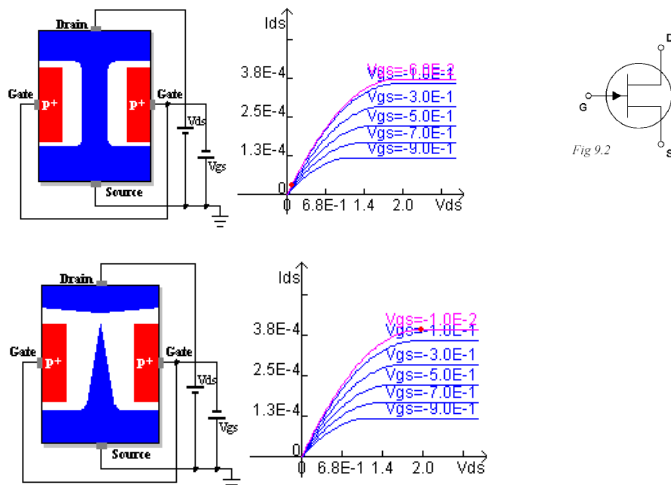
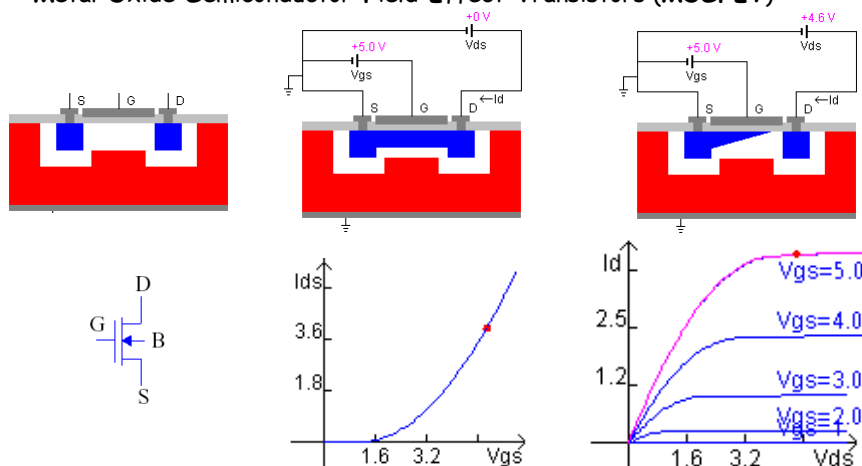


**TRANZYSTORY POLOWE**  
**TRANZYSTORY POLOWE ZŁĄCZOWE (Junction Field Effect Transistors)**



Rezystancja wejściowa (GATE - SOURCE) tranzystora sięga  $10^9 \Omega$

**TRANZYSTORY POLOWE Z IZOLOWANĄ BRAMKĄ**  
**Isolated Gate Field Effect Transistors**  
**Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors (MOSFET)**

