

## WYKŁAD 6

### TRANZYSTORY POLOWE

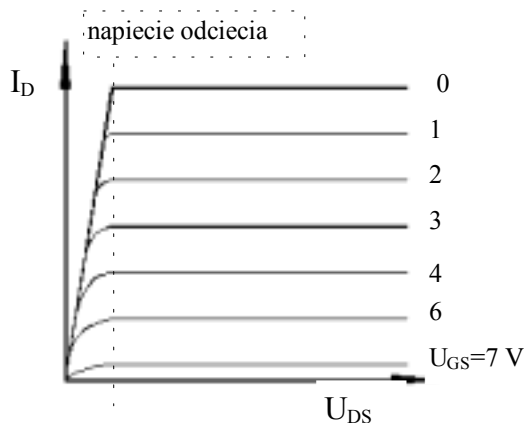
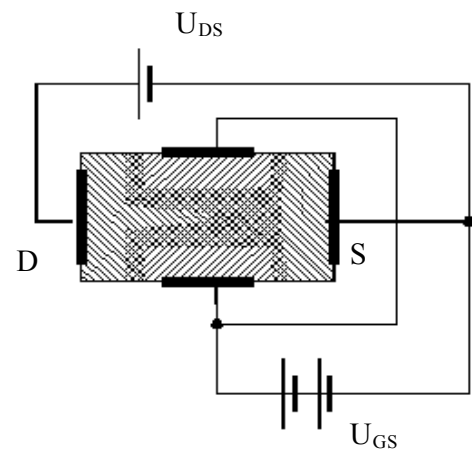
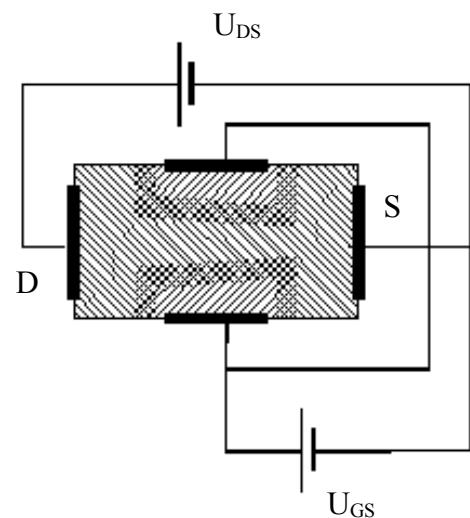
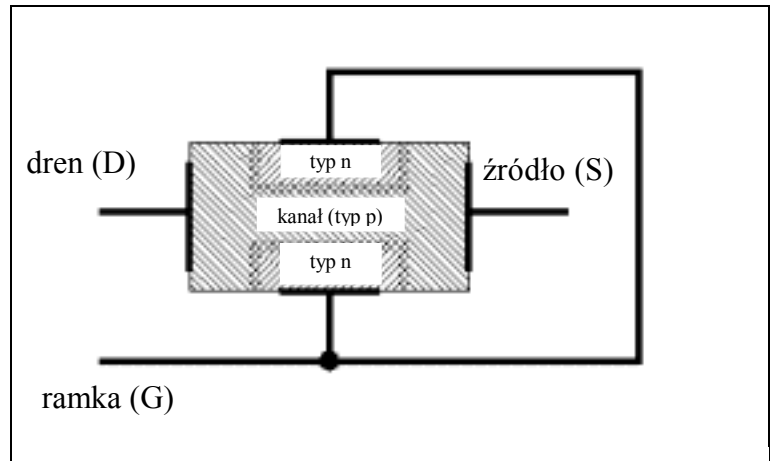
#### TRANZYSTORY POLOWE ZŁĄCZOWE (Junction Field Effect Transistors)

Tranzystor polowy złączowy zbudowany jest z półprzewodnika (w tym przypadku typu p), w który wdyfundowano dwa obszary bramki (w tym przypadku typu n). Między źródłem a drenem prąd może płynąć tylko kanałem, który ograniczony jest obszarami złącza z bramką, czyli strefami ładunku przestrzennego, o wysokiej oporności.

