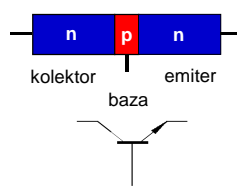
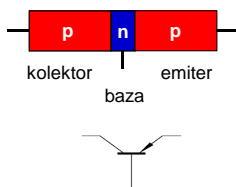
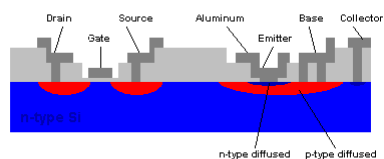


TRANZYSTORY BIPOLARNE ZŁĄCZOWE Bipolar Junction Transistor - BJT

Tranzystor bipolarny to **odpowiednie** połączenie dwóch złącz *pn*

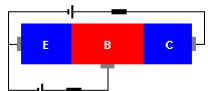


FET BJT



■ p-type Si (diffused) ■ n-type Si (substrate) ■ SiO₂
■ Aluminum ■ Photoresist ■ n-type Si (diffused)

Budowa tranzystora w technologii planarnej:



Tranzystor - 1947



The Nobel Prize in Physics 1956

"for their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect"



William Bradford Shockley

1/3 of the prize

USA

Semiconductor Laboratory of Beckman Instruments, Inc.



John Bardeen

1/3 of the prize

USA

University of Illinois Urbana, IL, USA



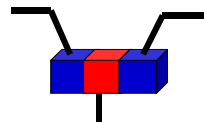
Walter Houser Brattain

1/3 of the prize

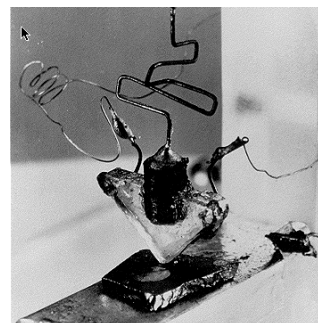
USA

Bell Telephone Laboratories Murray Hill, NJ, USA

Emiter (n) Kolektor (n)

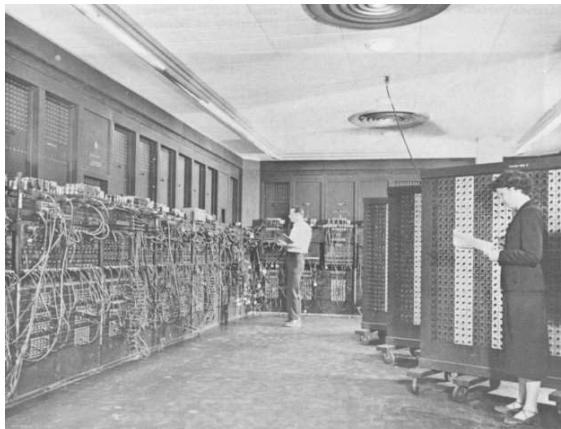


Baza (p)



ENIAC (1947)

18 000 lamp elektronowych
masa: ponad 27 ton,
powierzchnia ok. 140 m²



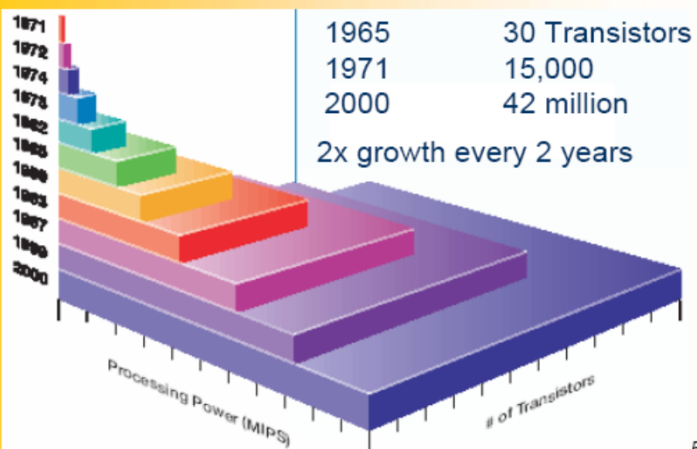
"Nature abhors the vacuum tube."

J.R. Pierce, Bell Labs engineer who coined the term 'transistor'



History of the Transistor

Processor development followed Moore's Law



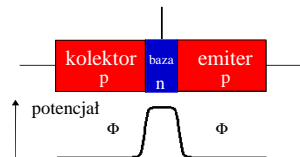
5

Działanie tranzystora bipolarnego złączowego *pnp*

a) Układ niespolaryzowany

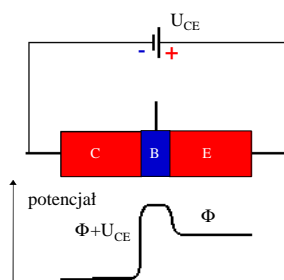
(brak wymuszonej polaryzacji zewnętrznej)

- Bariera potencjału na złączu emiter-baza i na złączu kolektor-baza
- dziury z emitera nie przenikają do kolektora, równowaga dynamiczna prądów rekombinacji i generacji



b) Zewnętrzne źródło polaryzacji układu emiter-kolektor (baza na potencjale nieustalonym zewnętrznie)

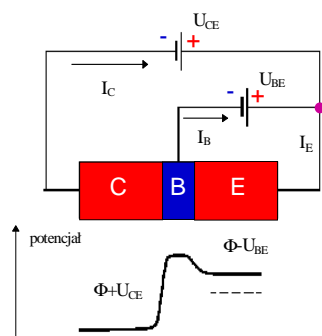
- Napięcie U_{CE} odkłada się na zaporowo spolaryzowanym złączu baza-kolektor
- Wysokość bariery potencjału na złączu emiter-baza bez zmian.
- Brak przepływu prądu w obwodzie



Działanie tranzystora bipolarnego złączowego *pnp* c.d.