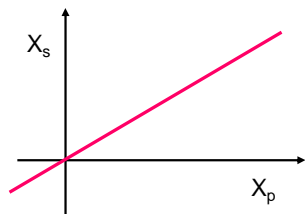


Opór bramki względem podłoża sięga  $10^{12}$ - $10^{14} \Omega$

tranzystory MOSFET w wersjach: wstępnie otwarty lub wstępnie zamknięty

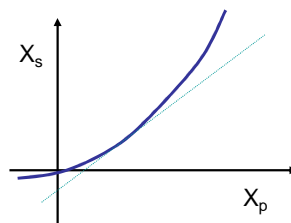
### ZJAWISKA LINIOWE I NIELINIOWE

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



Proces liniowy:  $X_s(t) = k \cdot X_p(t)$

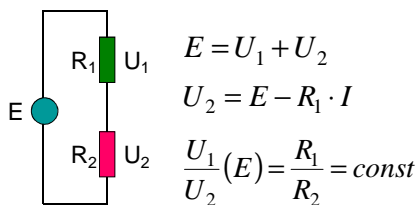
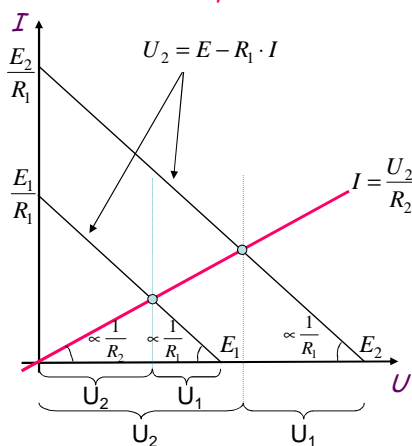