Jeżeli bramka zostanie spolaryzowana w kierunku zaporowym względem kanału, strefa ładunku przestrzennego poszerzy się, co spowoduje zwężenie kanału i zwiększenie rezystancji tranzystora między źródłem i drenem. W związku ze spadkiem napięcia wzdłuż kanału szerokość jego maleje wraz ze wzrostem odległości od drenu.

Gdy różnica potencjałów między kanałem i bramką jest dostatecznie duża, strefy ładunku przestrzennego obu obszarów bramki łączą się i kanał jest odcinany. Następuje stabilizacja prądu drenu  $I_D$ .

**Sterowanie tranzystora polowego złączowego (regulacja oporności jego kanału) odbywa się poprzez regulację napięcia zaporowego złącza bramka - kanał. Dzięki temu rezystancja wejściowa tego tranzystora sięga  $10^9 \Omega$ .**



## TRANZYSTORY POLOWE Z IZOLOWANĄ BRAMKĄ

Isolated **G**ate **F**ield **E**ffect **T**ransistors

**M**etal **O**xid **S**emiconductor **F**ield **E**ffect

**T**ransistors

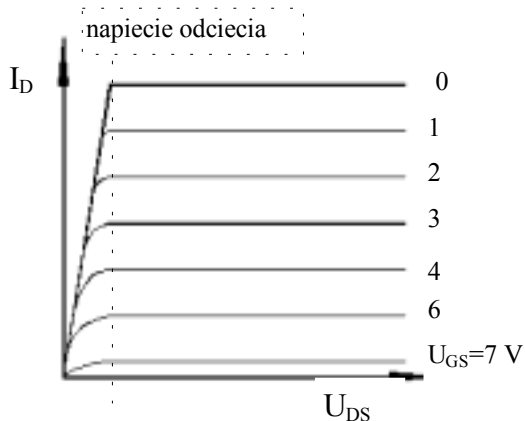
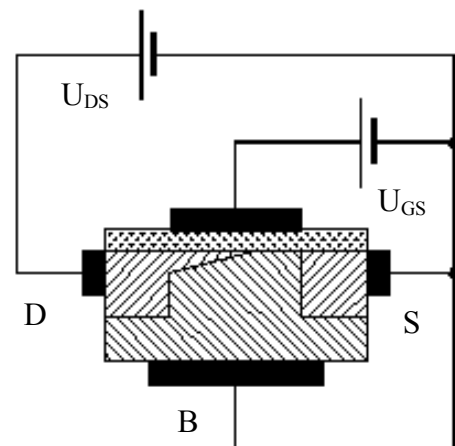
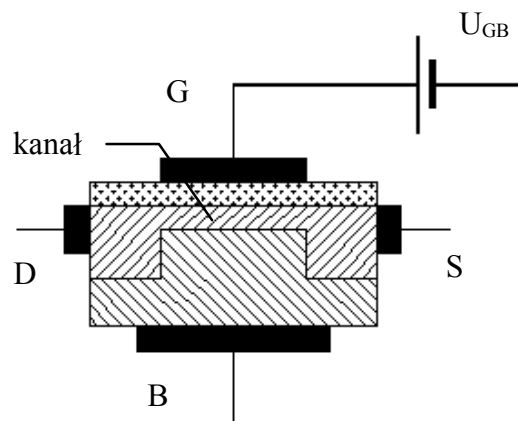
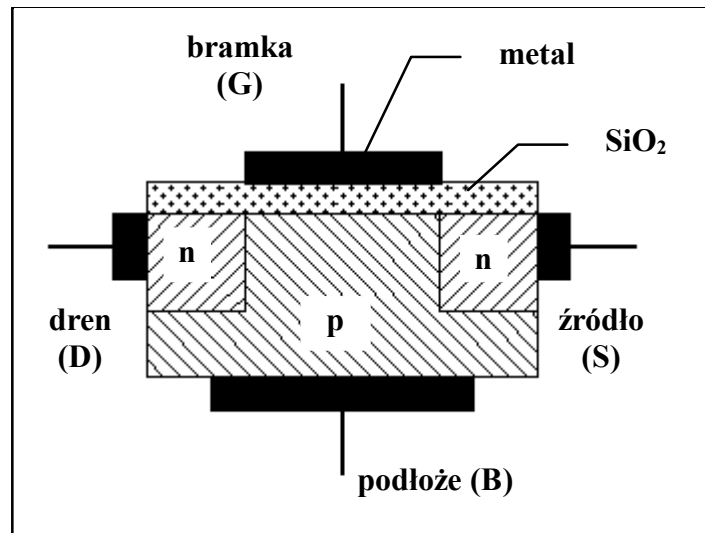
Tranzystor polowy z izolowaną bramką jest zbudowany z krzemu. Rozważymy przykład tranzystora zbudowany na podłożu (**B**ulk) typu n. W podłożu wdyfundowano dwa obszary typu p,