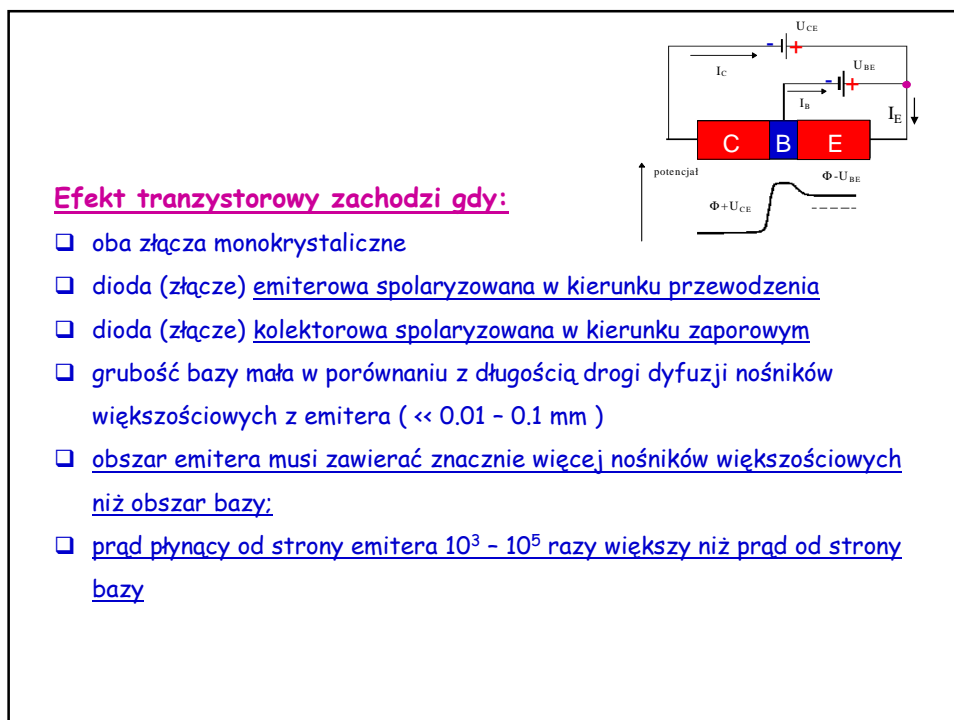
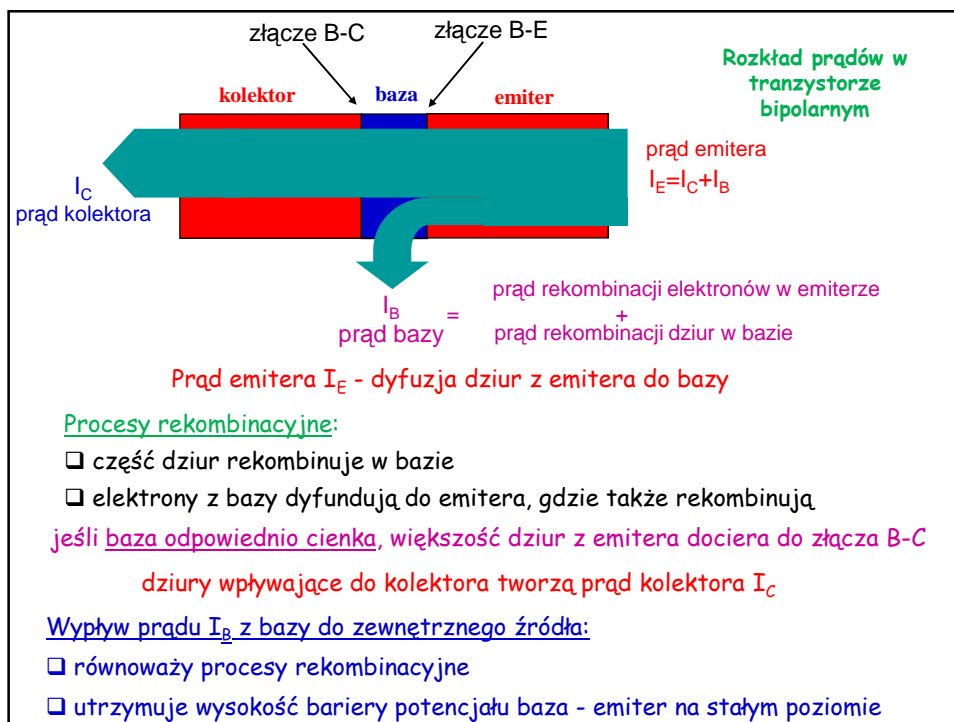
c) Złącze emiter-baza spolaryzowane w kierunku przewodzenia napięciem U_{BE}

- Bariera potencjału na złączu E-B maleje,
- Dziury z emitera dyfundują do bazy,
- Następnie dziury dyfundują do kolektora,
- Płyne prąd I_C w gałęzi kolektora
(warunek: niewielka rekombinacja dziur w bazie)
- Napięcie U_{BE} określa wysokość bariery potencjału na złączu E-B, czyli opór między emiterem i kolektorem



TRANSISTOR = TRANSfereable resISTOR.

Tranzystor **nnp** działa analogicznie przy odwrotnej polaryzacji;
kierunek przepływu prądu jest przeciwny;
nośnikami prądu kolektora są elektrony

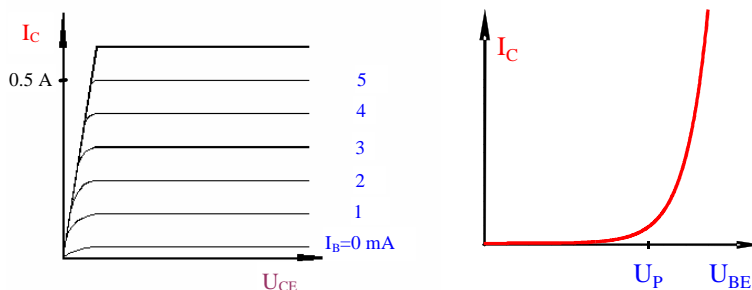


Zachodzi relacja: $I_E = I_C + I_B$ oraz prąd I_C jest proporcjonalny do prądu I_B

Współczynnik wzmacnienia prądowego tranzystora:

$$\beta = h_{21E} = \frac{I_C}{I_B}$$

zwykle $\beta \approx 100$, o ile zewnętrzne źródła zezwalają



Charakterystyka prądowo-napięciowa tranzystora

- Prąd kolektora I_C narasta β -razy szybciej niż prąd bazy I_B
- Prąd kolektora słabo zależy od napięcia kolektor-emiter (U_{CE}).