Rezystory, kondensatory i cewki to **elementy liniowe** (w dobrym przybliżeniu)



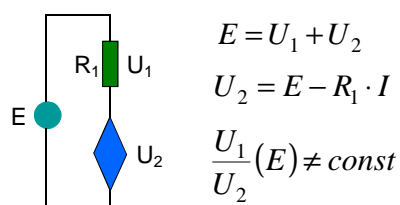
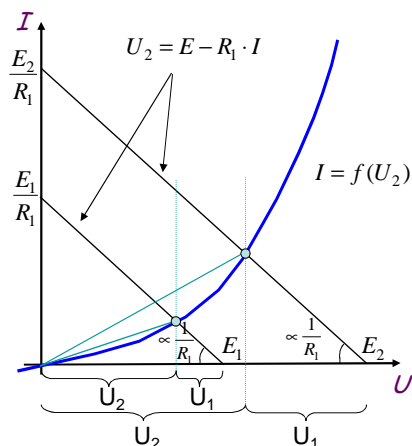
Proces nieliniowy:  $X_s(t) = \text{nieliniowa funkcja}[X_p(t)]$

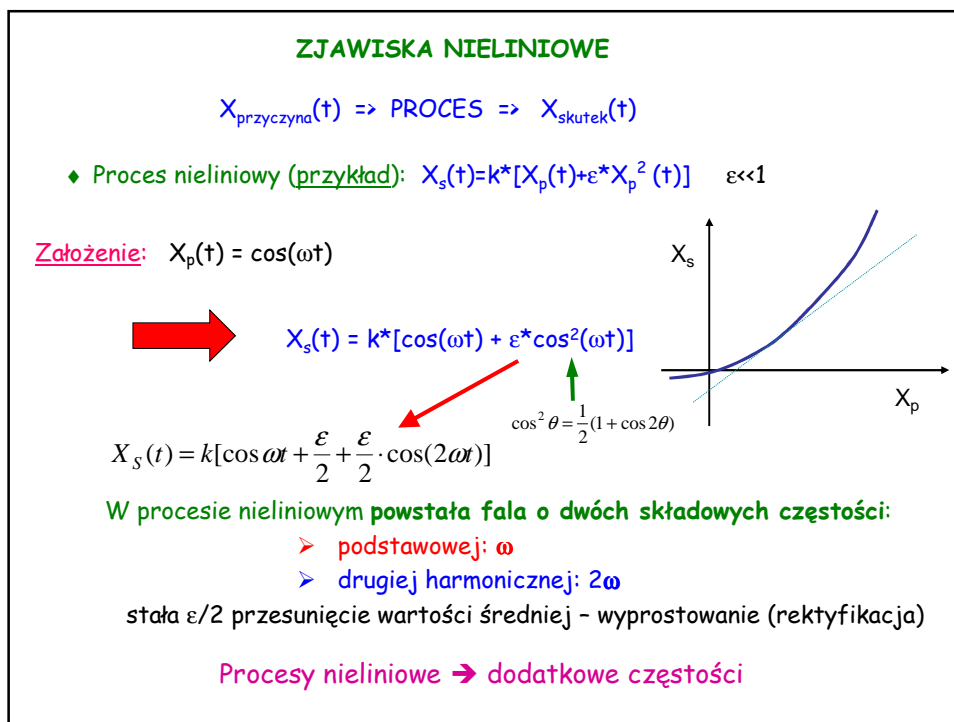
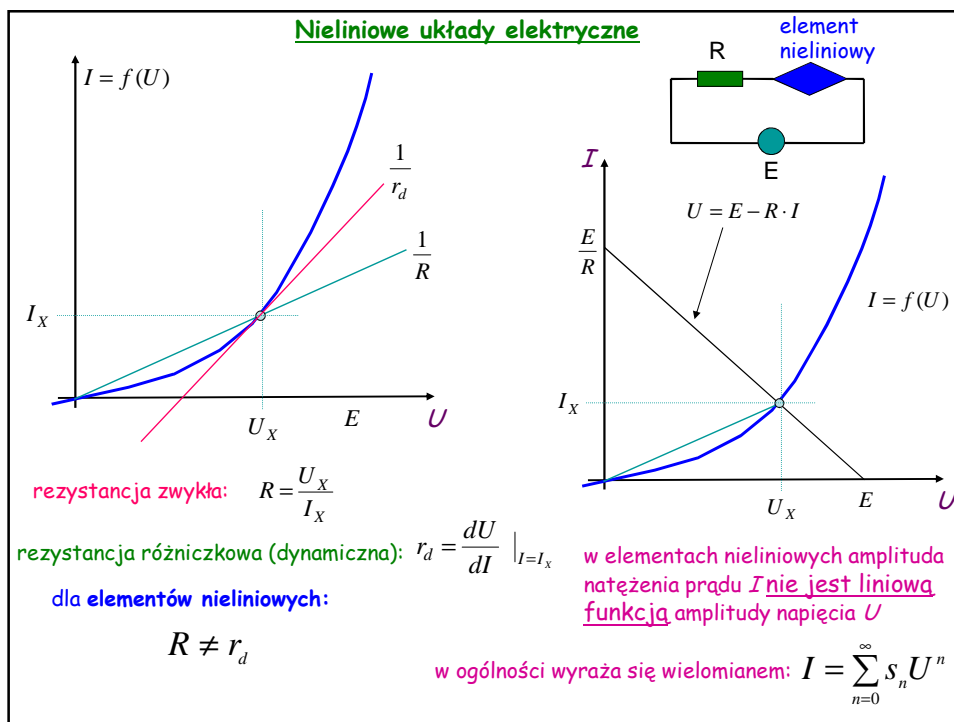
Większość elementów elektronicznych to **elementy nieliniowe**.  
Przykłady: diody, tranzystory, tyrystory, lampy elektronowe itd.