tworzące źródło (**S**ource) i dren (**D**rain). Powierzchnię tranzystora utleniono wytwarzając kilkumikronową izolującą warstwę  $\text{SiO}_2$ , na którą położono warstwę metalu, stanowiącą bramkę. **Opór bramki względem podłoża sięga  $10^{12}$ - $10^{14} \Omega$ .**

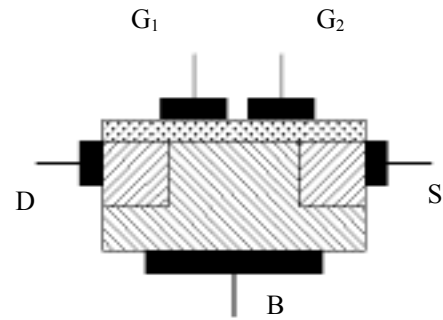
Przyłożenie napięcia między źródło i dren nie spowoduje przepływu prądu, ponieważ dla dowolnego kierunku tego napięcia jedno ze złącz : źródło-podłoże lub dren-podłoże, jest spolaryzowane zaporowo.

Spolaryzowanie bramki dodatnio względem podłoża powoduje zgromadzenie się tuż pod warstwą  $\text{SiO}_2$  mniejszościowych elektronów i odepchnięcie dziur. Lokalnie koncentracja elektronów przewyższa koncentrację dziur. Powstaje obszar o własnościach podobnych do półprzewodnika typu n. Dzięki temu znikają złącza pn między źródłem, kanałem i drenem. Wówczas prąd może przepłynąć w obwodzie drenu. Zmieniając napięcie bramki względem podłoża zmienia się szerokość kanału, a tym samym oporność między źródłem i drenem.

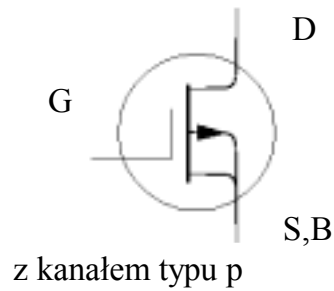
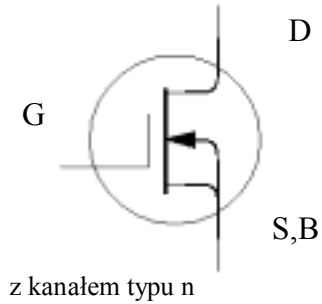
Przepływ dużego prądu przez kanał wywołuje spadek napięcia wzdłuż jego długości, co jest przyczyną zmiennej szerokości kanału. W pewnych warunkach kanał może zostać odcięty.



W technice MOS można wytwarzać tranzystory wielobramkowe.

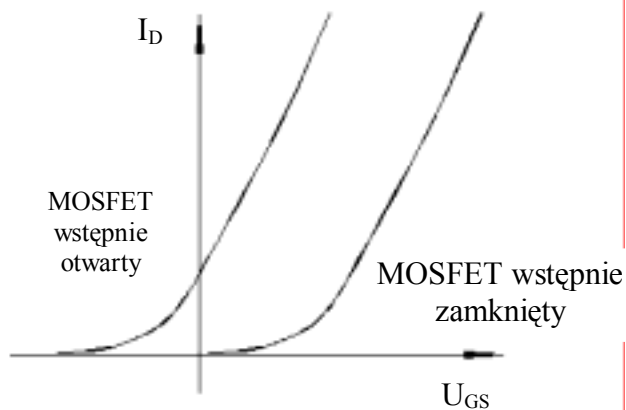
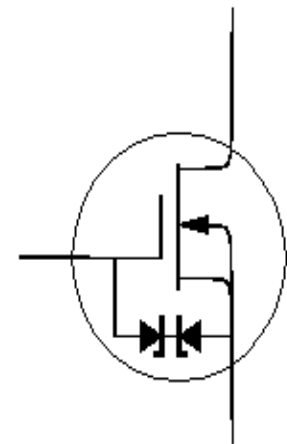