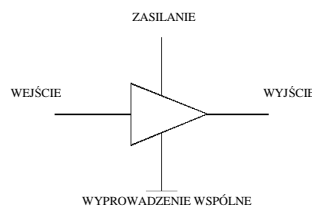
Wprowadzenie prądu do bazy (wywołanie przepływu prądu kolektora) jest możliwe, gdy napięcie U_{BE} przekroczy napięcie przewodzenia złącza danego typu (0.65 V dla krzemu, 0.35 V dla germanu)

WZMACNIACZE TRANZYSTOROWE

Wzmacniacz to układ elektroniczny, w którym

energia z układu zasilania jest zamieniana na energię sygnału wyjściowego

Sygnal wyjściowy jest funkcją sygnału wejściowego

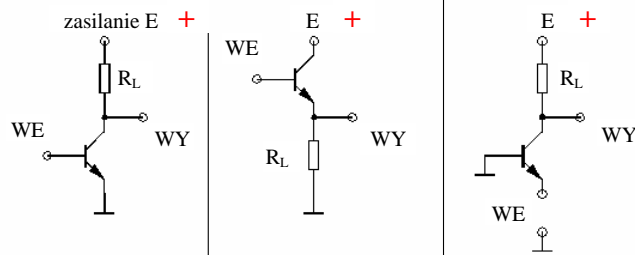


Wzmacniacz tranzystorowy :

➡ specjalny, sterowany **dzielnik napięcia** zasilającego

Jednym z rezystorów w tym dzielniku jest tranzystor

Trzy podstawowe układy wzmacniające z tranzystorem bipolarnym:

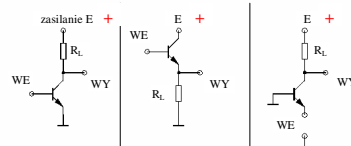


o wspólnym emiterze o wspólnym kolektorze o wspólnej bazie

Inne wyspecjalizowane wzmacniacze:

są modyfikacjami, ewentualnie kombinacjami układów podstawowych.

WŁASNOŚCI WZMACNIACZY



o wspólnym emiterze o wspólnym kolektorze o wspólnej bazie

Zakładamy kształt sygnału wejściowego (sterującego):

$$u_{WE}(t) = U_{WE} \cos(\omega t) + U_{WE0}$$

- podkład stały U_{WE0}
 - składowa zmienna harmoniczna o amplitudzie U_{WE}
- Sygnał użyteczny (niosący informację): składowa zmienna

Zakładamy :

- tę samą postać napięcia wyjściowego i wejściowego
 - tę samą postać prądu wyjściowego i wejściowego
- czyli wzmacniacz pracuje w zakresie liniowym

Przypomnienie: $I_C = \beta \cdot I_B$ $I_E = I_C + I_B$ $I_E = (\beta + 1) \cdot I_B$

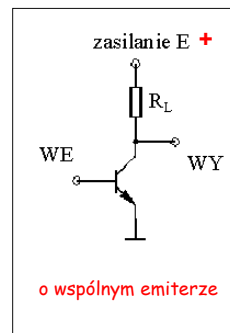
Wzmacniacz o wspólnym emiterze:

- prąd wejściowy = prąd bazy
- prąd wyjściowy = prąd kolektora

$$\Rightarrow I_{WY} = I_{WE} \cdot \beta$$

➔ duże wzmocnienie prądowe

$$U_{WY} = E - I_{WY} \cdot R_L$$



Dla dużego oporu rezystora R_L następuje na nim duży spadek napięcia, a więc:

➔ duże wzmocnienie napięciowe

➔ duże wzmocnienie mocy

➔ zachodzi **odwrócenie fazy** napięcia wyjściowego względem wejściowego

Wzmacniacz o wspólnym kolektorze (wtórnik emiterowy)

$$U_{WY} = U_{WE} - U_{BE}$$

$$\frac{U_{WY}}{U_{WE}} = \frac{U_{WE} - U_{BE}}{U_{WE}} < 1$$

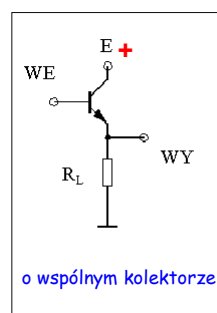
czyli: **brak wzmocnienia napięciowego**

prąd wejściowy = prąd bazy
prąd wyjściowy = prąd emitera

$$\text{czyli } I_{WY} = I_{WE} \cdot (\beta + 1)$$

➔ **wzmocnienie prądowe jest duże**

- zgodne fazy sygnału wyjściowego i wejściowego



Wzmacniacz o wspólnej bazie:

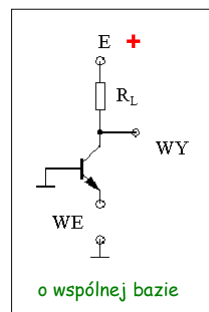
prąd wejściowy = prąd emitera:

$$I_{WE} = I_B (\beta + 1)$$

prąd wyjściowy = prąd kolektora:

$$I_{WY} = I_B \beta$$

wzmocnienie prądowe: $\frac{I_{WY}}{I_{WE}} = \frac{\beta}{\beta + 1} < 1$



brak wzmocnienia prądowego !

- przy odpowiednio dużym oporze rezystora R_L można uzyskać duże zmiany napięcia na wyjściu czyli **możliwe duże wzmocnienie napięciowe**
- napięcie wyjściowe zgodne w fazie z napięciem wejściowym

PODSUMOWANIE

	Wzmacniacz o:	WSPÓLNYM EMITERZE	WSPÓLNYM KOLEKTORZE	WSPÓLNEJ BAZIE
1	Wzmocnienie napięciowe	duże	< 1	duże
2	Wzmocnienie prądowe	duże	duże	< 1
3	Przesunięcie fazowe WE-WY	180°	0°	0°
4	Pasma przenoszenia	wąskie	średnie	szerokie

WYZNACZANIE PUNKTU PRACY TRANZYSTORA

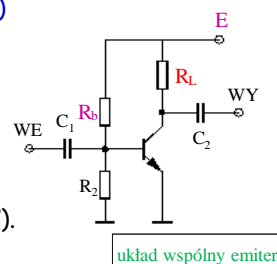
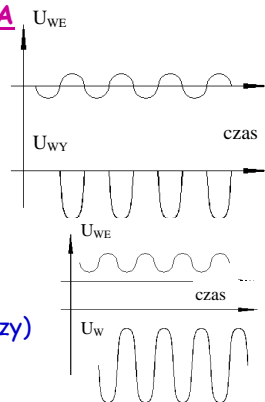
1. (ustalenie wejściowego prądu składowej stałej)

- efekt „prostowania jednopółkowego” - tranzystor pracuje liniowo tylko wtedy, gdy napięcie U_{BE} przekroczy napięcie przewodzenia złącza (np. 0.65 V)
- uzyskanie wzmacniania pełno-okresowego wymaga dodania stałego podkładu (stały prąd bazy) do wejściowego sygnału zmiennego (zmiennego prądu bazy)

Układ automatycznego dodawania podkładu stałego jest układem polaryzacji (określenie punktu pracy tranzystora)

Przykład:

prąd polaryzacji bazy tranzystora ze źródła zasilania przez opornik R_b ustalający składową stałą na wejściu. Kondensatory C_1 i C_2 służą do odseparowania podkładu stałego od wejścia i wyjścia wzmacniacza (sprzężenie AC).

