



Politechnika Wrocławska

Wzmacniacze mocy



Wzmacniacze mocy - wprowadzenie

Definicja.

Wzmacniaczem mocy nazywamy układ elektroniczny, którego zadaniem jest dostarczenie do obciążenia nie zniekształconego sygnału o odpowiednio dużej, elektrycznej, mocy użytecznej.

Najważniejszymi parametrami wzmacniaczy mocy są:

- P_{LMAX} - maksymalna moc wyjściowa przy nominalnym obciążeniu
- h – zniekształcenia nieliniowe (harmoniczne) układu
- zniekształcenia liniowe związane z pasmem wzmacniacza (f_d i f_g) przy małych sygnałach i zniekształcenia intermodulacyjne (TIM) przy dużych sygnałach
- η – sprawność energetyczna
- pasmo mocy

Wzmacniacze mocy - wprowadzenie

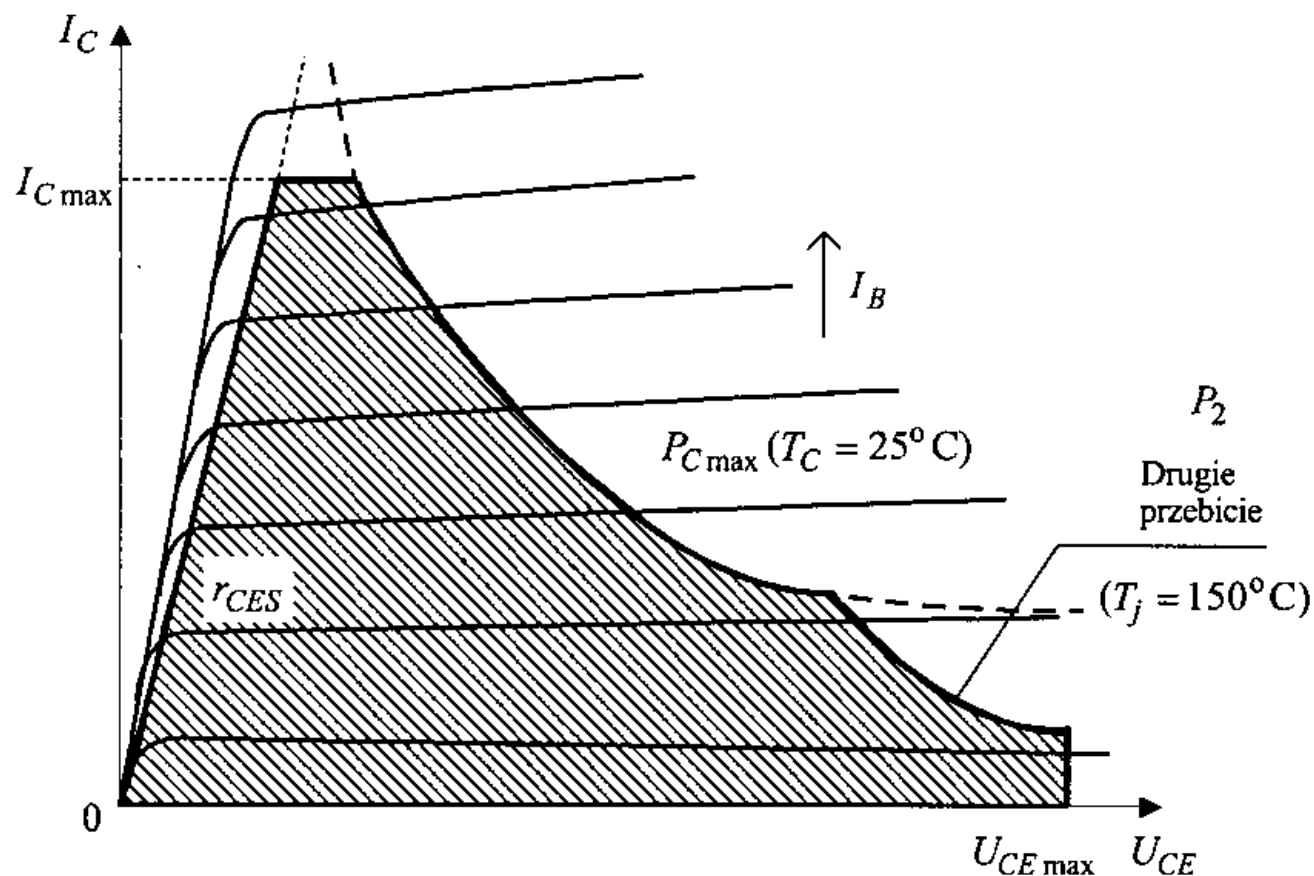
Rodzaje wzmacniaczy mocy

Ze względu na rodzaj użytego elementu aktywnego mocy wzmacniacze dzielimy na:

- zbudowane w oparciu o tranzystory bipolarne
- zbudowane w oparciu o tranzystory MOS
- wykorzystujące scalone wzmacniacze mocy

Ze względu na klasę pracy elementy aktywnego wzmacniacze mocy dzielimy na klasy: A, AB, B, C, D i E.

Wzmacniacze mocy - ograniczenia elementu aktywnego



Rys.1. Ograniczenie dopuszczalnego pola charakterystyk tranzystora bipolarnego

Wzmacniacze mocy - ograniczenia elementu aktywnego

P_{Cmax} – maksymalna moc strat – rozproszenie średniej mocy wydzielonej w tranzystorze przy maksymalnej temperaturze struktury tranzystora

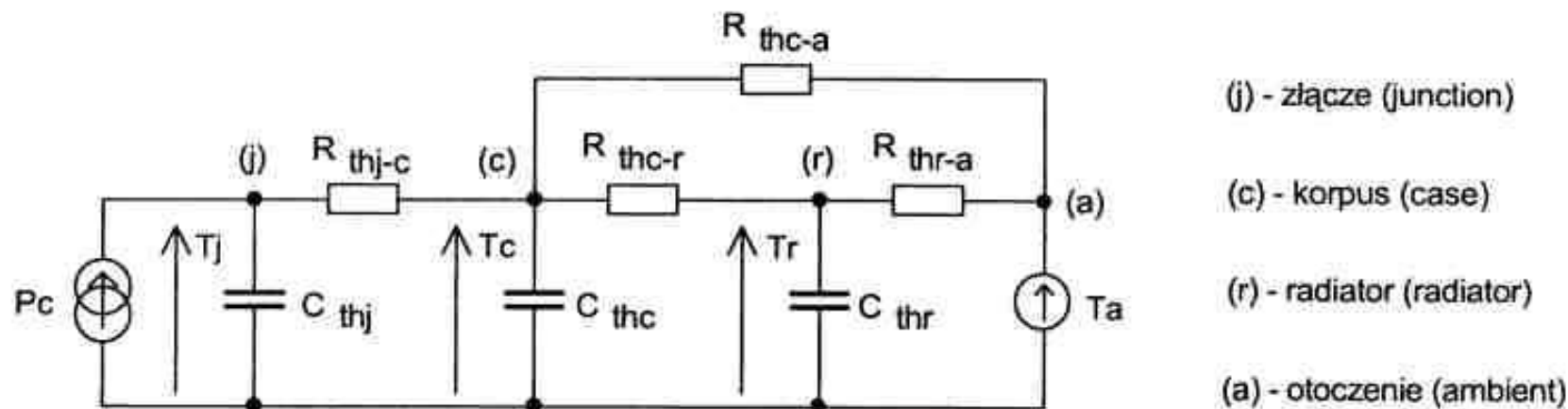
P_2 – krytyczna moc drugiego przebicia – dopuszczalna moc przy strat przy dużych U_{CE} – defekt struktury w obszarze bazy – stopienie półprzewodnika

U_{CEmax} – maksymalne chwilowe napięcie U_{CE}

I_{Cmax} - maksymalna chwilowa wartość prądu kolektora

r_{CES} – nasycenie tranzystora – praca nieliniowa

Wzmacniacze mocy - odprowadzanie ciepła z elementu aktywnego



Rys. 2. Ciepły schemat zastępczy tranzystora

$$P_{C_{\max}} = \frac{T_{j_{\max}} - T_C}{R_{thj-C}}$$

$T_{j_{\max}}$ – temperatura półprzewodnika

T_C – temperatura obudowy

R_{thj-C} – rezystancja termiczna półprzewodnik
- obudowa

Wzmacniacze mocy - odprowadzanie ciepła z elementu aktywnego

Tabela 1. Analogi termiczno - elektryczne

| | Parametr cieplny | Parametr elektryczny |
|---------------------|------------------------|----------------------|
| Moc elektryczna | P | I |
| Temperatura | T | V |
| Różnica temperatur | $\Delta T = T_i - T_j$ | $U = V_i - V_j$ |
| Rezystancja cieplna | R_{th} | R |
| Pojemność cieplna | C_{th} | C |

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P}$$

ΔT – różnica temperatur pomiędzy ośrodkami

P – odprowadzana moc

$$C_{th} = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

ΔQ – przyrost energii cieplnej zmagazynowanej w danym obszarze przy danej różnicy temperatur

Wzmacniacze mocy - odprowadzanie ciepła z elementu aktywnego

W stanie ustalonym C_{th} stanowią rozwarcie. Wtedy:

$$T_j - T_a = P_C (R_{thj-C} + R_{thC-r} + R_{thr-a})$$

Rezystancja cieplna złącze – obudowa tranzystora:

$$R_{thj-C} = \frac{T_{j\max} - T_C}{P_{tot}(T_C)}$$

gdzie $T_{j\max}$ i R_{thj-C} są parametrami tranzystora.

Położenie hiperboli mocy zależy od parametrów radiatora i można je wyznaczyć przekształcając równanie:

$$R_{thr-a} = \frac{T_{j\max} - T_{a\max}}{P_{C\max}} - R_{thj-C} - R_{thC-r}$$

Wzmacniacze mocy - odprowadzanie ciepła z elementu aktywnego

Ze względów ekonomicznych stosuje się możliwie małe radiatory.

Dlatego konieczne jest zastosowanie bardzo dobrej temperaturowej stabilizacji punktu pracy tranzystora ponieważ:

$$\uparrow T \rightarrow \uparrow \beta_0 \rightarrow \uparrow I_C \rightarrow \uparrow P_C \rightarrow \uparrow T$$

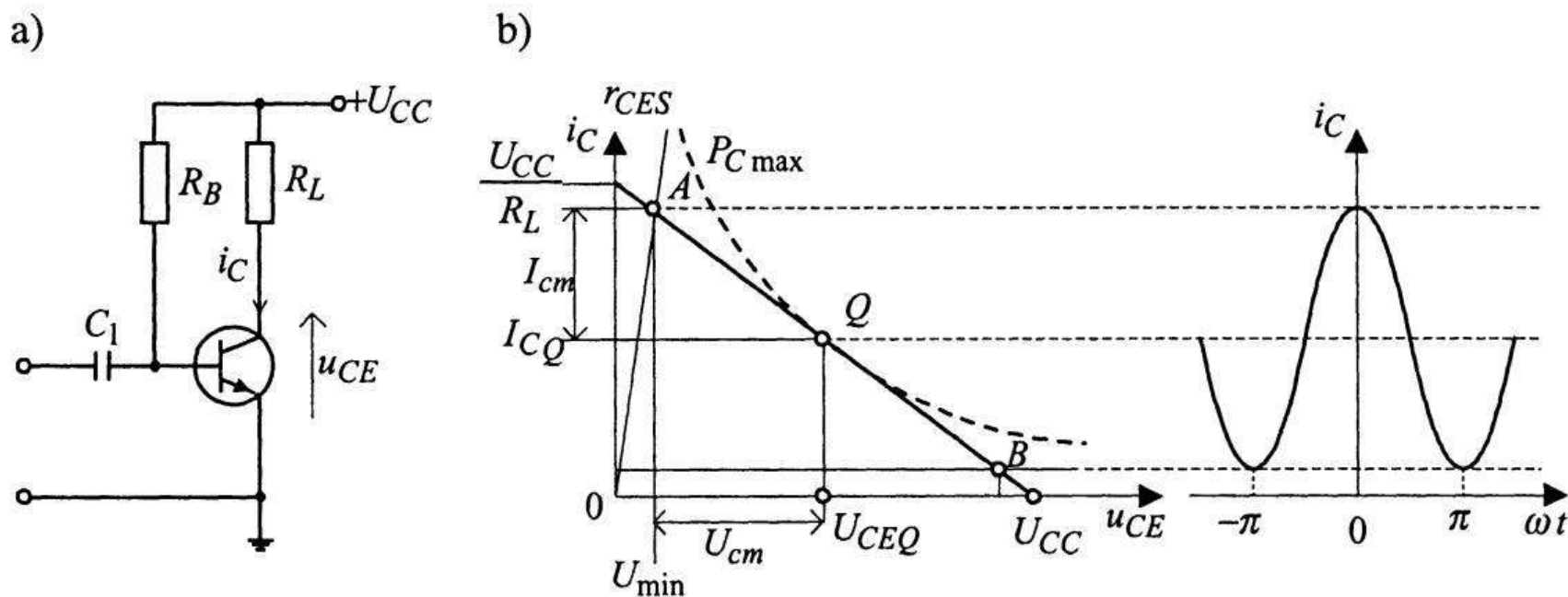
i następuje zniszczenie tranzystora.