Symbole tranzystorów polowych :



Tranzystory typu MOSFET są bardzo delikatne. Izolacyjna warstwa  $\text{SiO}_2$  może łatwo ulec uszkodzeniu pod wpływem ładunków elektrostatycznych. Z tego powodu często zabezpiecza się je wbudowując diody Zenera :

Za pomocą odpowiednich zabiegów technologicznych można wykonywać tranzystory MOSFET posiadające kanał nawet wtedy, gdy bramka nie jest spolaryzowana. Tranzystor taki (tzw. wstępnie otwarty) można regulować dodatnimi i ujemnymi napięciami bramki względem podłoża.



1.

## Nieliniowe układy elektryczne.

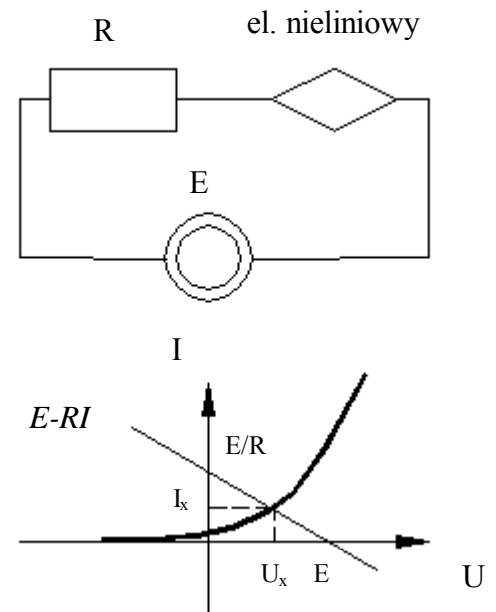
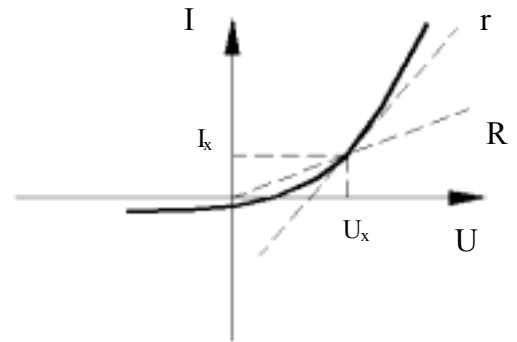
Większość elementów elektronicznych, poza rezystorami, kondensatorami i cewkami, to elementy nieliniowe. Oznacza to, że płynący przez nie prąd  $I$  nie jest liniową funkcją napięcia  $U$ , lecz w ogólności wyraża się szeregiem :  $I = \sum_{n=0}^{\infty} s_n U^n$ . Przykładami takich elementów są diody, tranzystory, tyrystory, lampy itd.

Dla każdego punktu charakterystyki nieliniowej o współrzędnych  $U_x, I_x$  (tzw. **punktu pracy**) można określić rezystancję na dwa sposoby :

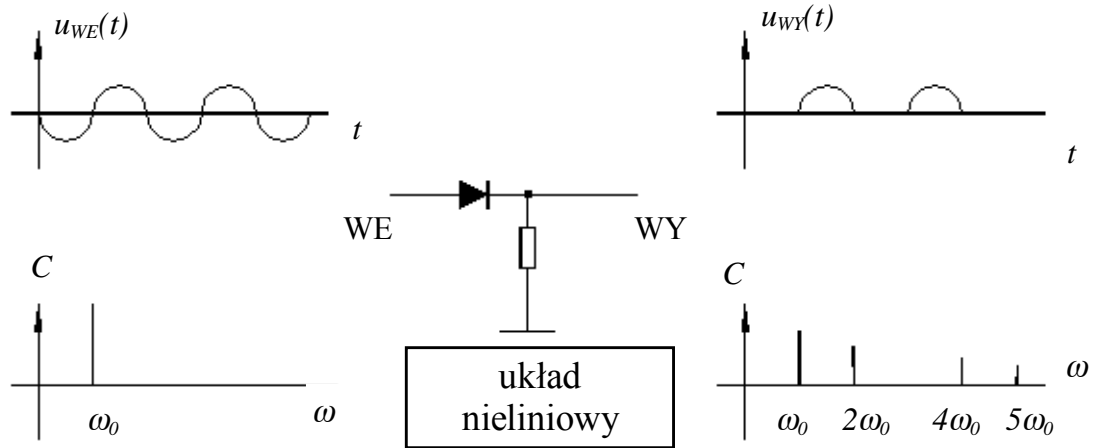
- jako rezystancję zwykłą :  $R = U_x / I_x$  ;
- jako rezystancję różniczkową :  $r = dU/dI \big|_{U_x}$  .