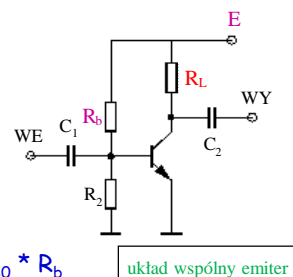
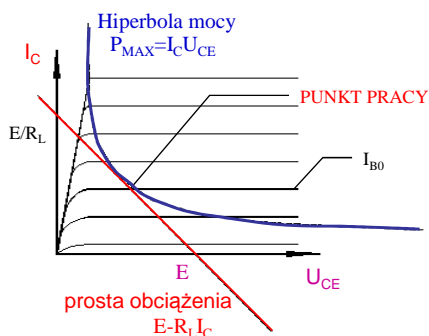


układ wspólny emiter

USTALANIE OPTIMALNEGO PUNKTU PRACY TRANZYSTORA graficzna analiza charakterystyk

Schemat postępowania:

1. Przestrzeń punktów pracy (U_{CE} , I_C) tranzystora jest ograniczona przez hiperbolę maksymalnej dopuszczalnej cieplnej mocy strat tranzystora, określonej w katalogu przez producenta: $P_{MAX}=I_C * U_{CE}$
2. Tranzystor pracuje w układzie dzielnika napięcia z rezystorem R_L
 - przestrzeń punktów pracy ogranicza się do prostej opisanej równaniem: $U_{CE}=E - R_L * I_C$ (tzw. prosta obciążenia)
 - Napięcie zasilania E oraz opór R_L dobieramy tak, by prosta obciążenia była styczna do hiperboli mocy (lub przebiegała poniżej)
3. Odczytujemy optymalny prąd stałego podkładu I_{B0} ,
→ wyznaczamy wartość opornika R_b z r-nia: $E-0.65V=I_{B0} * R_b$



układ wspólny emiter

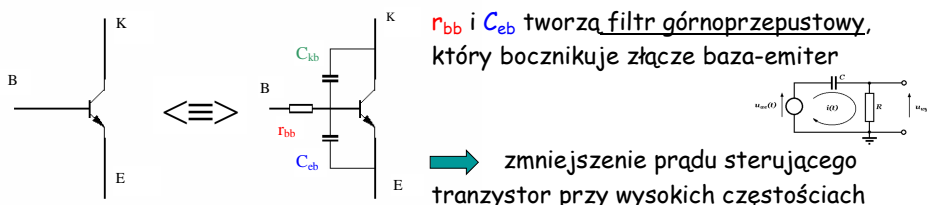
PASMO WZMOCNIENIA I PASMO PRZENOSZENIA

Pasmo wzmocnienia (przenoszenia) wzmacniacza określone jest przez:

- własności tranzystora (**wielkości pasożytnicze**)
- sposób współdziałania tranzystora z obwodem wzmacniacza
- podłączenia wejścia i wyjścia wzmacniacza

Pasożytnicze elementy tranzystora rzeczywistego:

rozproszona rezystancja bazy r_{bb} , pojemności emiter-baza C_{eb} i kolektor-baza C_{kb}

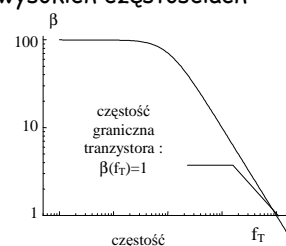


Skutek: współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora maleje wraz ze wzrostem częstotliwości

Pasmo wzmocnienia tranzystora jest ograniczone przez

częstość graniczną f_T

- powyżej częstotliwości f_T współczynnik wzmocnienia prądowego $\beta < 1$



Efekt Millera

Sprężenie między kolektorem a bazą w postaci filtra górnoprzepustowego tworzonego przez: C_{kb} , r_{bb} oraz rezystancję źródła sygnału R_{WYG}

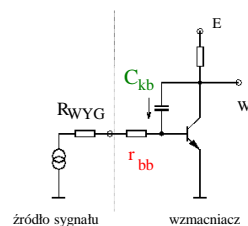
- ➔ ograniczenie pasma przenoszenia wzmacniacza w układzie o wspólnym emiterze

sygnały wyjściowe i wejściowe są przeciwne w fazie

➔ ujemne sprzężenie zwrotne wyjścia (kolektor) z wejściem (baza)

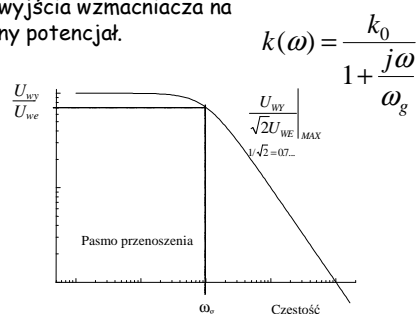
W układzie o wspólnym kolektorze słaby wpływ efektu Millera, gdyż kolektor tranzystora jest połączony z niskorezystywnym źródłem zasilania

W układzie o wspólnej bazie nie ma oddziaływania wyjścia wzmacniacza na wejście przez pojemność C_{kb} , gdyż baza ma ustalony potencjał.



Pasmo przenoszenia wzmacniacza określa się podobnie jak pasmo przenoszenia filtra:

dla częstotliwości granicznych wzmacniacza wzmocnienie jest mniejsze o $\frac{1}{\sqrt{2}}$ w stosunku do wzmocnienia maksymalnego



Instrukcja do ćwiczenia**„Tranzystor bipolarny -
wzmacniacz tranzystorowy
Część I**Napięcie E z generatora:sygnał liniowo narastający od 0V do 5 V i
częstości około 1000 Hz (sygnał trójkątny)

Zbudować obwód:

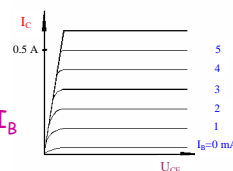
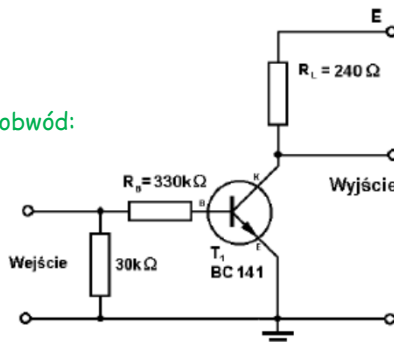
Napięcie U_{WE} :

- > stałe napięcie z zasilacza regulowane w zakresie od 0 do 10 V
- > mierzymy za pomocą woltomierza

$$I_C = \frac{E - U_{WY}}{R_L} \quad I_B = \frac{U_{WE} - 0.65V}{R_B}$$

$$U_{CE} = U_{WY}$$

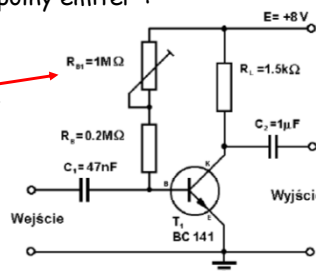
- wyznaczyć charakterystyki $I_C(U_{CE})$; parametr: prąd bazy I_B
- wykreślić rodzinę charakterystyk tranzystora.