#### Liniowy



#### Nieliniowy





### Mieszanie częstotliwości w układzie nieliniowym (przykład)

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

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

$$X_s(t) = k \cdot X_p(t) + k \cdot \varepsilon (A \cos \omega_1 t + B \cos \omega_2 t)^2 =$$

$$= k \cdot X_p(t) + k \cdot \varepsilon (A^2 \cos^2 \omega_1 t + B^2 \cos^2 \omega_2 t + 2AB \cos \omega_1 t \cos \omega_2 t)$$

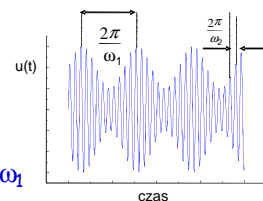
$$AB[\cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t]$$

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  $\omega_2$  znacznie większe od  $\omega_1$  (ale porównywalne)

⇒ modulacja amplitudy fali o częstotliwości  $\omega_2$  z częstotliwością  $\omega_1$



$$C(t) \propto \cos \omega_1 t \quad \leftarrow \text{funkcja modulacji amplitudy fali podstawowej}$$

### 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:  $C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \phi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n}$

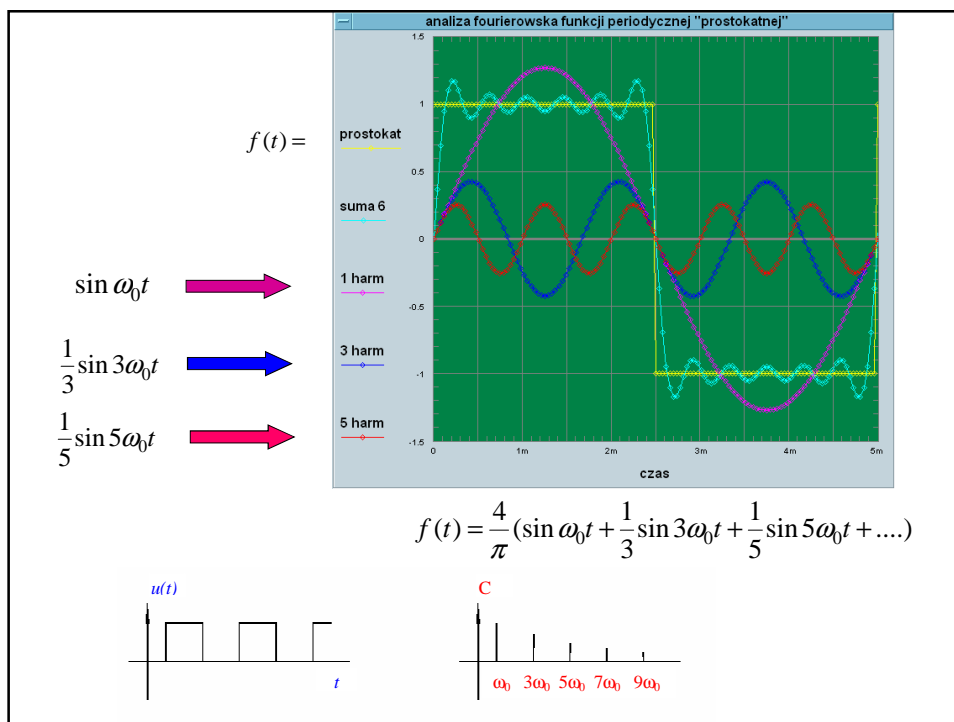
Każdą funkcję periodyczną możemy przedstawić w postaci:  $u(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n)$

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

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

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

*Funkcja okresowa charakteryzuje się widmem dyskretnym !!!*

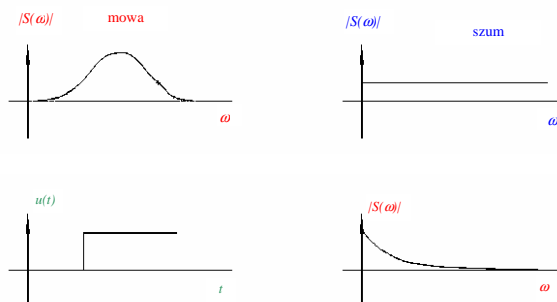


W przypadku, gdy funkcja  $u(t)$  nie jest okresowa, jej widmo ma charakter ciągły i opisywane jest funkcją:

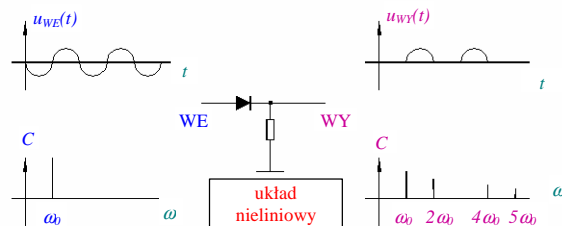
$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt = |S(\omega)| e^{-j\varphi(\omega)}$$

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

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



### 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.)

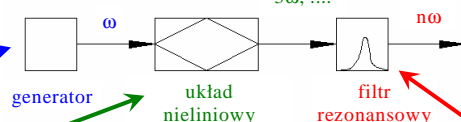
**UWAGA:** Układy liniowe (np. układy RLC) zmieniają widmo sygnału oddziałując na amplitudę i fazę poszczególnych składowych harmonicznich.