W przypadku elementu liniowego obie oporności są sobie równe. Dla elementów nieliniowych wielkości te na ogół różnią się, a w szczególności **rezystancja różniczkowa może przyjmować wartości ujemne**. Innymi obiektami elektronicznymi, które charakteryzują się ujemną rezystancją są wzmacniacze. Tak więc za pomocą niektórych elementów nieliniowych można wzmacniać sygnały.

Rozwiązywanie obwodów z rezystancją nieliniową jest trudne. Dlatego powszechnie stosuje się **metody wykreślne**. Jeżeli w obwodzie, w którym element nieliniowy jest szeregowo połączony z rezystancją  $R$ , znajduje się źródło siły elektromotorycznej  $E$  i płynie prąd  $I$ , to spadek napięcia na elemencie nieliniowym wynosi :  $U = E - RI$ . Równanie to opisuje **prosta obciążenia**<sup>1</sup>. Punkt przecięcia prostej obciążenia z charakterystyką elementu nieliniowego ( $U_x, I_x$ ) jest poszukiwanym **punktem pracy**. W ten sposób rozwiązany został jeden z najprostszych, a jednocześnie jeden z najbardziej typowych obwodów nieliniowych.



<sup>1</sup> Identyczną analizę stosowaliśmy już przy wyznaczaniu punktu pracy wzmacniacza tranzystorowego.



Jeżeli w obwodzie znajduje się źródło sygnału harmonicznego :  $E = A \cos(\omega_0 t + \phi)$ , to sygnał wyjściowy obwodu (np. spadek napięcia wytwarzany na rezystorze R) ma postać :

szeregu :  $U_{WY} = \sum_{n=0}^{\infty} D_n (A \cos(\omega_0 t + \phi))^n$ . Zgodnie z twierdzeniem Fouriera<sup>2</sup> można go

przedstawić jako :  $U_{WY} = \sum_{n=0}^{\infty} k(n\omega_0) A \cos(n\omega_0 t + \phi_n)$ .

**Jak widać widmo sygnału wyjściowego układu nieliniowego jest bogatsze niż widmo przebiegu wejściowego. W widmie sygnału wejściowego istnieje tylko składowa o częstotliwości  $\omega_0$ , podczas gdy w widmie sygnału wyjściowego pojawiają się składowe o częstotliwościach  $\omega_0, 2\omega_0, 3\omega_0$ , itd.**

<sup>2</sup> **Twierdzenie Fouriera** : jeżeli funkcja  $u(t)$  jest okresowa, o okresie T, to można ją

przedstawić w postaci szeregu :  $u(t) = a_0 + \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n)$ , gdzie :