**Część II**

Zbudować wzmacniacz w układzie „wspólny emiter”:

- zasilić układ napięciem stałym $E = +8V$
- zmierzyć za pomocą woltomierza napięcie kolektora
- dobrać wartość opornika regulowanego R_{B1} by $U_{CE} = 4V$

→ optymalny punkt pracy tranzystora we wzmacniaczu

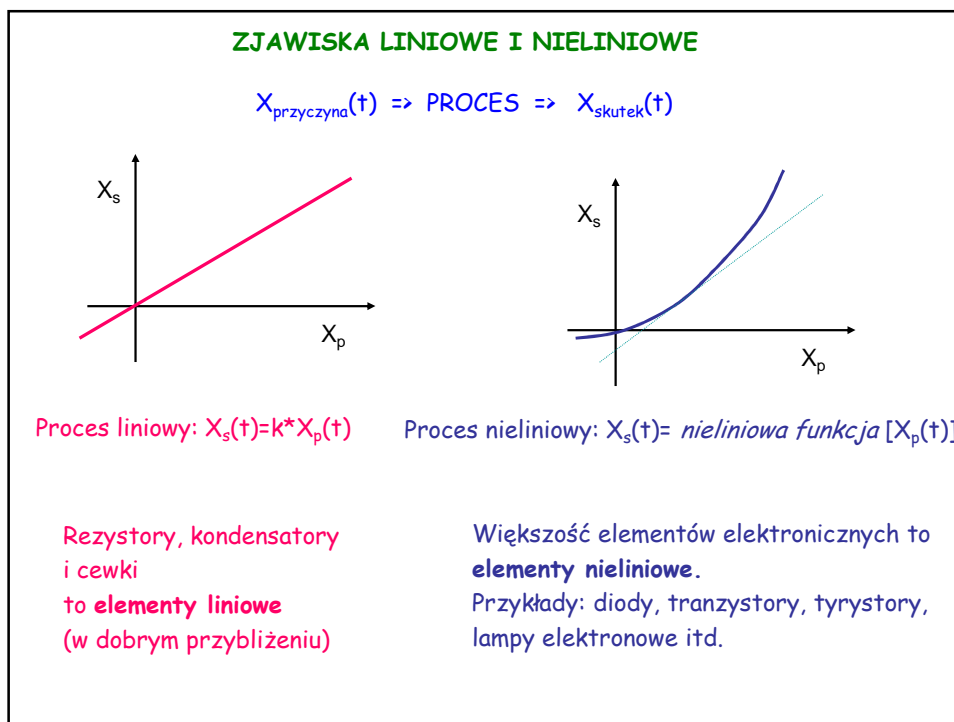
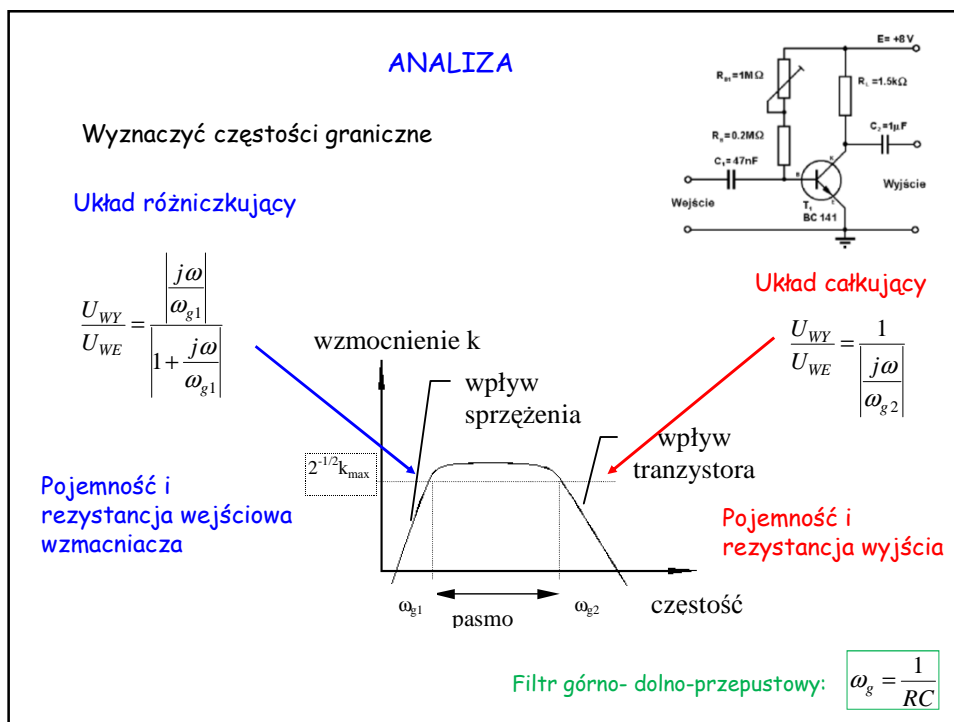
 U_{WE} - zmienny sygnał sterujący bazą U_{WY} - napięcie na kolektorzeWyznaczenie charakterystyki amplitudowej wzmacniacza - $U_{WY}(U_{WE})$