Po zastosowaniu stabilizacji temperaturowej:

$$\uparrow T \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \uparrow \beta_0 \\ \downarrow I_{BQ} \end{array} \right\} \rightarrow I_C \downarrow \rightarrow P_C \downarrow \rightarrow T \downarrow$$

(ujemne sprzężenie zwrotne)

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa A



Rys. 3. Wzmacniacz oporowy pracujący w klasie A: a) schemat układu, b) charakterystyka robocza układu

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa A

Największą moc $P_{C\max}$ wydzieloną na rezystancji obciążenia R_L otrzymuje się dla punktu pracy tranzystora:

$$U_{CEQ} = \frac{U_{CC}}{2} \quad I_{CQ} = \frac{2P_{C\max}}{U_{CC}}$$

Rezystancja obciążenia optymalna – prosta pracy styczna do hiperboli mocy:

$$R_{Lopt} = \frac{U_{CC} - U_{CEQ}}{I_{CQ}} = \frac{U_{CEQ}}{I_{CQ}} = \frac{U_{CC}}{2I_{CQ}} = \frac{U_{CC}^2}{4P_{C\max}}$$

Moc sygnału na obciążeniu, przy $u_{CE}(t) = U_{CEQ} + U_{cm} \sin \omega t$:

$$P_L = \frac{U_{cm}^2}{2R_L}$$

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa A

Współczynnik wykorzystania napięcia

Amplitudy: napięcia i prądu na obciążeniu można wyrazić następująco:

$$U_{cm} = U_{CEQ} - U_{\min} = \xi U_{CEQ} \quad I_{cm} = \frac{U_{cm}}{R_L} = \xi I_{CEQ}$$

Współczynnik wykorzystania napięcia dany jest równaniem:

$$\xi = \frac{U_{cm}}{U_{CEQ}} = 1 - \frac{U_{\min}}{U_{CEQ}} = \frac{R_L}{R_L + r_{CES}}$$

Maksymalną moc wydzieloną na obciążeniu wyrażamy:

$$P_{L\max} = \xi^2 \frac{P_{C\max}}{2}$$



Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa A

Sprawność energetyczna wzmacniacza

$$\eta = \frac{P_{L \max}}{P_D}$$

gdzie: $P_D = 2P_{C \max}$

Przy pominięciu napięcia nasycenia tranzystora:

$$P_{L \max} = \frac{P_{C \max}}{2}$$

$$\eta_{\max} = \frac{1}{4} \rightarrow 25\%$$

Mała sprawność – duże straty dla prądu stałego: $P_{LDC} = I_{CQ}^2 R_L$



Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa A

Zastosowanie we wzmacniaczu klasy A transformatora

Zalety zastosowania transformatora:

- galwaniczne rozdzielenie obwodów
- transformację napięć i prądów – możliwość dopasowania do dużych i małych rezystancji obciążenia
- przesunięcie fazy pomiędzy napięciami
- sumowanie mocy wielu źródeł w jednym obciążeniu
- rozgałęzienie mocy jednego źródła na kilka obciążeń
- niewielkie spadki napięć na uzwojeniach transformatora i dużą sprawność energetyczna



Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa A

Zastosowanie we wzmacniaczu klasy A transformatora

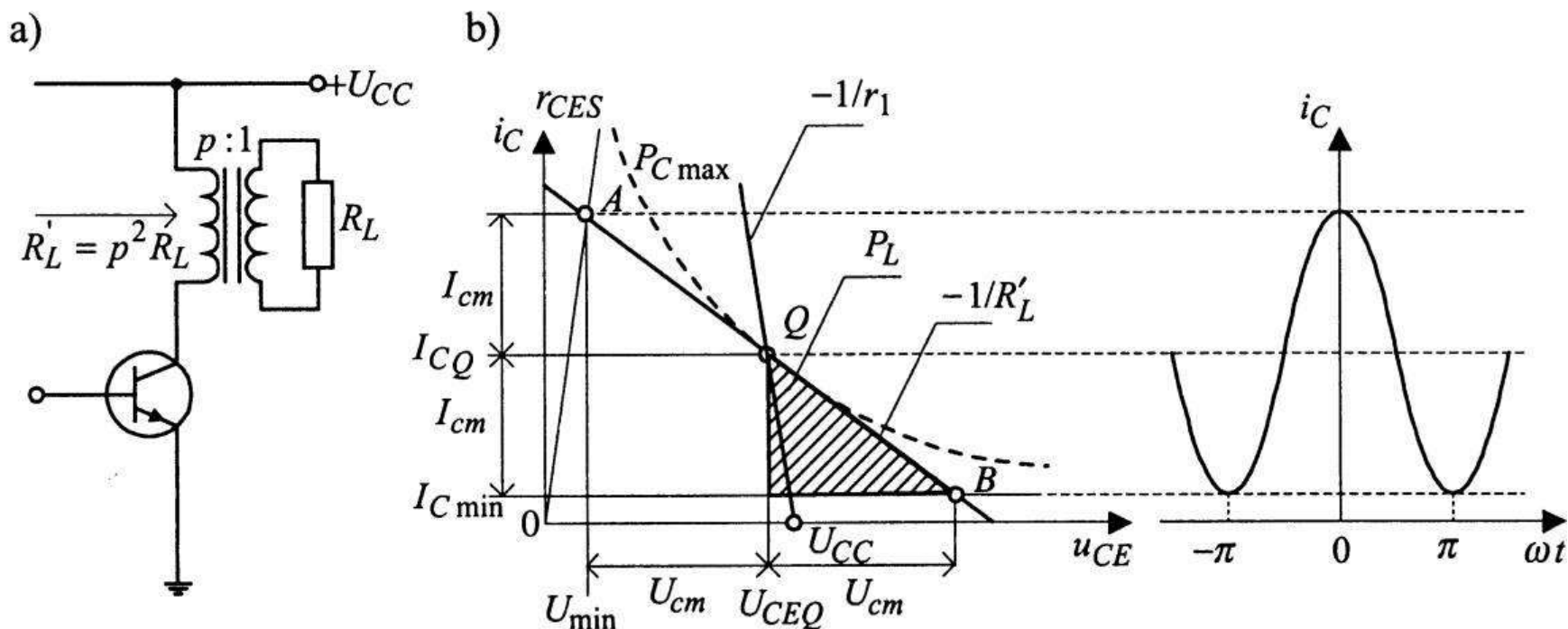
Wady zastosowania transformatora:

- ograniczenie pasma przenoszonych sygnałów
- wprowadzenie zniekształceń nieliniowych ze względu na nieliniowość krzywej magnesowania
- duże rozmiary i ciężar
- wysoka cena

Zastosowanie np.: automatyka.

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa A

Zastosowanie we wzmacniaczu klasy A transformatora



Rys.4. Wzmacniacz klasy A z obciążeniem transformatorowym: a) schemat ideowy, b) pole charakterystyk roboczych układu

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa A

Punkt pracy tranzystora:

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}r_1 \approx U_{CC}$$

gdzie r_1 jest rezystancją uzwojenia pierwotnego transformatora. Prosta pracy powinna być styczna do hiperboli P_{Cmax} , co odpowiada optymalnemu przetransformatowanemu obciążeniu:

$$R'_L = \frac{U_{cm}}{I_{cm}} = \frac{U_{CEQ}}{I_{CQ}}$$

gdzie: $R'_L = p^2 R_L$ $p_{opt} = \sqrt{\frac{R'_L}{R_L}}$

Moc pobierana ze źródła zasilania: $P_D = U_{CEQ}I_{CQ}$

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa A

Współczynniki wykorzystania: prądu i napięcia

Współczynnik wykorzystania napięcia:

$$U_{cm} = U_{CEQ} - U_{\min} = \xi U_{CEQ}$$

$$\xi = 1 - \frac{U_{\min}}{U_{CEQ}}$$

Współczynnik wykorzystania prądu:

$$I_{cm} = I_{CQ} - I_{\min} = \gamma I_{CQ}$$

$$\gamma = 1 - \frac{I_{\min}}{I_{CQ}}$$

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa A

Sprawność energetyczna wzmacniacza

Maksymalna moc na obciążeniu

$$P_{L\max} = \frac{1}{2} U_{cm} I_{cm} = \frac{1}{2} \xi \gamma P_D$$

$$\eta_{\max} = \frac{P_{L\max}}{P_D} = \frac{1}{2} \xi \gamma$$

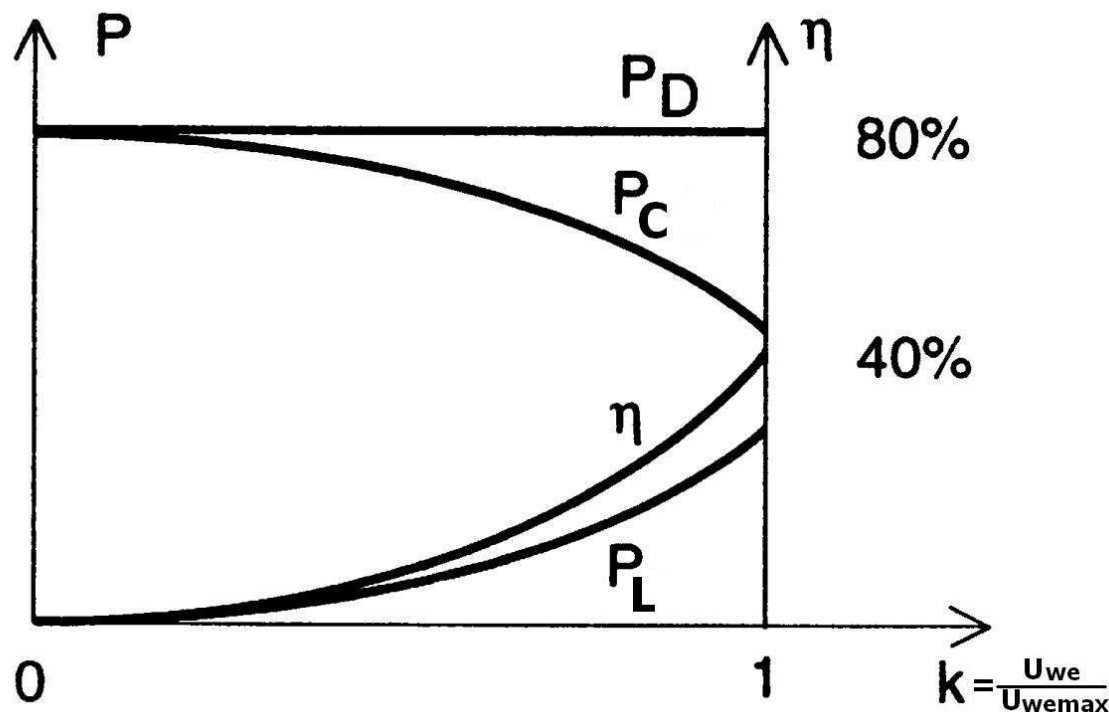
Dla $\xi = \gamma = 1$ sprawność teoretycznie $\eta_{\max} = 50\%$

W rzeczywistości sprawność wynosi (35-45)%.