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

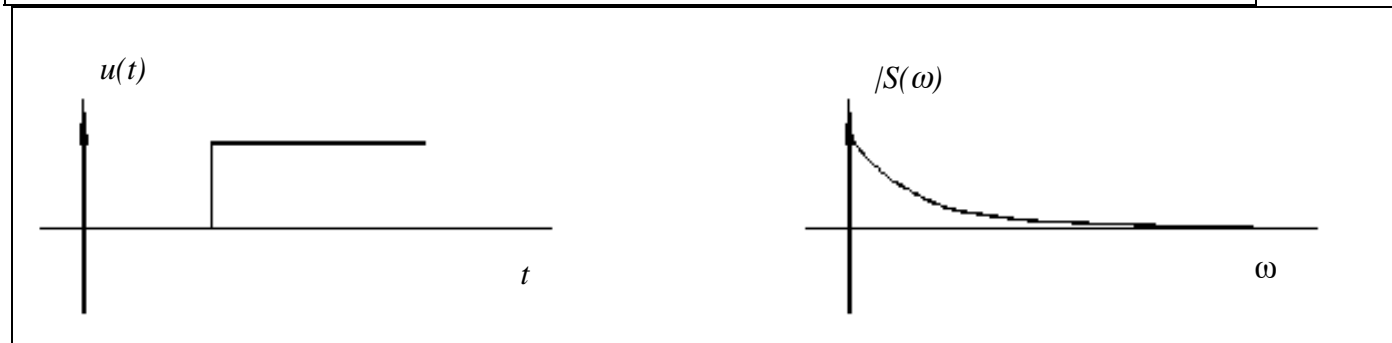
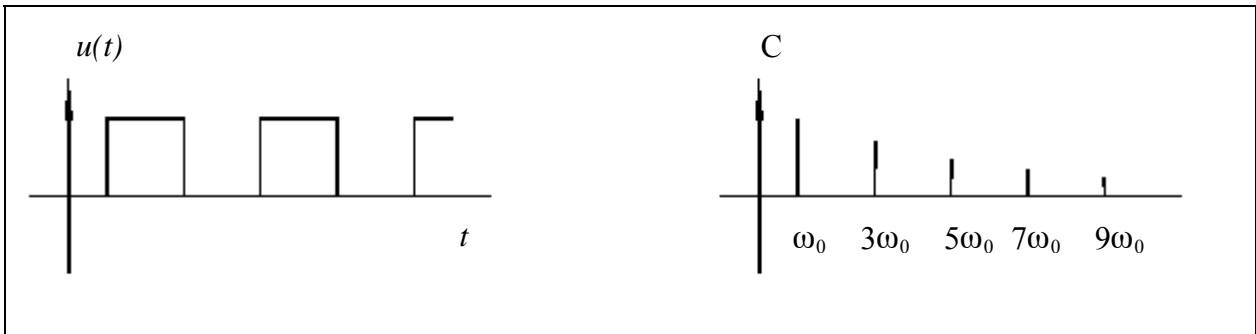
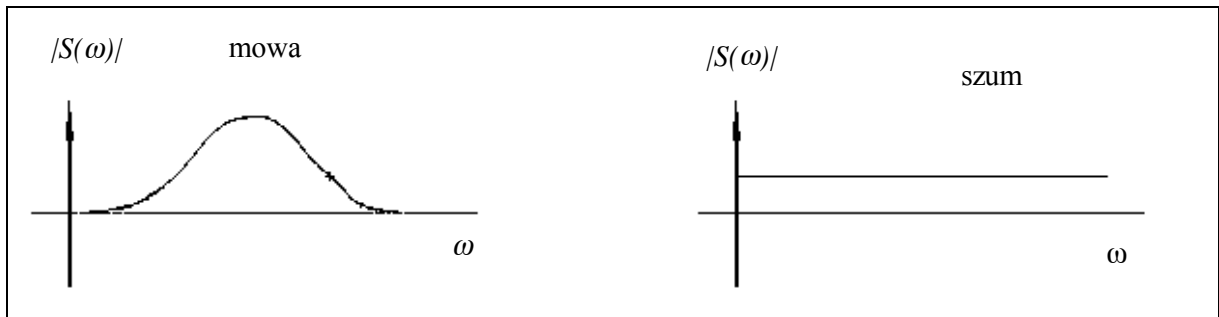
$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \phi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n} \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T}.$$

Zbiór trójek liczb  $(C_n, n\omega_0, \phi_n)$  jest nazywany **widmem** sygnału, a jego składowe o częstotliwościach  $n\omega_0$  - **harmonicznymi**.

**Funkcja okresowa charakteryzuje się widmem dyskretnym.** W przypadku, gdy funkcja  $u(t)$  nie jest okresowa, jej widmo ma charakter ciągły :

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt = |S(\omega)| e^{-j\varphi(\omega)}, \quad \text{przy czym} \quad : \quad |S(\omega)| = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)},$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{B(\omega)}{A(\omega)} \quad \text{i} \quad A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \cos(n\omega t) dt \quad B(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \sin(n\omega t) dt$$



Układy liniowe (np. układy RLC) również zmieniają widmo sygnału, oddziałując na amplitudę i fazę poszczególnych składowych harmoniczných. Jednak układy liniowe nie wzbogacają widma sygnału, to znaczy, nie powodują pojawienia się w nim nowych składowych harmoniczných.