Jednak układy liniowe nie wzbogacają widma sygnału

### Zastosowania układów nieliniowych

#### POWIELACZ CZĘSTOŚCI

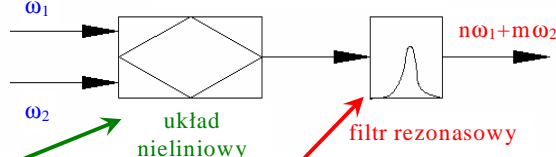
sygnał sinusoidalny



kombinacja harmoniczných sygnału wejściowego

wybór składowej o danej częstości  $n\omega$

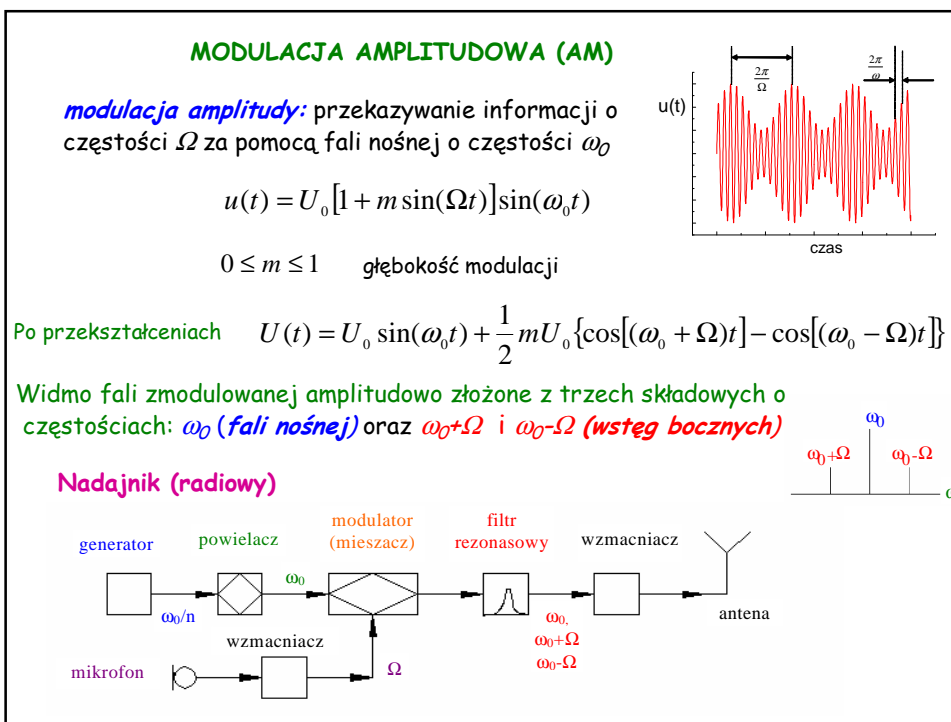
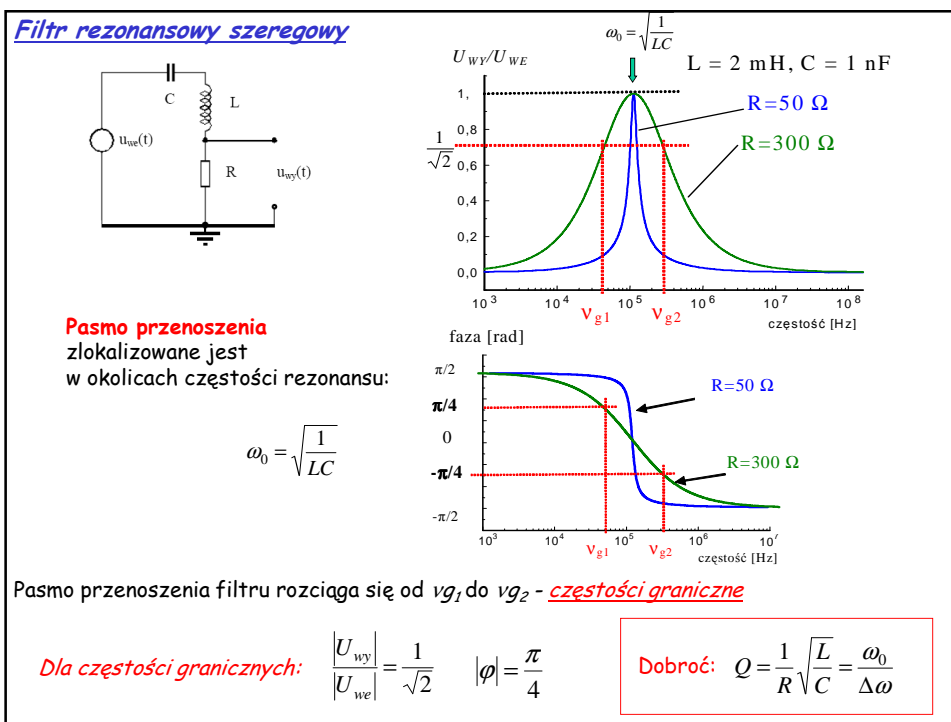
#### MIESZACZ CZĘSTOŚCI