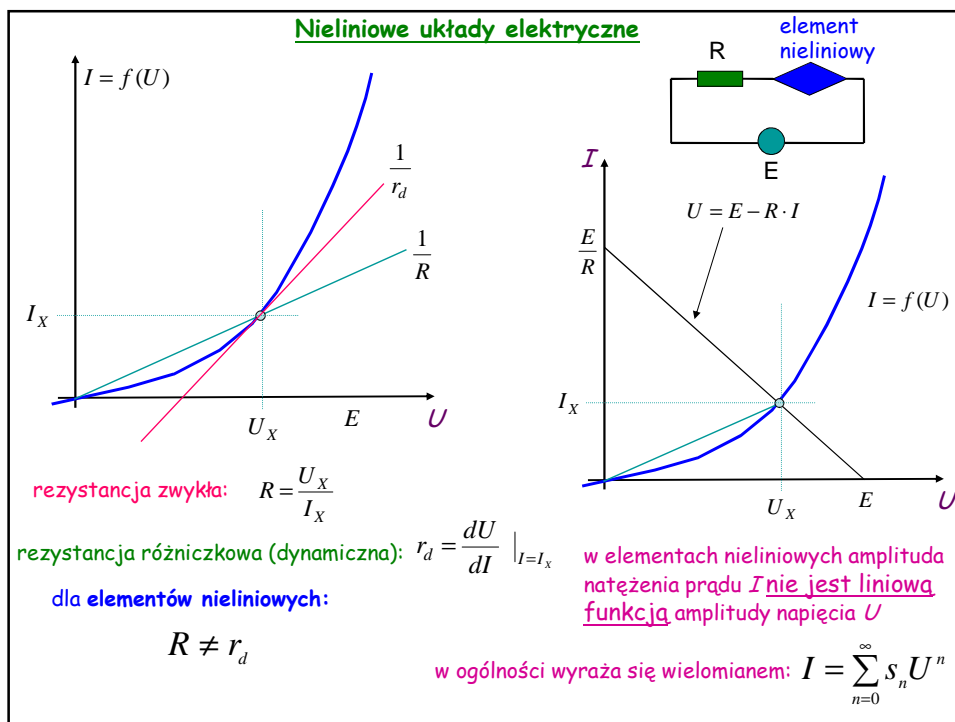
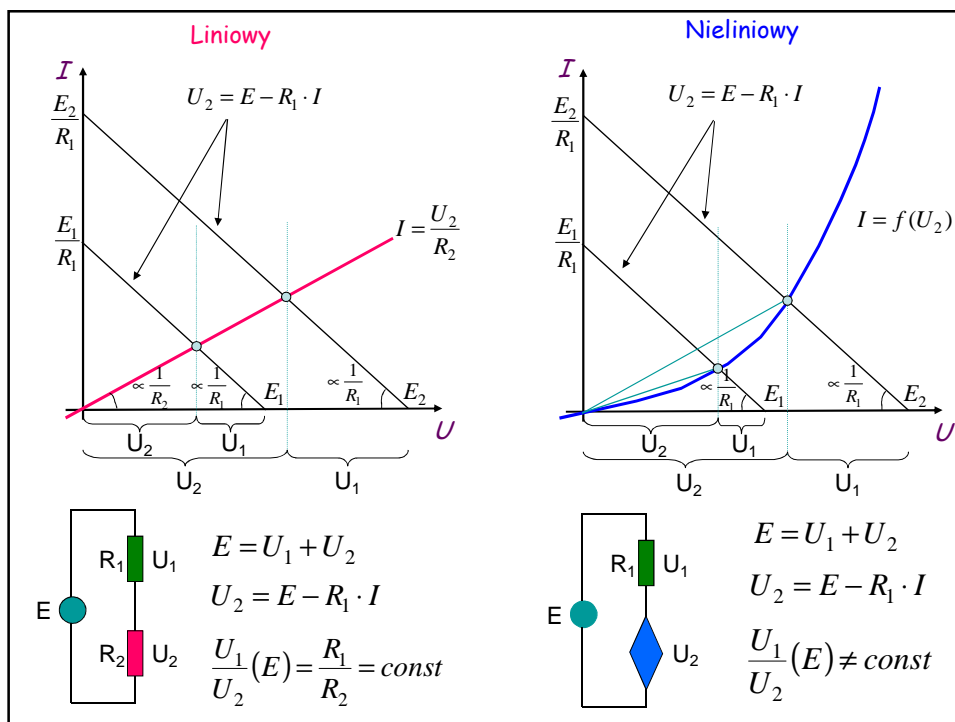
- Wejście układu: sygnał sinusoidalny o częstości około 1000 Hz
- Mierzmy $U_{WY}(U_{WE})$ w całym zakresie mierzalnych amplitud wejściowych.
- Określamy zakres amplitud U_{WE} , dla których wzmacniacz pracuje liniowo.
- Dla tego zakresu wyznaczamy wzmocnienie wzmacniacza k , dopasowując do danych doświadczalnych prostą typu $U_{WY} = k \cdot U_{WE}$

Wyznaczenie charakterystyki częstościowej wzmacniacza:

wzmocnienie w funkcji częstości: $k(\omega)$

Amplitudę sygnału wejściowego należy dobrać tak, by w całym zakresie badanych częstości (10 Hz - 1 MHz) sygnał był przetwarzany liniowo





ZJAWISKA NIELINIOWE

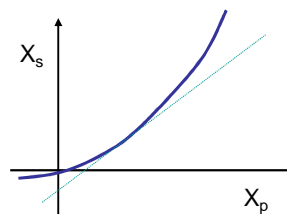
$$X_{\text{przyczyna}}(t) \Rightarrow \text{PROCES} \Rightarrow X_{\text{skutek}}(t)$$

◆ Proces nieliniowy (przykład): $X_s(t) = k[X_p(t) + \varepsilon X_p^2(t)] \quad \varepsilon \ll 1$

Założenie: $X_p(t) = \cos(\omega t)$



$$X_s(t) = k[\cos(\omega t) + \varepsilon \cos^2(\omega t)]$$



$$X_s(t) = k\left[\cos \omega t + \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} \cdot \cos(2\omega t)\right]$$

$$\cos^2 \theta = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\theta)$$

W procesie nieliniowym powstała fala o dwóch składowych częstotliwości:

- podstawowej: ω
- drugiej harmonicznej: 2ω

stała $\varepsilon/2$ przesunięcie wartości średniej - wyprostowanie (rektyfikacja)

Procesy nieliniowe \rightarrow dodatkowe częstotliwości

Mieszanie częstotliwości w układzie nieliniowym (przykład)

$$X_p(t) = A \cdot \cos \omega_1 t + B \cdot \cos \omega_2 t$$

PROCES NIELINIOWY: $X_s(t) = k[X_p(t) + \varepsilon X_p^2(t)] \quad \varepsilon \ll 1$

$$\begin{aligned} X_s(t) &= k \cdot X_p(t) + k \cdot \varepsilon (A \cos \omega_1 t + B \cos \omega_2 t)^2 = \\ &= k \cdot X_p(t) + k \cdot \varepsilon (A^2 \cos^2 \omega_1 t + B^2 \cos^2 \omega_2 t + 2AB \cos \omega_1 t \cos \omega_2 t) \end{aligned}$$

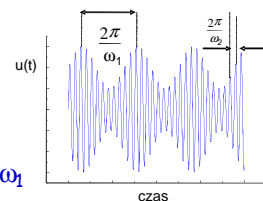
$$AB[\cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t]$$

składowe sygnału X_s : $\omega_1, \omega_2, 2\omega_1, 2\omega_2, \omega_1 + \omega_2, |\omega_1 - \omega_2|$

modulacja amplitudy

jeśli ω_2 znacznie większe od ω_1 (ale porównywalne)