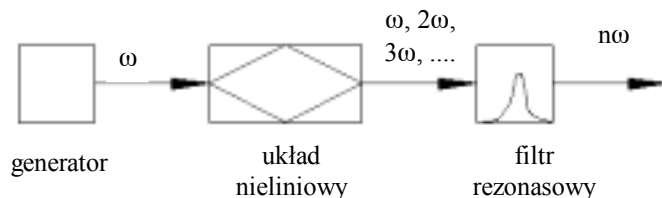
### Zastosowania układów nieliniowych.

#### POWIELACZ

#### CZĘSTOTLIWOŚCI.

Zjawisko wzbogacania widma sygnału wyjściowego w stosunku do sygnału wejściowego jest wykorzystywane do **powielania**

**częstotliwości.** Jeżeli na wejście układu nieliniowego dostarczony zostanie sygnał sinusoidalny, na wyjściu pojawi się sygnał będący kombinacją jego harmoniczných. Stosując filtr rezonansowy można wyselekcjonować składową o wybranej częstotliwości  $n\omega$ .

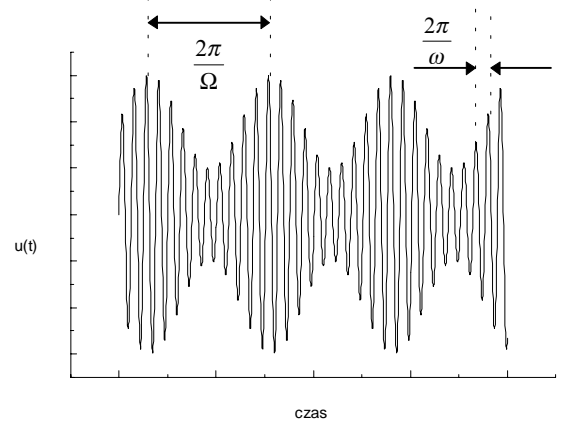
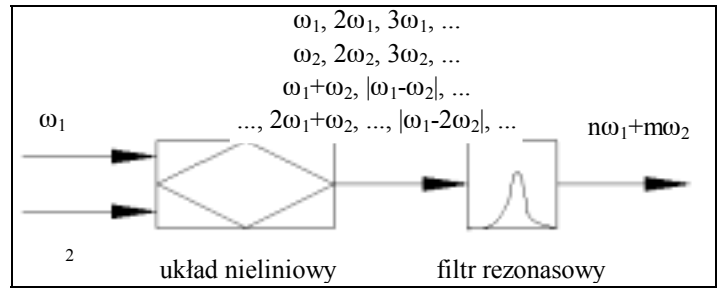


## MIESZACZ CZĘSTOTLIWOŚCI

Gdy na wejście układu nieliniowego skierowany zostanie sygnał składający się z dwu składowych sinusoidalnych o częstotliwości  $\omega_1$  i  $\omega_2$ , w widmie sygnału

wyjściowego poza harmonicznymi obydwu sygnałów pojawią się także składowe o częstotliwościach interkombinacyjnych. Zjawisko to jest nazywane **mieszaniami częstotliwości**. Przy użyciu filtrów można wyselekcjonować dowolną składową.

**Przetwarzanie częstotliwości** jest szeroko wykorzystywane w układach pomiarowych stosowanych między innymi w laboratoriach pomiarowych. Idee elektroniki nieliniowej obecnie stosowane również w **elektronice kwantowej** - tj. technice laserowej. Bez elektroniki nieliniowej nie może także obyć się **radiotechnika**.