Moc tracona w tranzystorze

$$P_C = P_D - P_L = P_D(1 - \eta)$$

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa A



Rys.5. Zależności mocy dostarczonej P_D , mocy wyjściowej P_L , mocy strat P_C i sprawności energetycznej od współczynnika wysterowania wzmacniacza

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa A

Zniekształcenia nieliniowe we wzmacniaczach klasy A:

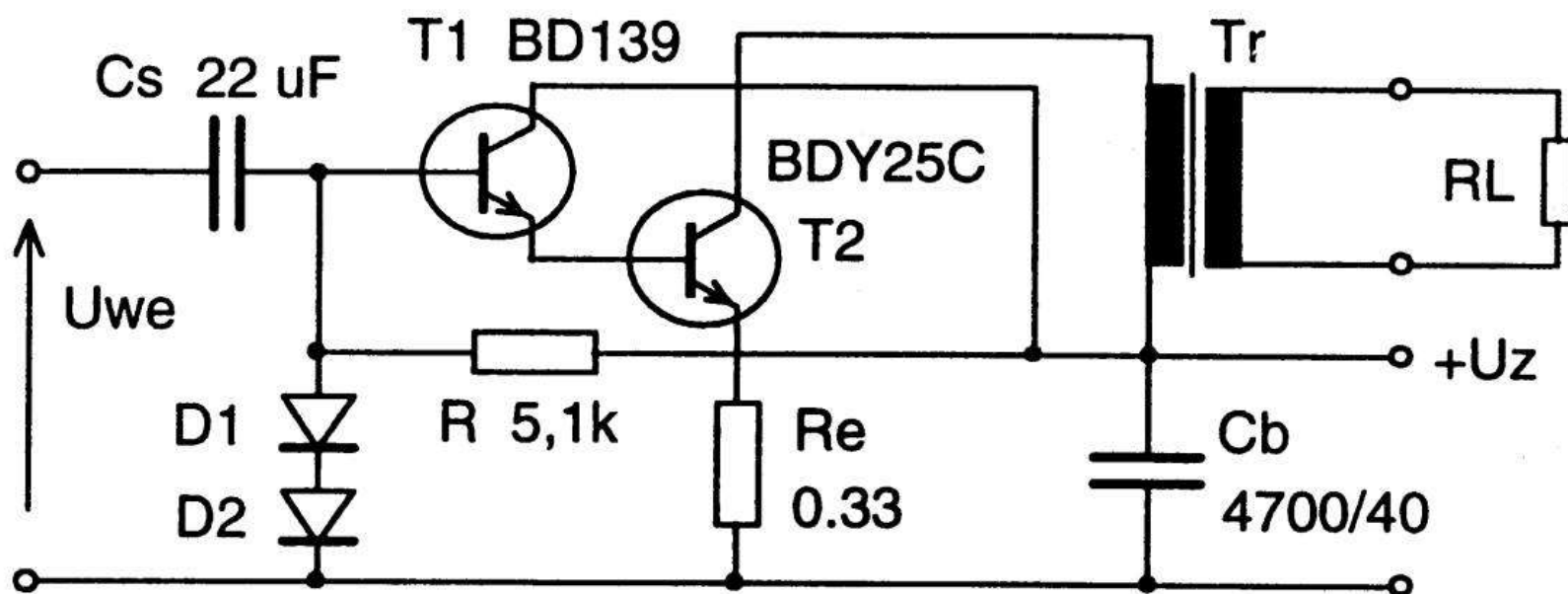
- nieliniowość charakterystyki wejściowej tranzystora

$$I_B = f(U_{BE}),$$

- nieliniowość charakterystyki przejściowej tranzystora I_C
 $= f(I_B)$ – nieliniowa zależność wsp. wzm. prądowego od I_C

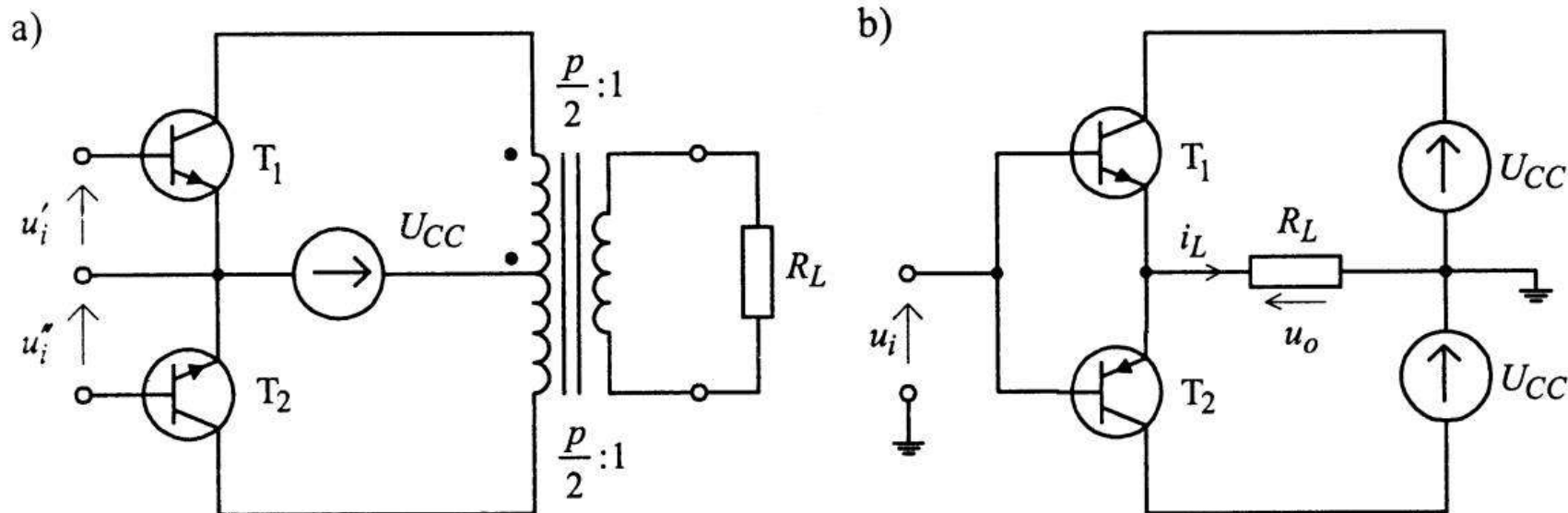
- nieliniowa charakterystyka magnesowania rdzenia transformatora

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa A



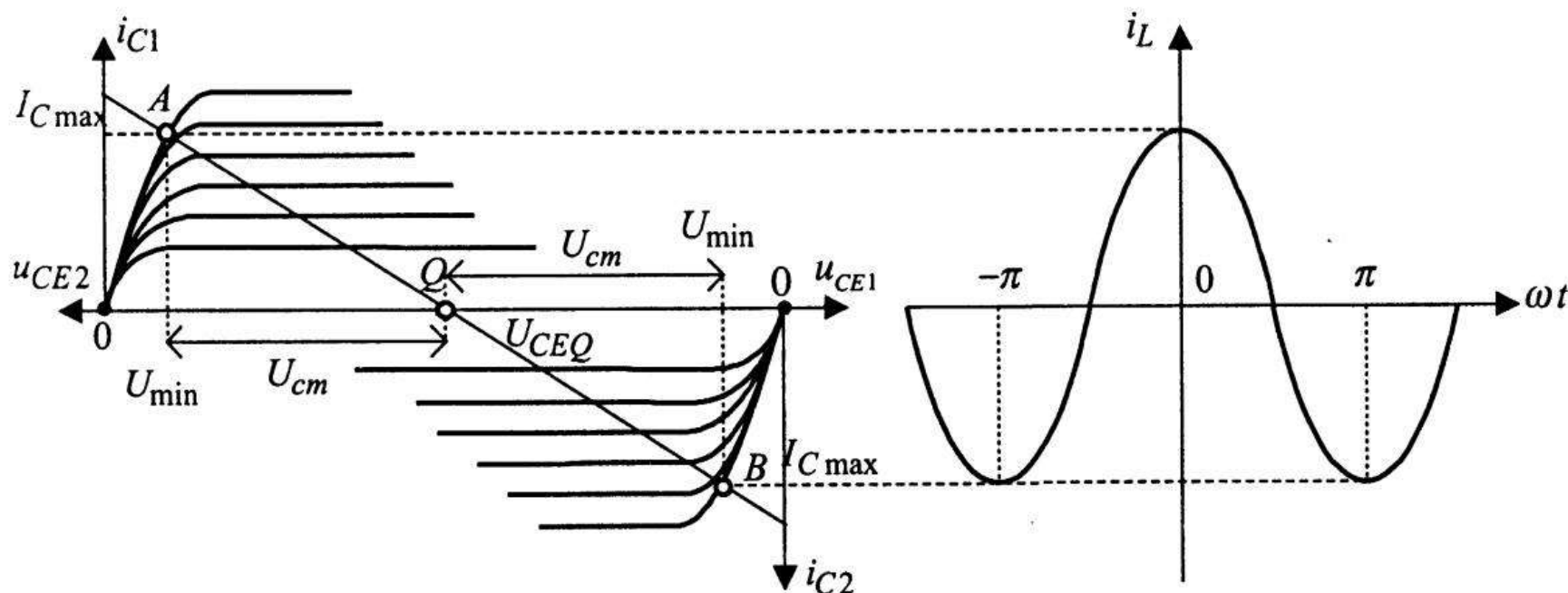
Rys.6. Przykładowy schemat ideowy transformatorowego wzmacniacza mocy pracującego w klasie A

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa B



Rys. 7. Uproszczone schematy wzmacniaczy pracujących w klasie B: a) transformatorowy, b) beztransformatorowy

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa B



Rys. 8. Pole charakterystyk i przebiegi prądów w przeciwsobnym wzmacniaczu mocy klasy B

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa B

Współczynnik wykorzystania napięcia

Amplituda napięcia wyjściowego wzmacniacza:

$$U_{cm} = U_{CEQ} - U_{\min} = \xi U_{CEQ} = \xi U_{CC}$$

Współczynnik wykorzystania napięcia:

$$\xi = 1 - \frac{U_{\min}}{U_{CEQ}}$$

Amplituda prądu kolektora:

$$I_{cm} = I_{C\max} - I_{CQ} = I_{C\max}$$

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa B

Moc wyjściowa wzmacniacza przy pełnymysterowaniu:

$$P_{L\max} = \frac{1}{2}U_{cm}I_{cm} = \frac{1}{2}\xi U_{CEQ}I_{C\max}$$

Maksymalna moc dostarczona do wzmacniacza:

$$P_{D\max} = 2U_{CC}I_{sr}$$

Gdzie prąd średni (przeb. sinus.) jest wyrażony:

$$I_{sr} = \frac{I_{cm}}{\pi} = \frac{I_{C\max} - I_{CQ}}{\pi} = \frac{I_{C\max}}{\pi}$$

Po przekształceniach:

$$P_{D\max} = \frac{2}{\pi}U_{CC}(I_{C\max} - I_{CQ}) = \frac{2}{\pi}U_{CC}I_{C\max}$$

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa B

Sprawność energetyczna wzmacniacza

Maksymalna sprawność energetyczna:

$$\eta_{\max} = \frac{P_{L \max}}{P_{D \max}} = \frac{\pi}{4} \xi$$

W przypadku pominięcia U_{CESAT} tranzystorów:

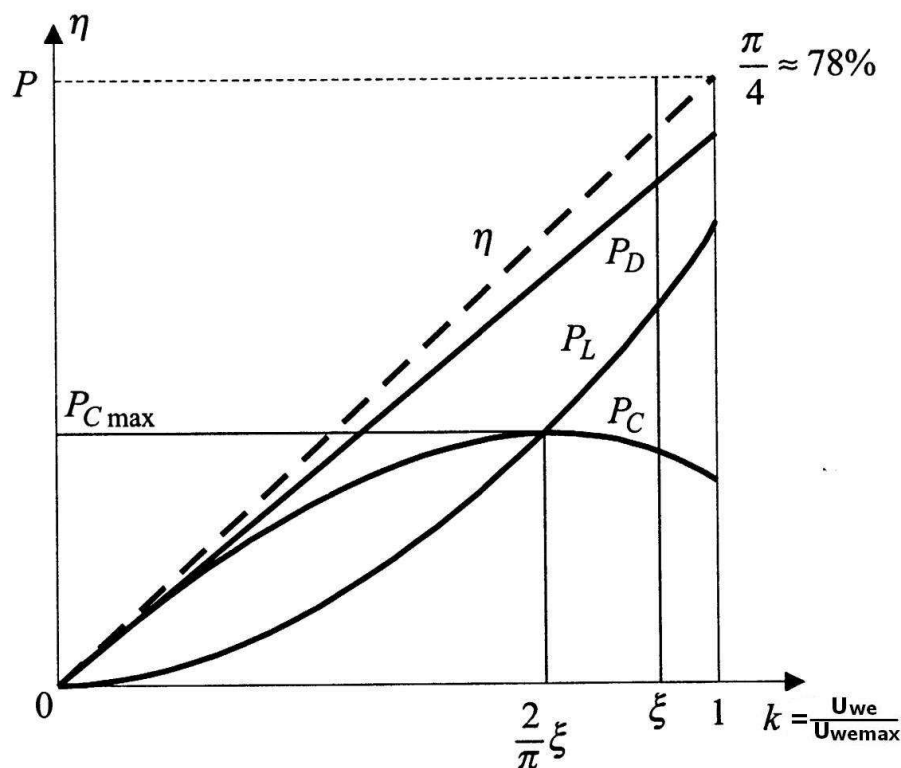
$$\eta_{\max} = \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$

W rzeczywistości sprawność wynosi 65 – 70 %.