\Rightarrow modulacja amplitudy fali o częstotliwości ω_2 z częstotliwością ω_1



$C(t) \propto \cos \omega_1 t$ funkcja modulacji amplitudy fali podstawowej

WIDMO SYGNAŁU, SKŁADOWE HARMONICZNE

Twierdzenie Fouriera : jeżeli funkcja $u(t)$ jest periodyczna o okresie T , to można ją przedstawić w postaci sumy szeregu harmonicznego:

$$u(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) dt \quad a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) \sin(n\omega_0 t) dt$$

Po przekształceniach i podstawieniu: $C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ $\phi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n}$

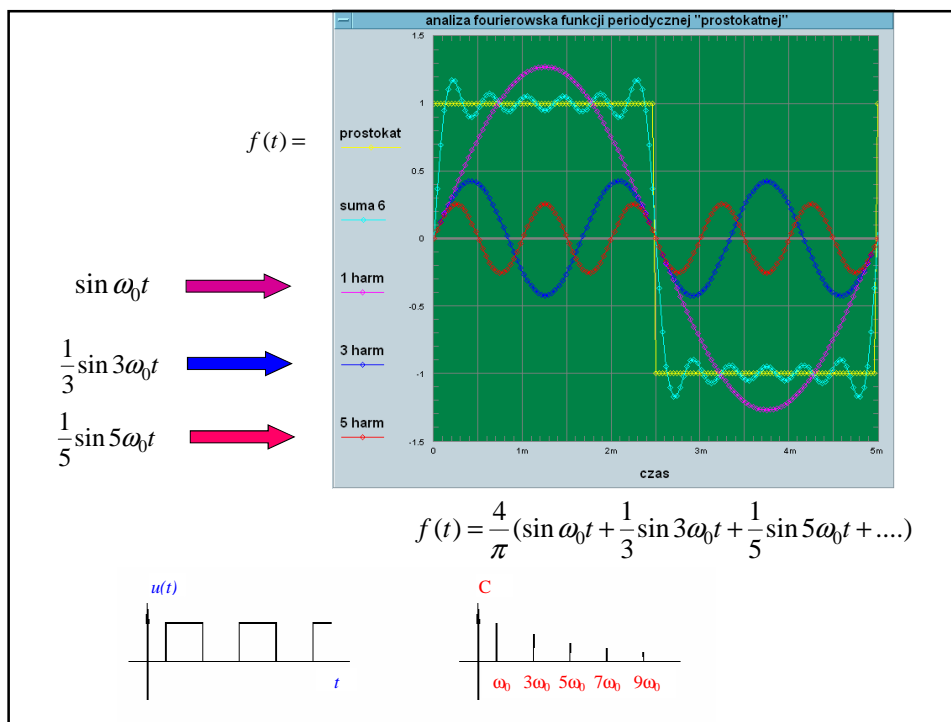
Każdą funkcję periodyczną możemy przedstawić w postaci: $u(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n)$

gdzie: $\begin{cases} n\omega_0 & - \text{częstości kolejnych składowych harmoniczych} \\ \phi_n & - \text{fazy kolejnych składowych harmoniczych} \\ C_n & - \text{amplitudy kolejnych składowych harmoniczych} \end{cases}$

Zbiór trójek liczb: $(C_n, n\omega_0, \phi_n)$ jest **widmem sygnału**

składowe o częstościach $n\omega_0$ - składowe **harmoniczne**

Funkcja okresowa charakteryzuje się widmem dyskretnym !!!

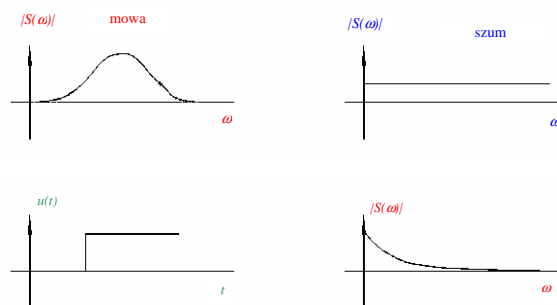


W przypadku, gdy funkcja $u(t)$ nie jest okresowa, jej widmo ma charakter ciągły i opisywane jest funkcją:

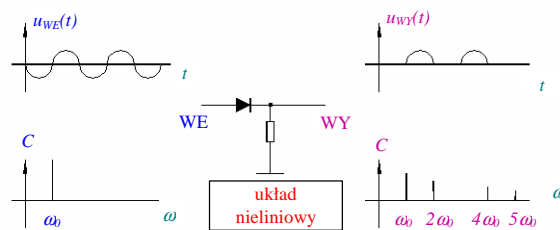
$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t)e^{-j\omega t} dt = |S(\omega)|e^{-j\varphi(\omega)}$$

$$|S(\omega)| = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)} \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{B(\omega)}{A(\omega)}$$

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \cos(\omega t) dt \quad B(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \sin(\omega t) dt$$



WZBOGACANIE WIDMA SYGNAŁU W UKŁADACH NIELINIOWYCH



Źródło: sygnał harmoniczny $U_{WE}(t) = A \cos(\omega_0 t + \phi)$

sygnał wyjściowy obwodu:
spadek napięcia na rezystorze R $U_{WY}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} D_n (A \cos(\omega_0 t + \phi))^n$