składowe o częstościach interkombinacyjnych

wybór określonej składowej

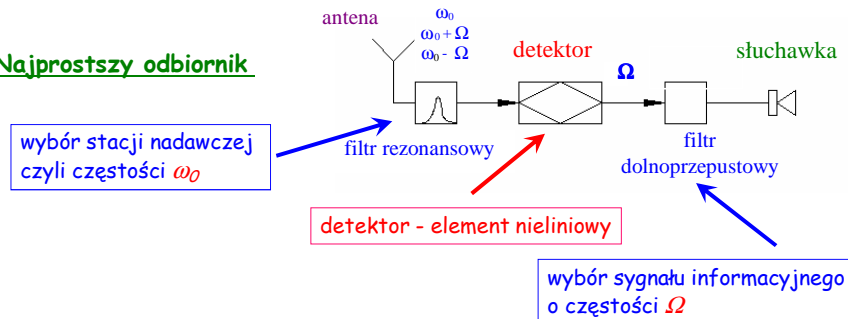
Zjawiska nieliniowe podstawą elektroniki kwantowej - techniki laserowej, radiotechniki



## ODBIORNIK: DEMODULACJA FALI ZMODULOWANEJ AMPLITUDOWO

Technika nieliniowa → odbiór informacji przekazywanej drogą radiową

### Najprostszy odbiornik



**W układzie nieliniowym:**

mieszanie składowych przebiegu zmodulowanego amplitudowo

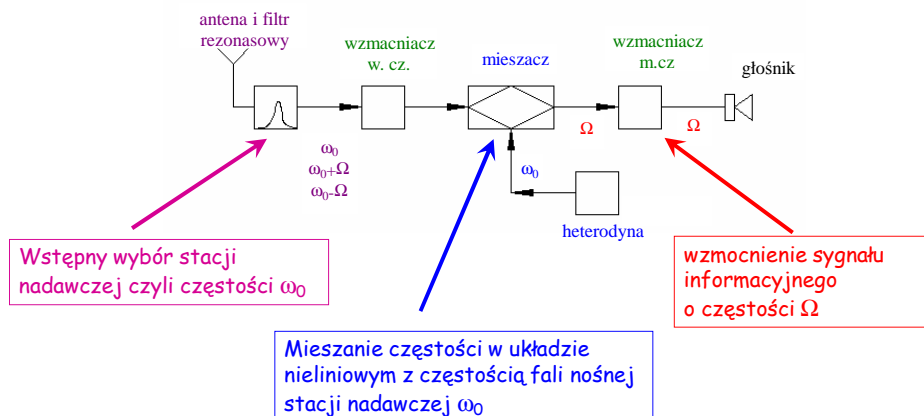
**w widmie wyjściowym:** składowa niskiej częstotści  $\Omega$  (informacja)

Odbiorniki detektorowe: wykorzystywane do odbioru tylko bardzo silnych stacji

### Odbiornik heterodynowy - poprawa czułości

Heterodyny - wewnętrzne generatory pracujące na częstotści odbieranej stacji

silna fala o częstotści  $\omega_0$  z heterodyny zapewnia większą amplitudę fali o częstotści  $\Omega$