Maksymalna moc tracona w tranzystorach:

$$P_{C \max} = \frac{1}{\pi^2} U_{CEQ} I_{C \max} = \frac{1}{\pi^2} U_{CC} I_{C \max}$$

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa B



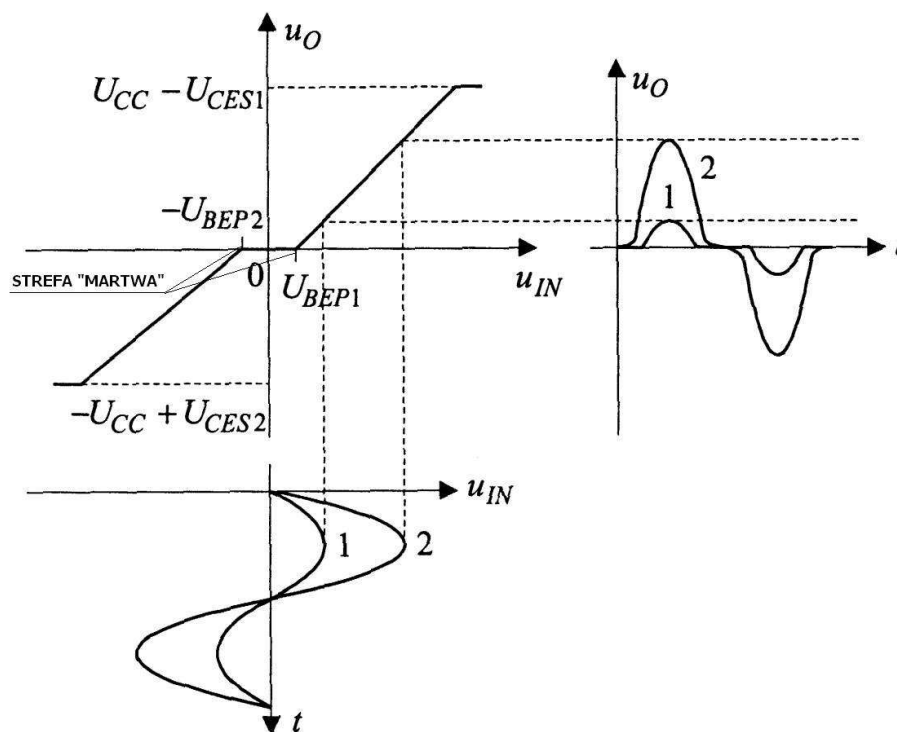
Rys.9. Zależności mocy dostarczonej P_D , mocy wyjściowej P_L , mocy strat P_C i sprawności energetycznej od współczynnika wysterowania wzmacniacza

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa B

Zniekształcenia nieliniowe we wzmacniaczach klasy B:

- przy pełnym występowaniu: nieliniowość charakterystyki przejściowej tranzystora $I_C = f(I_B)$ – nieliniowa zależność wsp. wzm. prądowego od I_C
- różnice we wsp. wzm. prądowego tranzystorów
- zniekształcenia skrośne

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa B



Rys. 10. Charakterystyka przejściowa wzmacniacza klasy B i zniekształcenia skrośne

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa AB

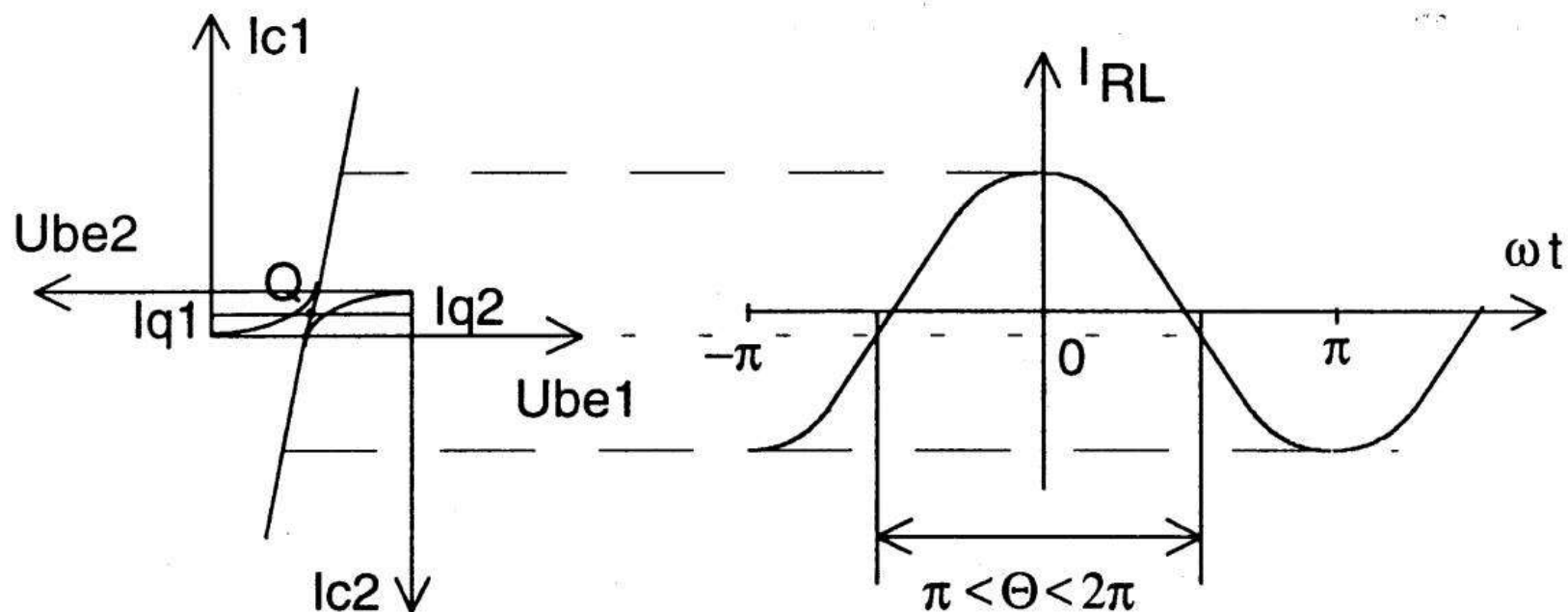
Klasa AB – kompromis pomiędzy klasą A i klasą B.

Kąt przepływu prądu kolektora tranzystorów mocy:

$$\pi < \theta < 2\pi$$

Dzięki wstępnej polaryzacji tranzystorów niewielkim prądem spoczynkowym uzyskuje się eliminację zniekształceń skrośnych.

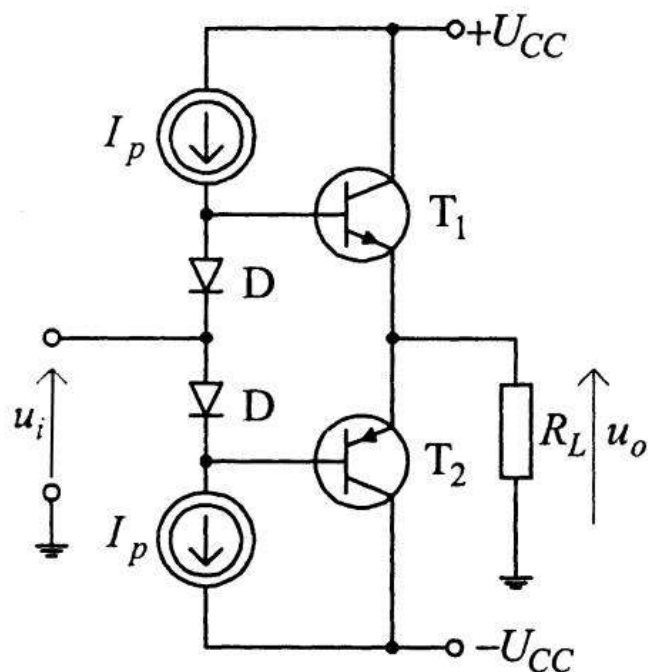
Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa AB



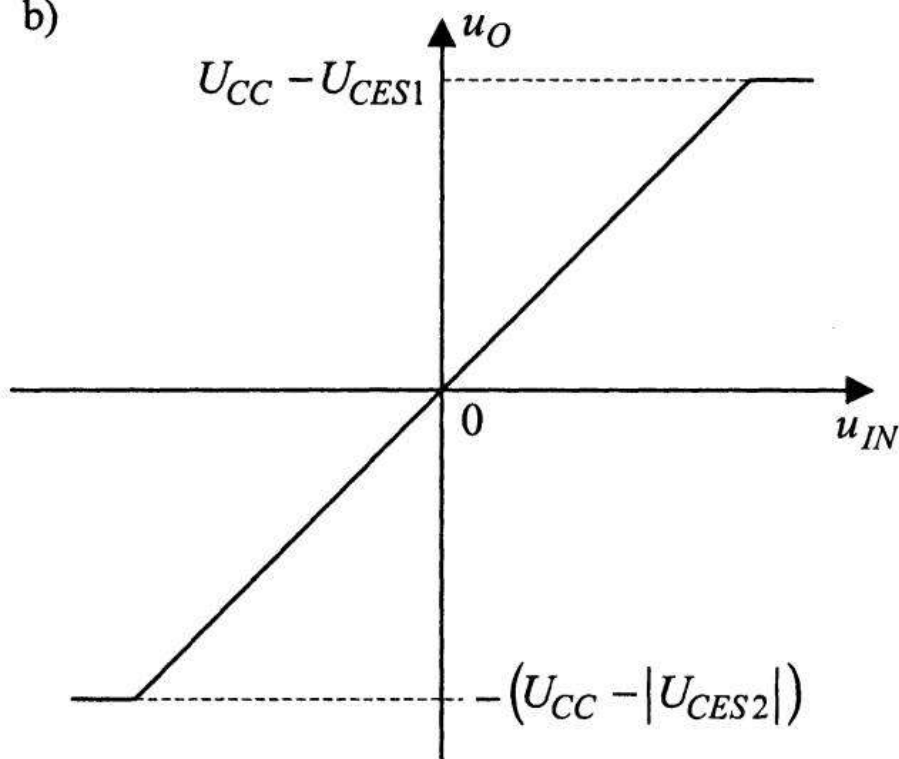
Rys. 11. Linearyzacja charakterystyki przejściowej wzmacniacza mocy

Wzmacniacze mocy - klasy pracy wzmacniacza. Klasa AB

a)

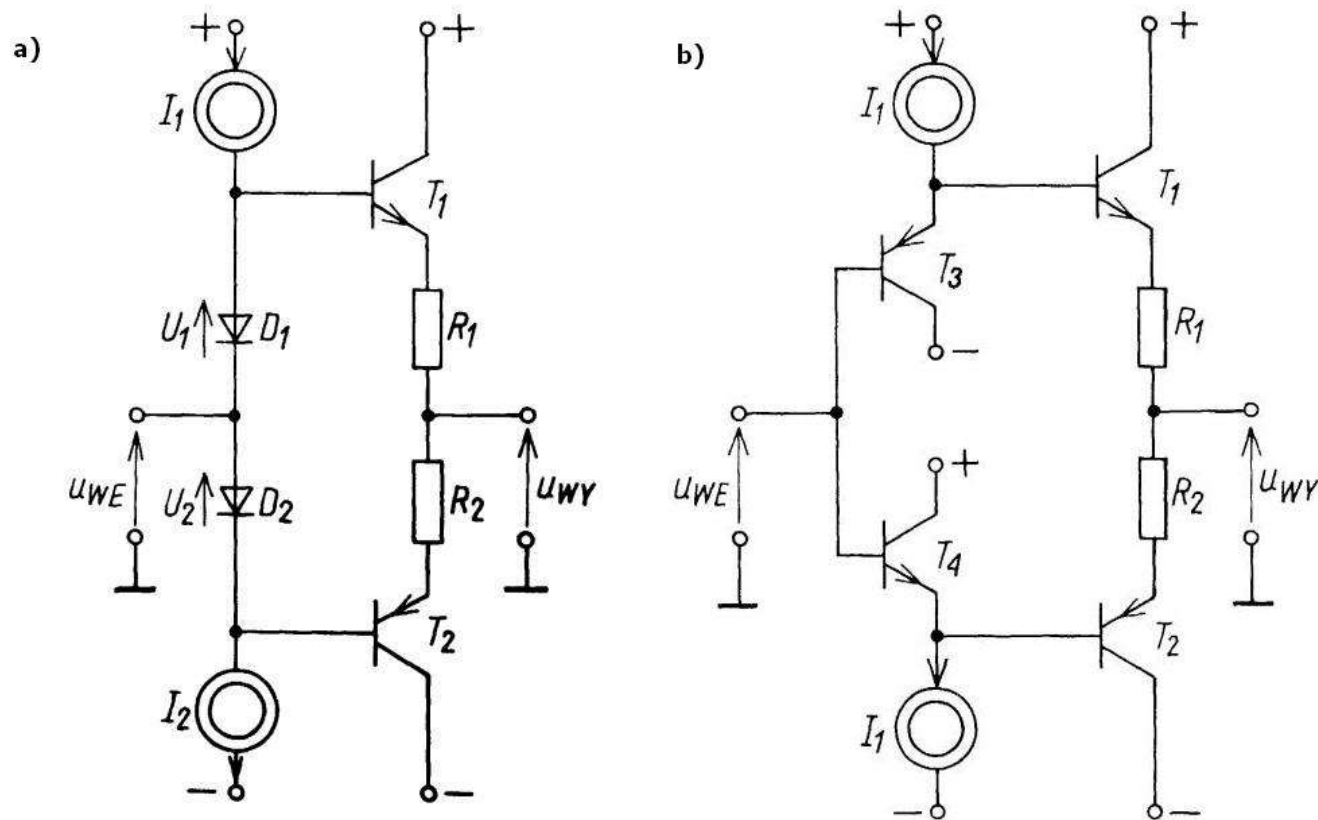


b)