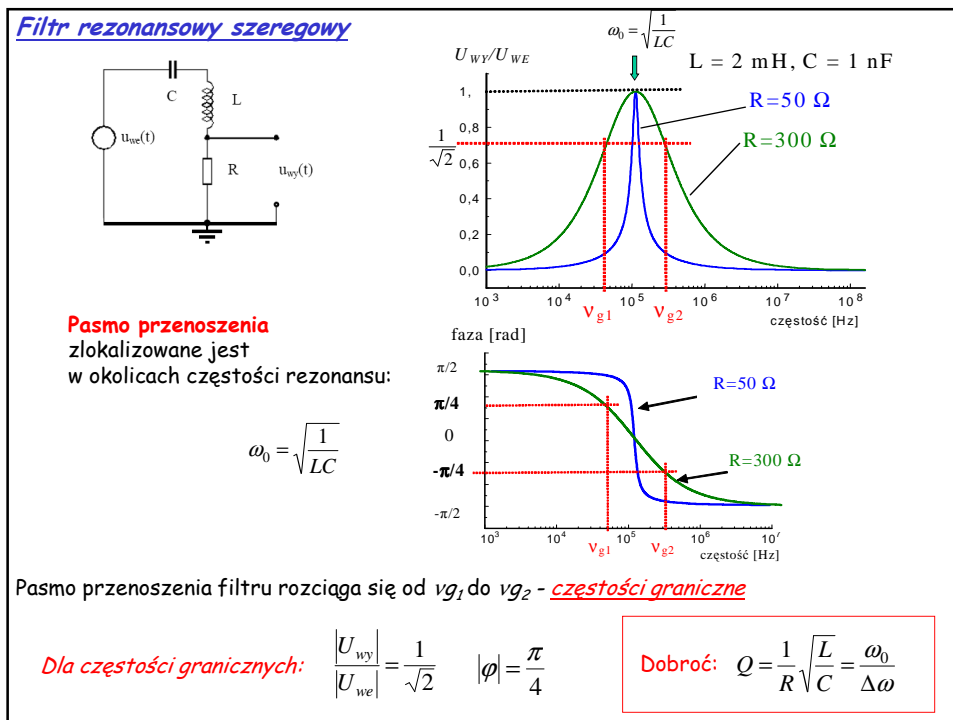
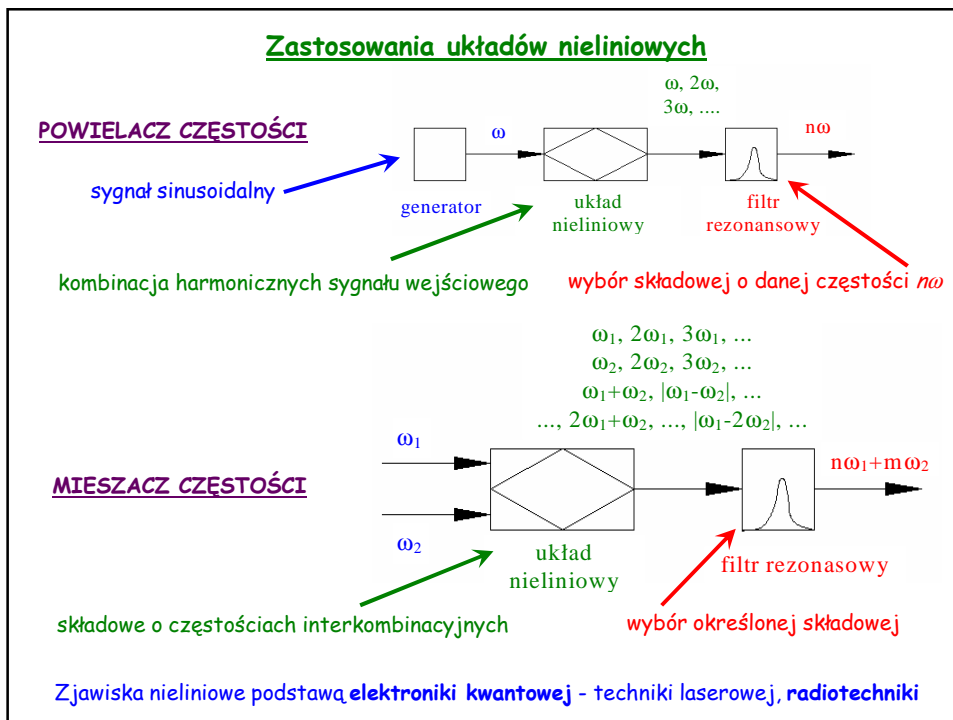
Zgodnie z twierdzeniem Fouriera: $U_{WY}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cdot \cos(n\omega_0 t + \phi_n)$

Widmo sygnału wyjściowego jest bogatsze niż widmo sygnału wejściowego !!!

(pojawiają się składowe o częstościach $\omega_0, 2\omega_0, 4\omega_0$ itd.)

UWAGA: Układy liniowe (np. układy RLC) zmieniają widmo sygnału oddziałując na amplitudę i fazę poszczególnych składowych harmonicznich.

Jednak układy liniowe nie wzbogacają widma sygnału

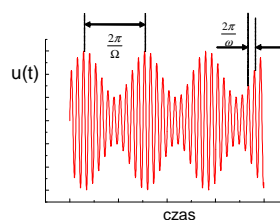


MODULACJA AMPLITUDOWA (AM)

modulacja amplitudy: przekazywanie informacji o częstotliwości Ω za pomocą fali nośnej o częstotliwości ω_0

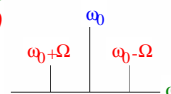
$$u(t) = U_0 [1 + m \sin(\Omega t)] \sin(\omega_0 t)$$

$$0 \leq m \leq 1 \quad \text{głębokość modulacji}$$

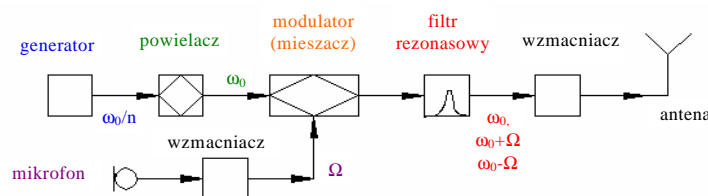


Po przekształceniach $U(t) = U_0 \sin(\omega_0 t) + \frac{1}{2} m U_0 \{\cos[(\omega_0 + \Omega)t] - \cos[(\omega_0 - \Omega)t]\}$

Widmo fali zmodulowanej amplitudowo złożone z trzech składowych o częstotliwościach: ω_0 (fali nośnej) oraz $\omega_0 + \Omega$ i $\omega_0 - \Omega$ (wstęg bocznych)



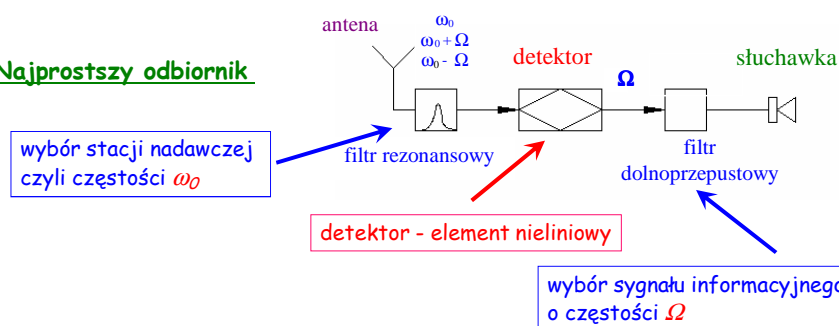
Nadajnik (radiowy)



ODBIORNIK: DEMODULACJA FALI ZMODULOWANEJ AMPLITUDOWO

Technika nieliniowa → odbiór informacji przekazywanej drogą radiową

Najprostszy odbiornik



W układzie nieliniowym:

mieszanie składowych przebiegu zmodulowanego amplitudowo

w widmie wyjściowym: składowa niskiej częstotliwości Ω (informacja)

Odbiorniki detektorowe: wykorzystywane do odbioru tylko bardzo silnych stacji