. Або після деяких перетворень

$$P_K = P_{вих} \frac{1 - \eta_{тр}}{\eta_{тр}}.$$

У граничному випадку ККД каскаду дорівнює $\eta_A = 0,5$, і тоді $P_K = P_{вих}$. Тому на практиці для однотактного каскаду підсилення потужності транзистори вибирають з умови $P_{K\text{дон}} > P_{вих}$ або з урахуванням виразу для P_H , $P_{K\text{дон}} > P_H / \eta_{тр}$.

Через первинну обмотку трансформатора проходить постійний струм, який викликає підмагнічування трансформатора. Для зменшення насичення трансформатора його осердя в однотактних підсилювачах потужності виконується з повітряним зазором.