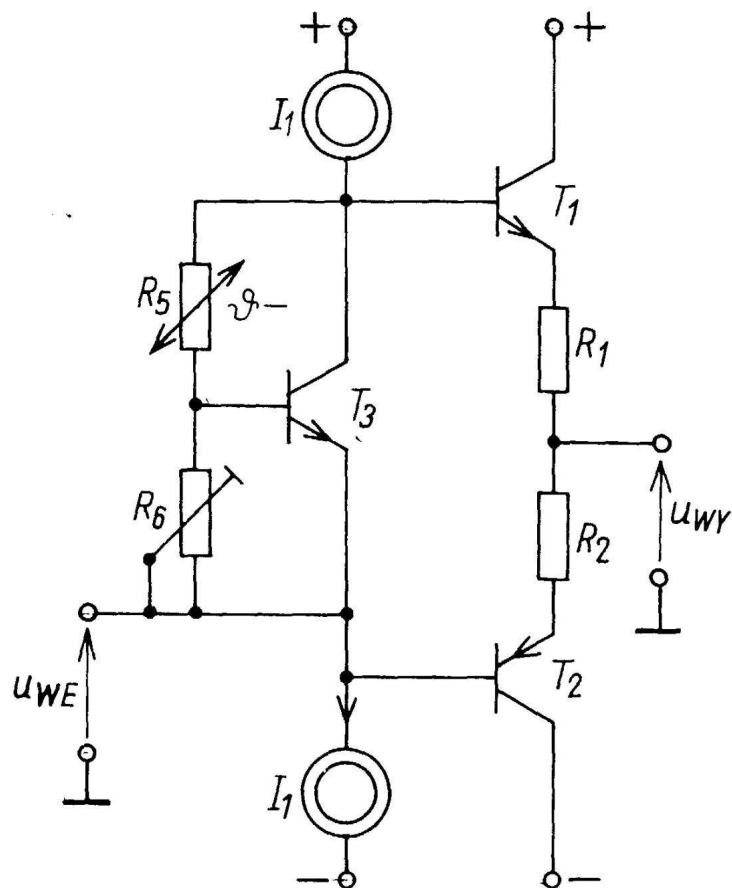
Rys.12. Wzmacniacz klasy AB: a) układ z linearyzacją i stabilizacją temperaturową punktu pracy, b) charakterystyka przejściowa układu

Wzmacniacze mocy klasy AB. Układy wstępnej polaryzacji.



Rys. 13. Wstępna polaryzacja tranzystorów mocy za pomocą: a) diod, b) tranzystorów

Wzmacniacze mocy klasy AB. Układy wstępnej polaryzacji.

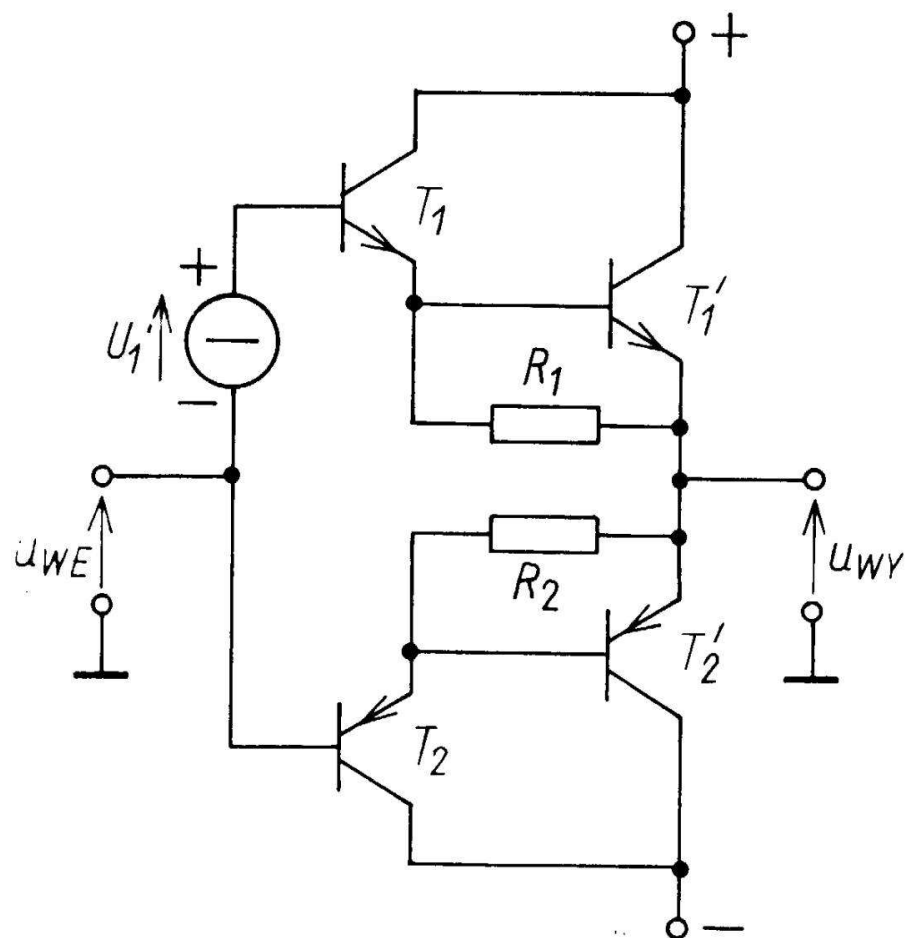


Rys.14. Polaryzacja wstępna tranzystorów mocy z dowolnie wybieralnym wsp. temperaturowym

Napięcie wstępnej polaryzacji:

$$U_{CE3} = U_{BE3} \left(1 + \frac{R_5}{R_6} \right)$$

Wzmacniacze mocy klasy AB. Wzmacniacze z komplementarnymi układami Darlingtona



Zastosowanie układu Darlingtona – zwiększenie prądu wyjściowego poprzez zwiększenie wsp. wzmocnienia prądowego tranzystorów

Rys. 15. Wzmacniacz mocy z komplementarnymi układami Darlingtona

Wzmacniacze mocy klasy AB. Wzmacniacze z komplementarnymi układami Darlingtona

Wada układu – kompensacja czterech napięć U_{BE} .

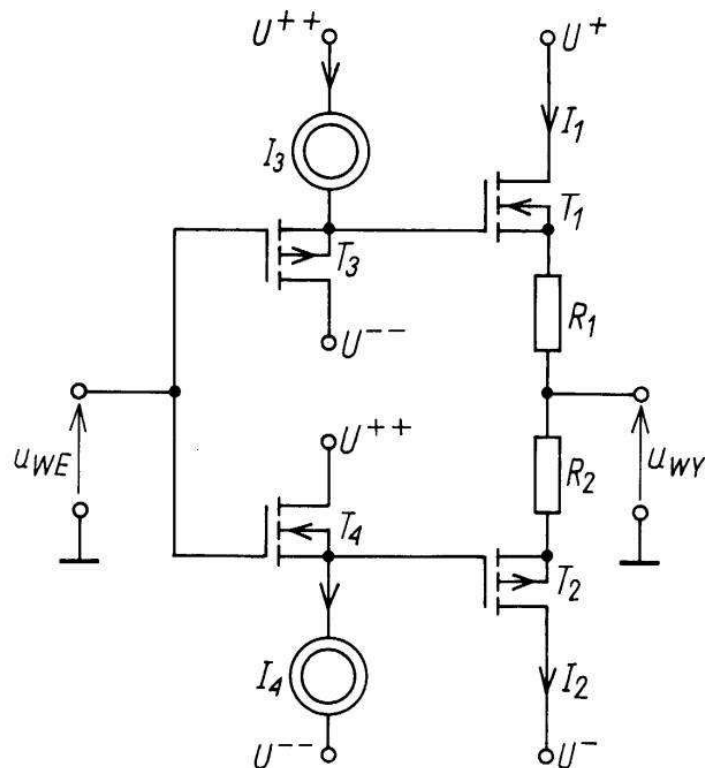
Eliminacja problemu – przepływ prądu spoczynkowego tylko przez tranzystory T_1 i T_2 ($U_{R1}, U_{R2} \approx 0.4V$)

Komplementarne wtórnik źródłowe – wzmacniacze mocy zbudowane z tranzystorów MOS

Zalety zastosowania tranzystorów MOS:

- większa szybkość działania
- mniejszy wpływ temperatury na parametry tranzystora – lepsza stabilność temperaturowa prądu spoczynkowego wzmacniacza mocy
- duża impedancja wejściowa
- dobra liniowość charakterystyk przejściowych dla dużych prądów

Wzmacniacze mocy klasy AB. Wzmacniacze z komplementarnymi wtórnikami źródłowymi



Przykład dla tranzystorów
firmy International Rectifier:

T_1 – IRF 531

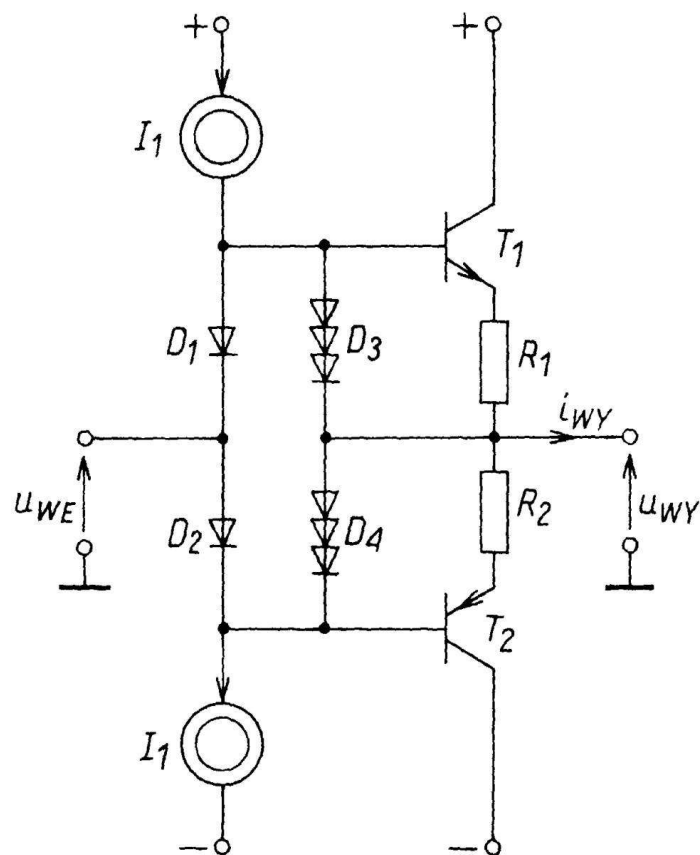
T_2 – IRF 9531

T_3 – IRFD 112

T_4 – IRFD 9122

Rys. 16. Polaryzacja wstępna komplementarnego wtórnika źródłowego

Wzmacniacze mocy klasy AB. Elektroniczne ograniczenia prądowe

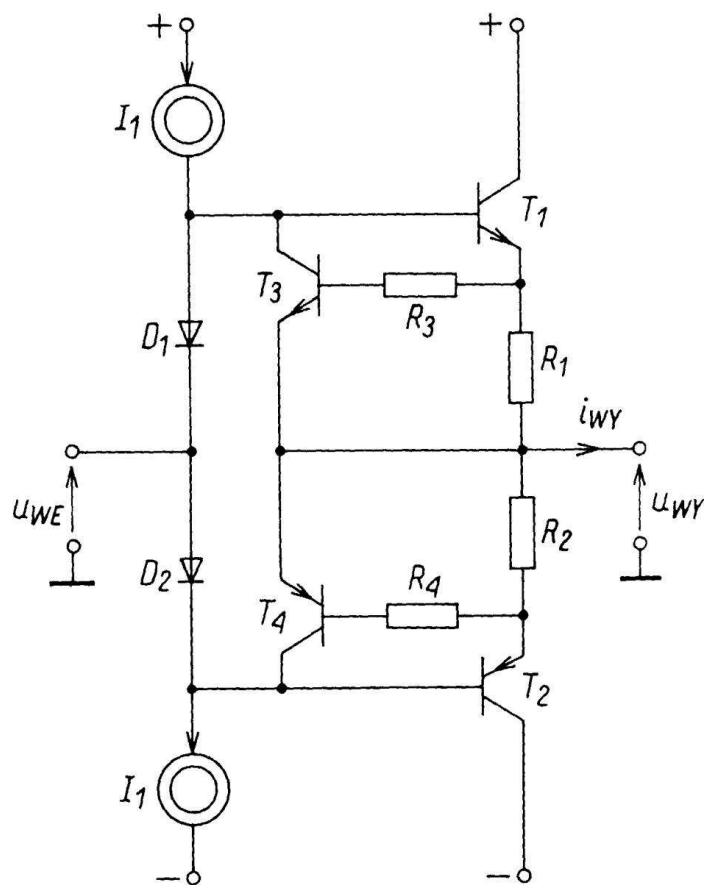


$$I_{WY \max}^+ = \frac{U_{D3} - U_{BE1}}{R_1} = \frac{0.7V}{R_1} (n_3 - 1)$$

$$I_{WY \max}^- = \frac{U_{D4} - |U_{BE2}|}{R_2} = -\frac{0.7V}{R_2} (n_4 - 1)$$

Rys. 17. Ograniczenie prądu wyjściowego wzmacniacza mocy za pomocą diod

Wzmacniacze mocy klasy AB. Elektroniczne ograniczenia prądowe

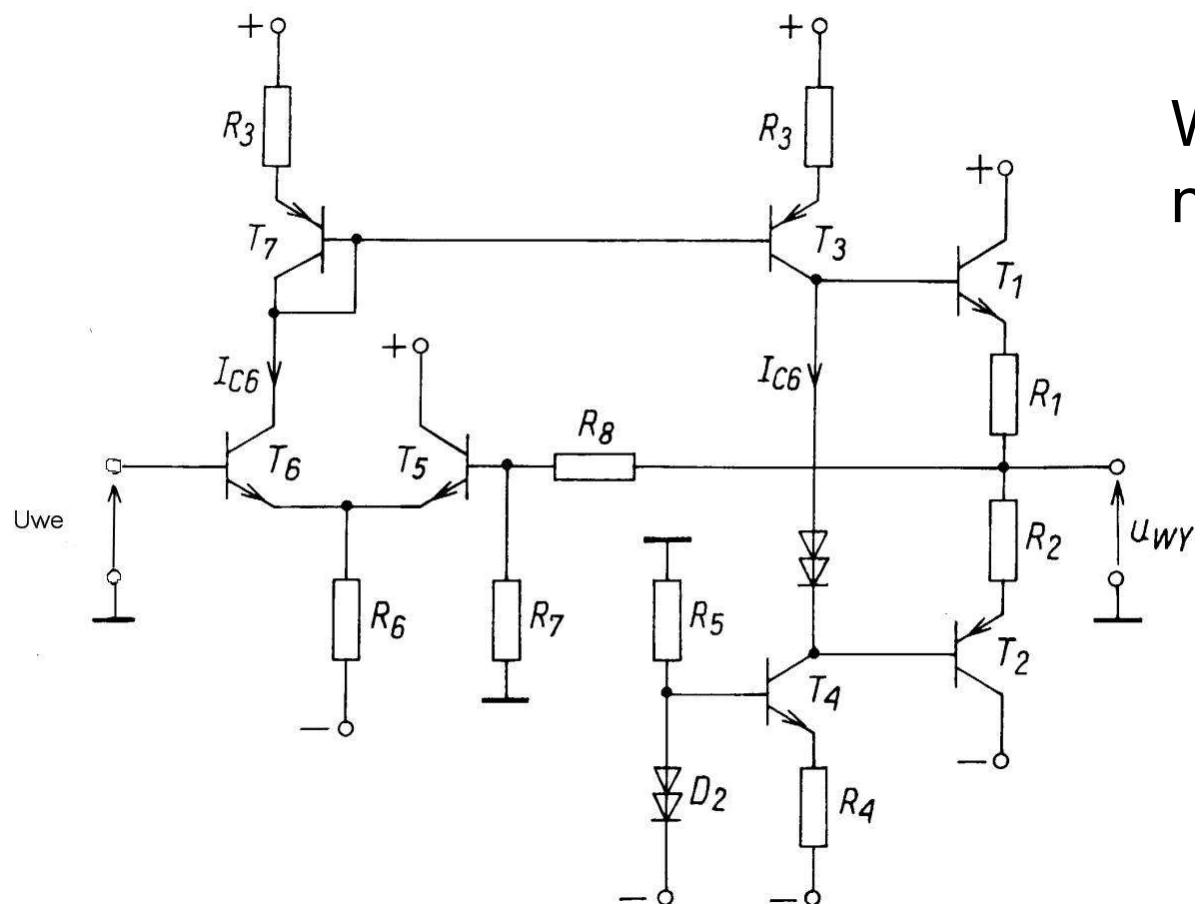


$$I_{WY \max}^+ = \frac{U_{BE3}}{R_1}$$

$$I_{WY \max}^- = \frac{U_{BE4}}{R_2}$$

Rys. 18. Ograniczenie prądu wyjściowego wzmacniacza mocy za pomocą tranzystorów

Wzmacniacze mocy klasy AB. Układy sterujące (przedwzmacniacze)

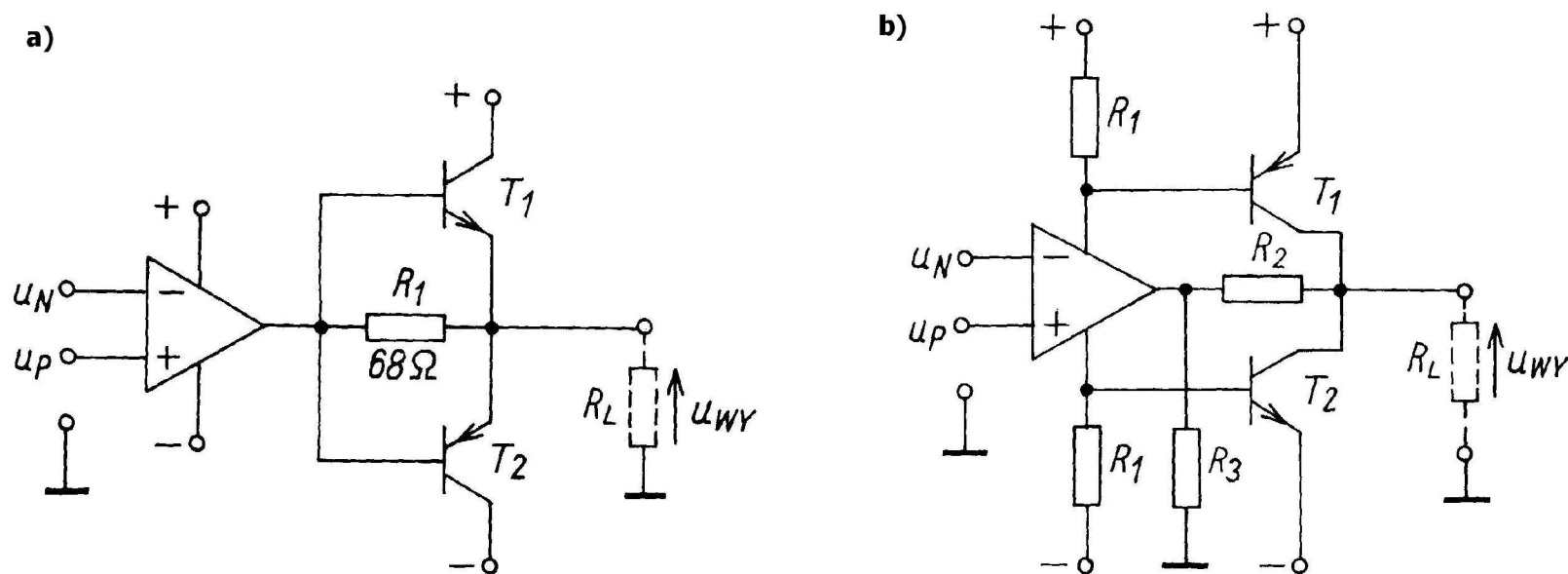


Wzmocnienie
napięciowe układu:

$$K_{Uf} = 1 + \frac{R_7}{R_8}$$

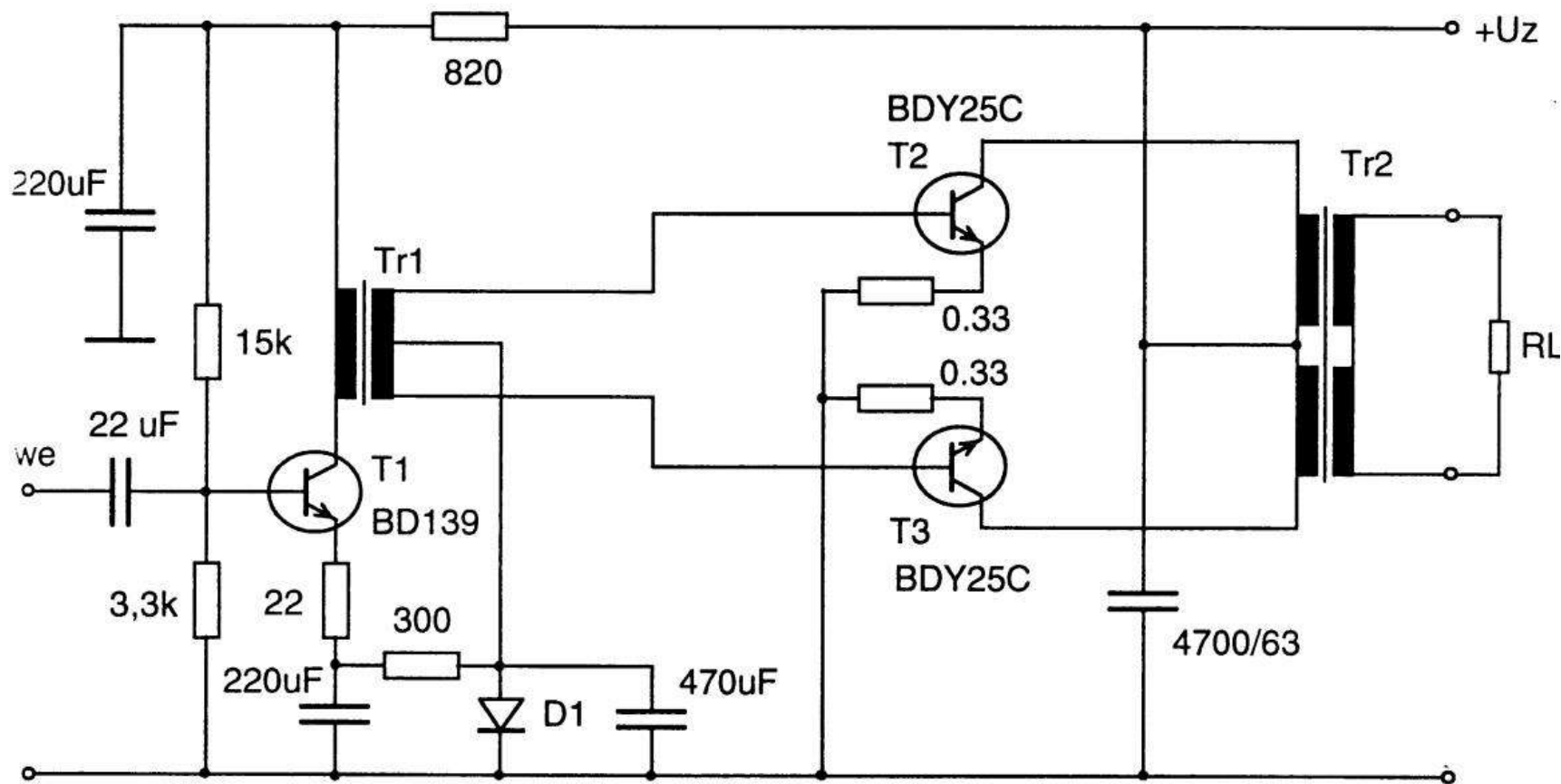
Rys.19. Prosty przedwzmacniacz napięcia

Wzmacniacze mocy klasy AB. Zwiększenie mocy wyjściowej scalonego wzmacniacza mocy