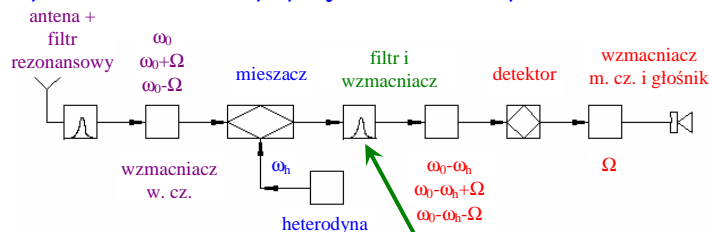


### Superheterodyna - poprawa selektywności odbiornika

**Odbiorniki superheterodynowe:** oscylatory wewnętrzne (heterodyny) pracują na częstotliwościach  $\omega_h$  takich, że:  $\omega_0 - \omega_h = \omega_p = \text{const}$

**Częstotliwości różnicowe  $\omega_p$**  (tzw. częstotliwości pośrednie) stałe, niezależne od odbieranej stacji

$\omega_p$  - międzynarodowe standardy specjalnie chronione przez zakłóceniami



czułość radioodbiornika  
rzędu mikrowoltów

selektywny filtr wąskopasmowy  $\omega_p = \omega_0 - \omega_h$   
układ o wysokiej dobroci

Zjawiska zachodzące w układach nieliniowych wykorzystuje się do przetwarzania fal elektromagnetycznych w zakresie od częstotliwości radiowych aż do widma światła

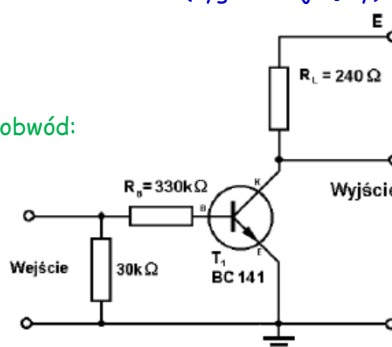
### Instrukcja do ćwiczenia

„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:

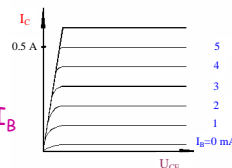


Napięcie  $U_{WE}$ :

- > 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

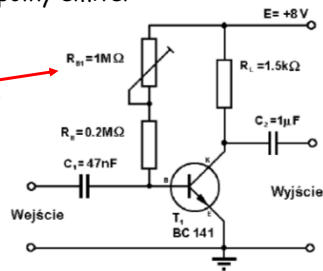
Zbudować wzmacniacz w układzie „wspólny emiter”:

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

→ optymalny punkt pracy tranzystora we wzmacniaczu

$U_{WE}$  - zmienny sygnał sterujący bazą

$U_{WY}$  - napięcie na kolektorze



Wyznaczenie charakterystyki amplitudowej wzmacniacza -  $U_{WY}(U_{WE})$

- ❑ Wejście układu: sygnał sinusoidalny o częstotliwości około 1000 Hz
- ❑ Mierzimy  $U_{WY}(U_{WE})$  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 częstotściowej wzmacniacza:

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

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

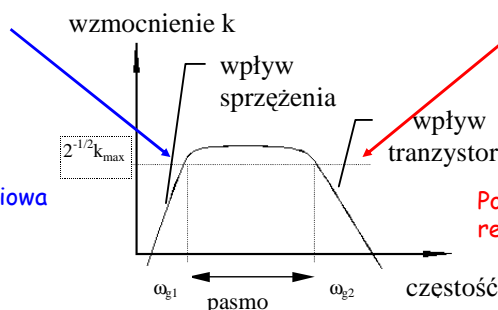
## ANALIZA

Wyznaczyć częstotliwości graniczne

Układ różniczkujący

$$\frac{U_{WY}}{U_{WE}} = \frac{j\omega}{1 + \frac{j\omega}{\omega_{g1}}}$$

Pojemność i rezystancja wejściowa wzmacniacza



Układ całkujący

$$\frac{U_{WY}}{U_{WE}} = \frac{1}{j\omega \omega_{g2}}$$

Pojemność i rezystancja wyjścia

Filtr górno- dolno-przepustowy:  $\omega_g = \frac{1}{RC}$