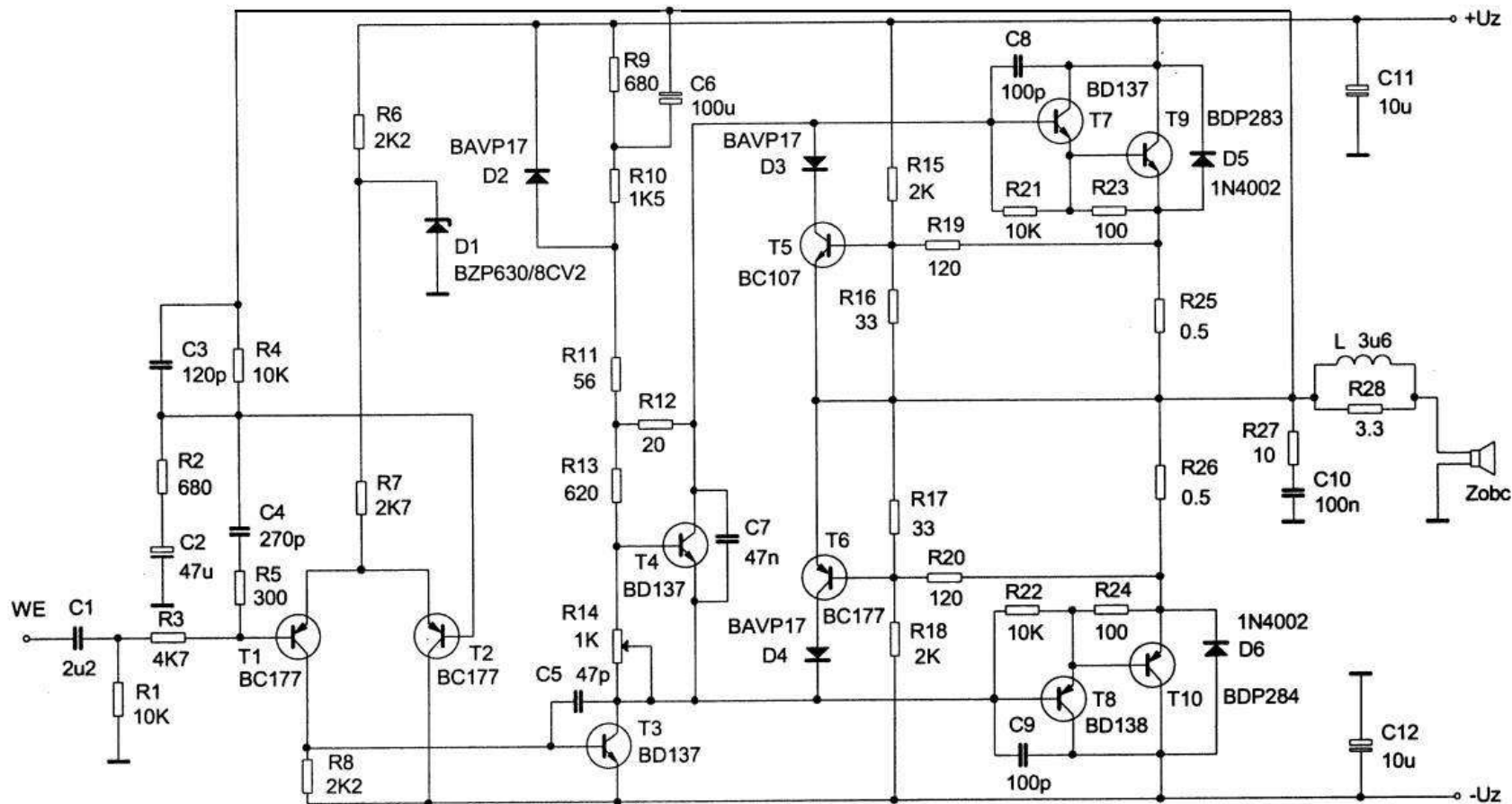
Rys. 20. Zwiększenie mocy wyjściowej scalonego wzmacniacza mocy: a) wzmacniacz prądowy z komplementarnymi wtórnikami emiterowymi, b) wzmacniacz prądowy z komplementarnymi układami ze wspólnym emiterem

Wzmacniacze mocy klasy AB. Przykłady praktyczne



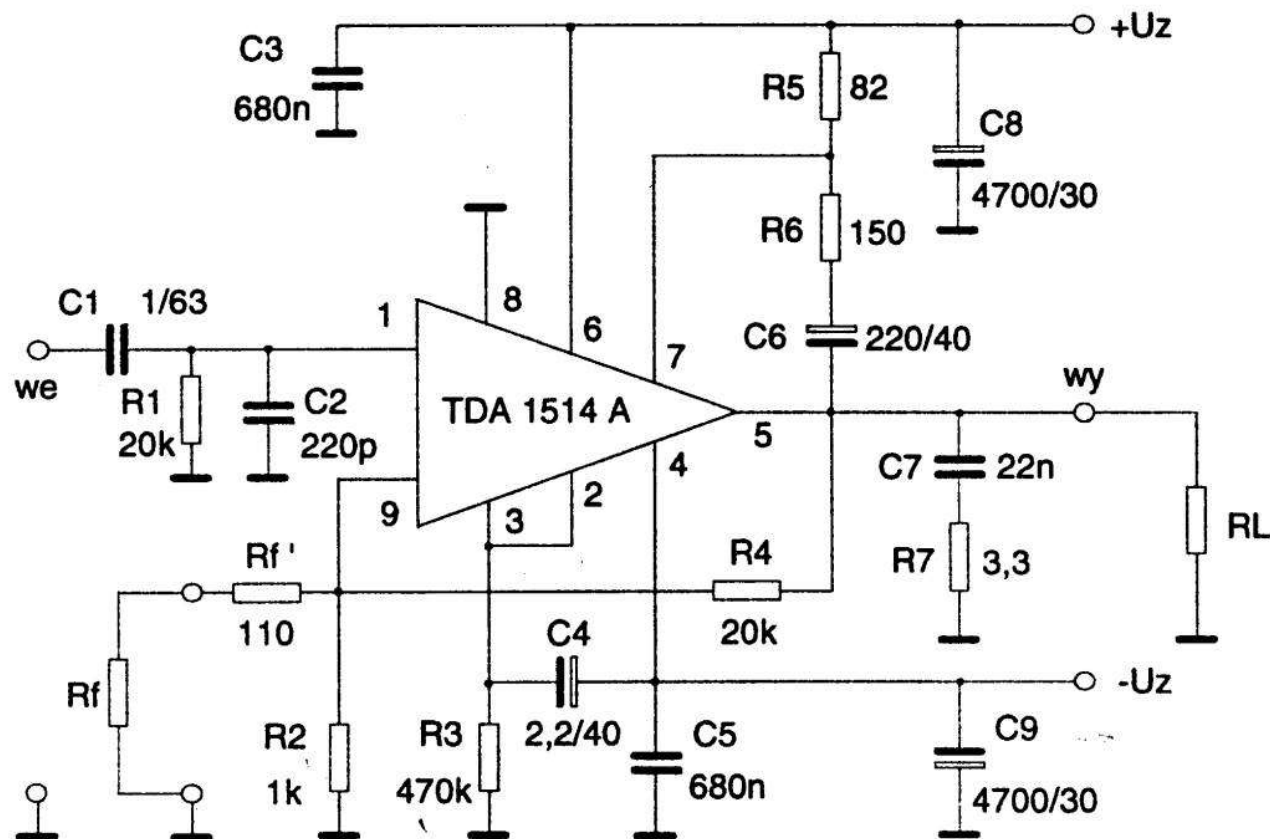
Rys. 21. Transformatorowy wzmacniacz pracujący w klasie AB

Wzmacniacze mocy klasy AB. Przykłady praktyczne



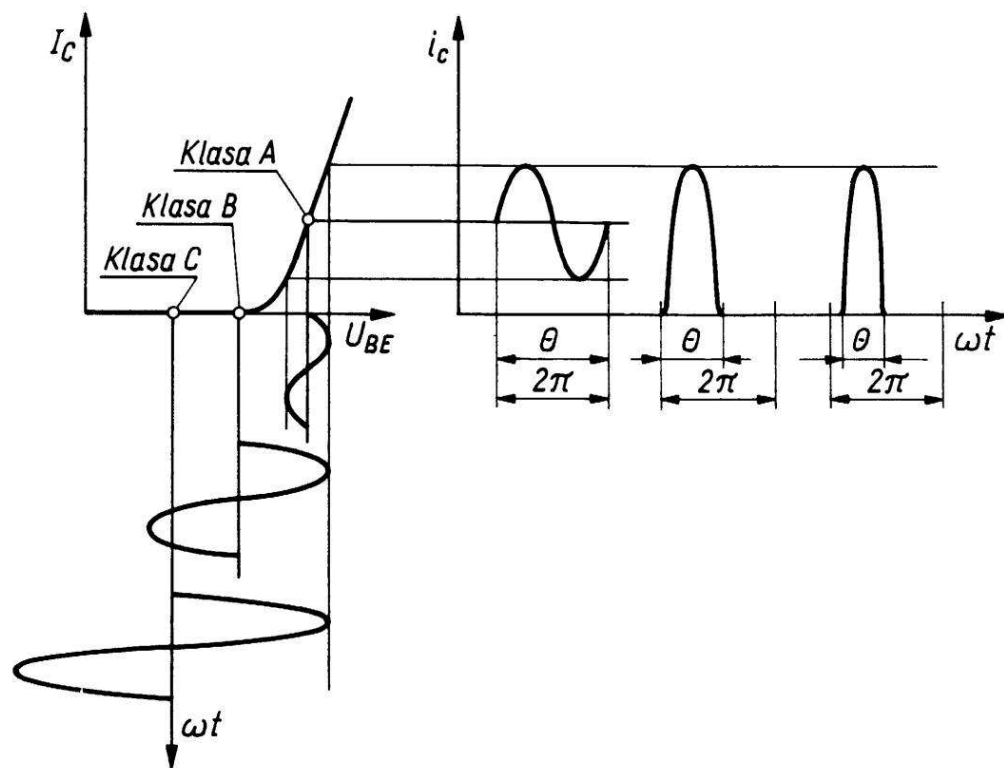
Rys.22. Tranzystorowy wzmacniacz klasy AB

Wzmacniacze mocy klasy AB. Przykłady praktyczne



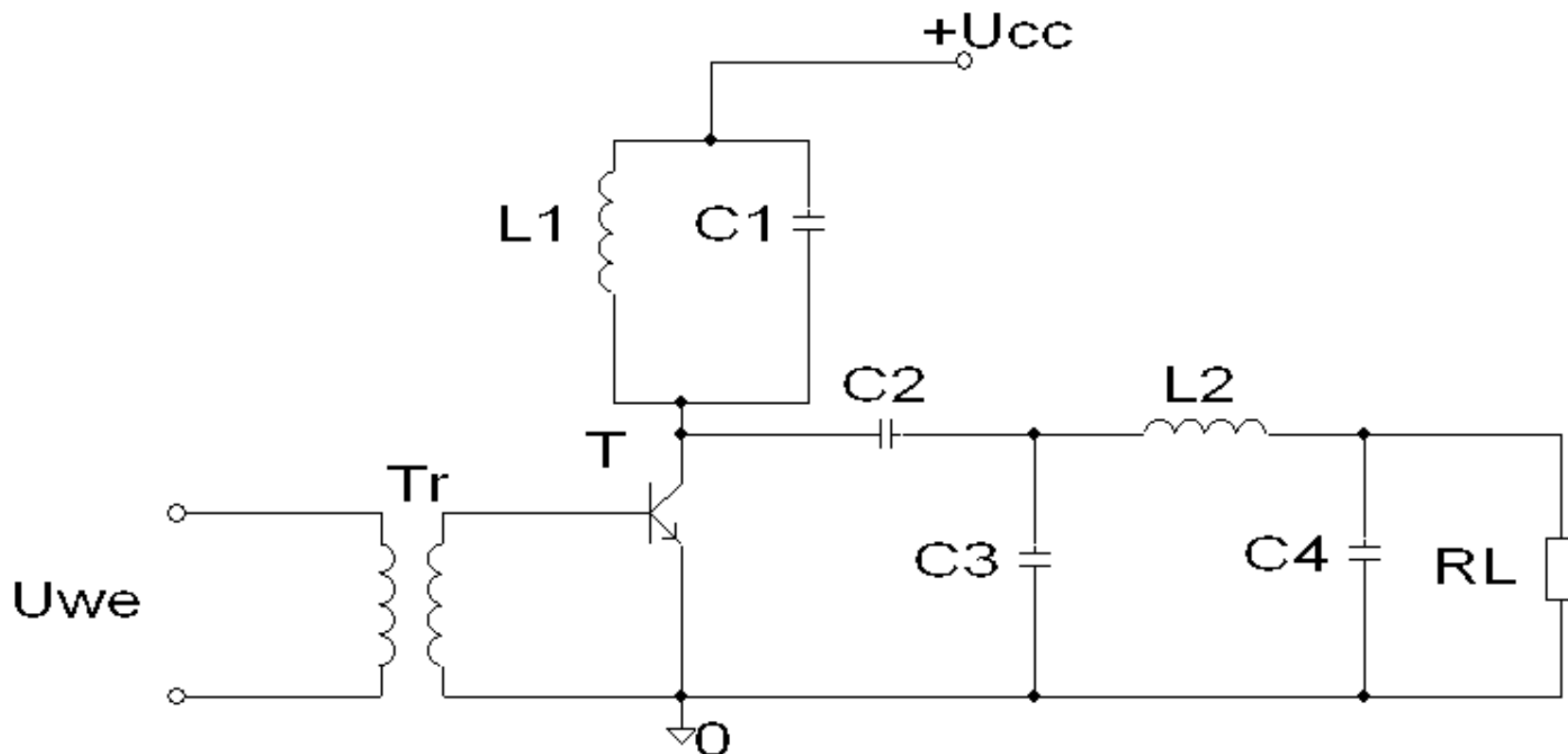
Rys.23. Wzmacniacz mocy zbudowany w oparciu o układ TDA 1514A

Rezonansowe wzmacniacze mocy klasy C



Rys.24. Położenie spoczynkowego punktu pracy i kształt prądu kolektora przy pracy w klasach: A, B i C

Rezonansowe wzmacniacze mocy klasy C



Rys.25. Przykładowy schemat wzmacniacza pracującego w klasie C



Rezonansowe wzmacniacze mocy klasy C

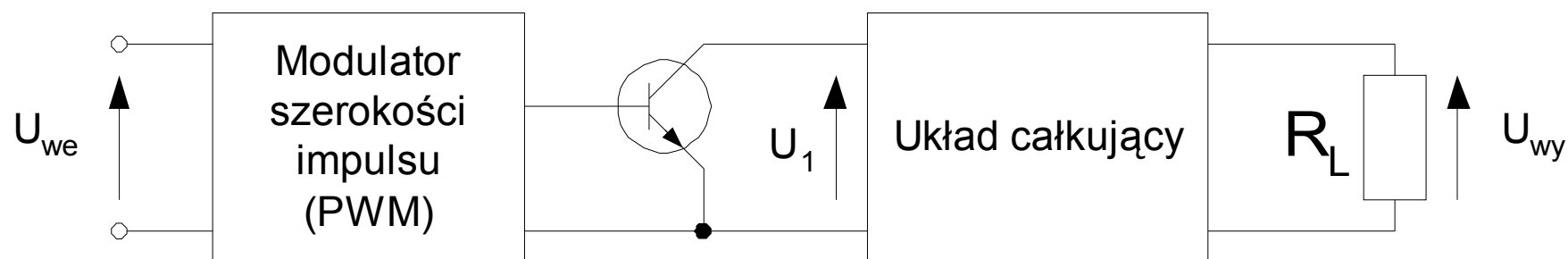
Dla dużych dobroci obwodu rezonansowego $Q > 10$, niezależnie od kształtu impulsu prądowego, napięcie na obwodzie rezonansowym jest sinusoidalne.

Zastosowanie wzmacniaczy klasy C:

- stopnie końcowe nadajników radiowych
- urządzenia przemysłowe

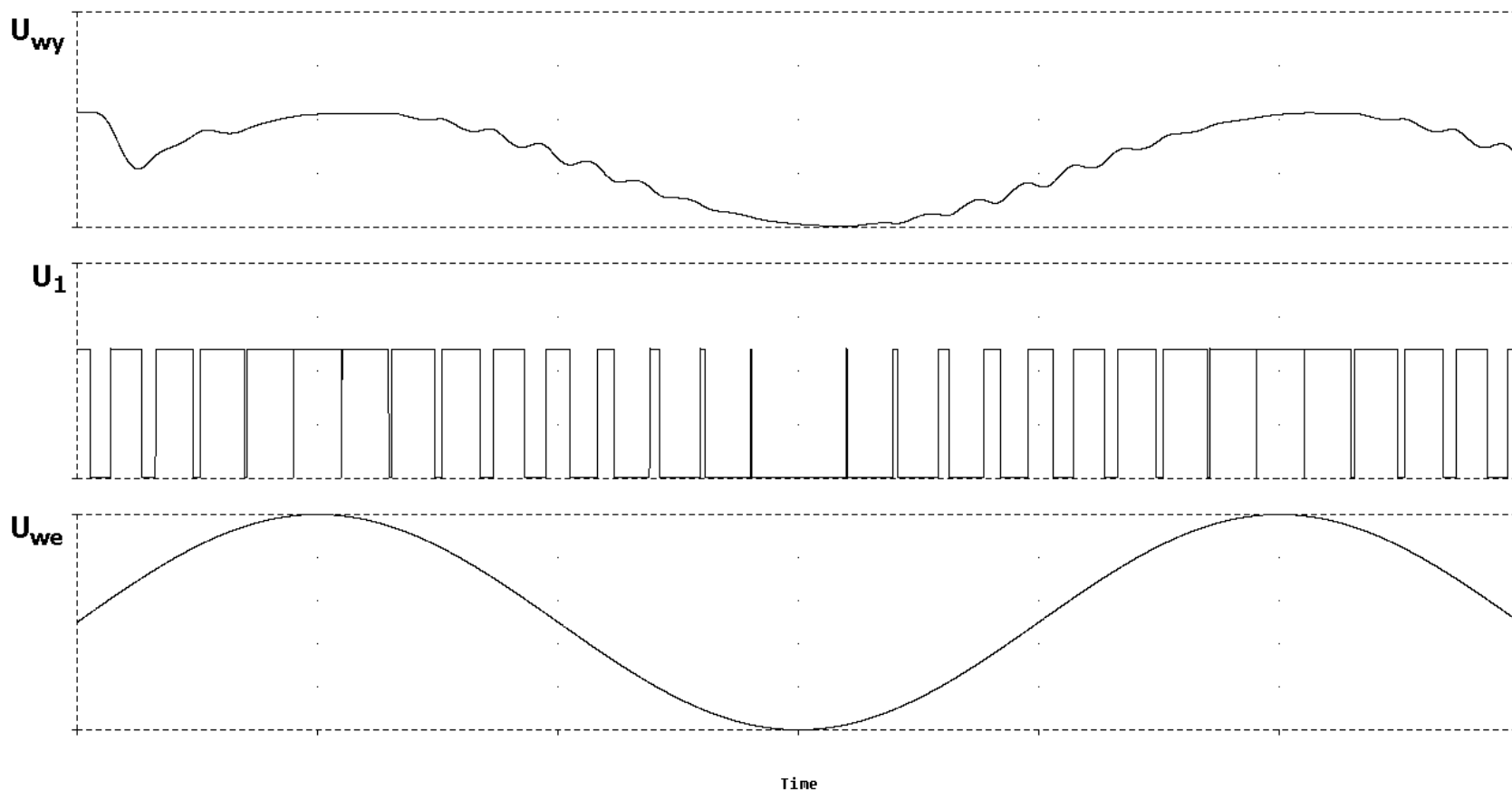
Sprawność – teoretycznie 100% dla kąta θ dążącego do zera. Praktycznie - 80%.

Impulsowe wzmacniacze mocy klasy D



Rys.26. Schemat blokowy wzmacniacza mocy pracującego w klasie D

Impulsowe wzmacniacze mocy klasy D



Rys. 27. Przebiegi napięć w poszczególnych punktach wzmacniacza klasy D

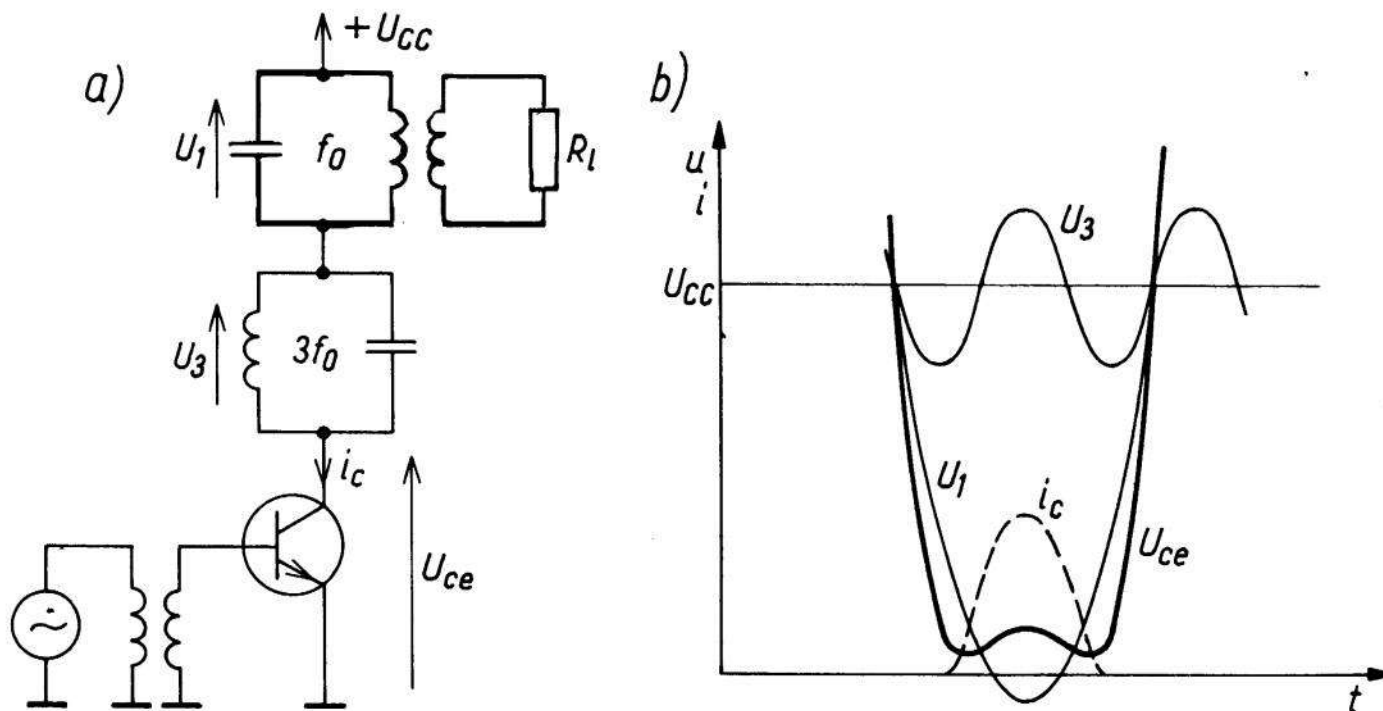
Impulsowe wzmacniacze mocy klasy D

Sprawność około 90%. Mała wrażliwość na zmiany temperatury.

Dla tranzystora o $P_{\text{CMAX}} = 5\text{W}$ wzmacniacz pracujący w klasie A może osiągnąć $P_{\text{LMAX}} = 2.5\text{ W}$. Natomiast wzmacniacz w klasie D zbudowany w oparciu o ten sam tranzystor pozwala osiągnąć moc wyjściową z zakresu (50-600) W.

Ograniczenia: duże zniekształcenia nieliniowe, aliasing.

Rezonansowe wzmacniacze mocy pracujące w klasie E



Rys. 28. Wzmacniacz rezonansowy pracujący w klasie E:
a) schemat, b) przebiegi napięć i prądów

Rezonansowe wzmacniacze mocy pracujące w klasie E

Sprawność wzmacniacza przekracza 90%.

Moc wyjściowa może być nawet 10 razy większa niż moc tracona w tranzystorze.

W wzmacniaczach tych stosuje się głównie tranzystory MOS ze względu na odporność na przeciążenia i dużą szybkość działania.

Wzmacniacze mocy - zagadnienia

- Rodzaje i parametry wzmacniaczy mocy
- Charakterystyka klas pracy elementu aktywnego we wzmacniaczach mocy
- Wzmacniacze mocy pracujące w klasie A
- Wady i zalety zastosowania transformatorów we wzmacniaczach mocy klasy A
- Wzmacniacze mocy pracujące w klasie B
- Wzmacniacze mocy pracujące w klasie AB
- Stabilizacja punktu pracy tranzystorów we wzmacniaczach klasy AB

Wzmacniacze mocy - zagadnienia

- Zwiększenie mocy wyjściowej i ograniczanie maksymalnego prądu wyjściowego we wzmacniaczach klasy AB
- Przedwzmacniacze we wzmacniaczach mocy klasy AB
- Zwiększenie mocy wyjściowej w scalonych wzmacniaczach mocy klasy AB
- Rezonansowe wzmacniacze mocy klasy C i E
- Impulsowy wzmacniacz mocy klasy D