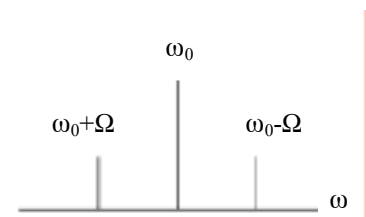


## MODULACJA AMPLITUDOWA (AM).

Jednym ze sposobów przekazywania informacji (o częstotliwości  $\Omega$ ) za pomocą fali radiowej (o częstotliwości  $\omega_0$ ) jest **modulacja amplitudy**:  $u(t) = U_0 [1 + m \sin(\Omega t)] \sin(\omega_0 t)$ ,

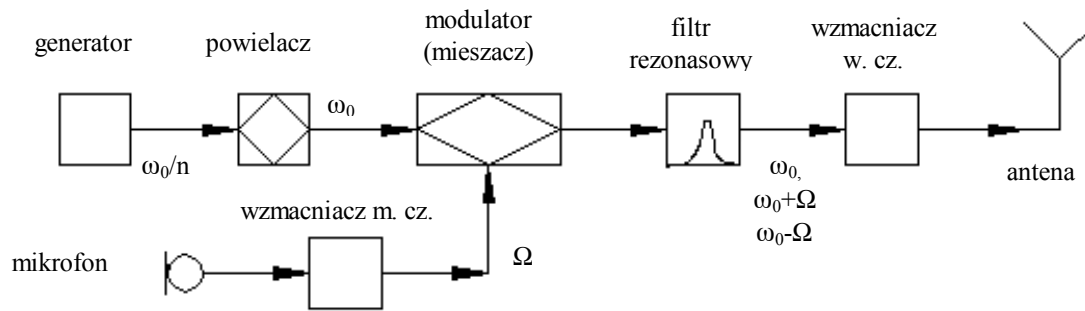
gdzie  $0 \leq m \leq 1$  jest nazywane **głębokością modulacji**. Za pomocą elementarnych przekształceń trygonometrycznych wzór ten przedstawić w postaci:

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



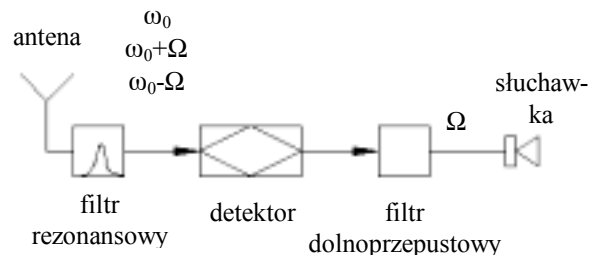
Widać stąd, że widmo fali zmodulowanej amplitudowo składa się z trzech składowych o

częstotliwościach :  $\omega_0$ , (fali nośnej) oraz  $\omega_0 + \Omega$  i  $\omega_0 - \Omega$  (wstęg bocznych). Nadajnik:

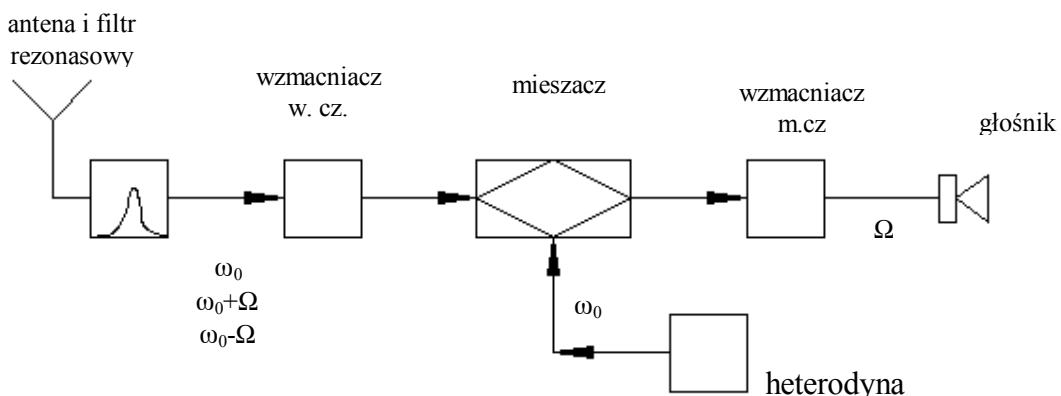


### DEMODULACJA FALI ZMODULOWANEJ AMPLITUDOWO.

Technika nieliniowa jest również niezbędna przy odbiorze informacji przekazywanej drogą radiową. Najprostszy odbiornik składa się z anteny, filtra rezonansowego (do wyboru stacji nadawczej czyli częstotliwości  $\omega_0$ ), elementu nieliniowego zwanego detektorem i filtra niskiej częstotliwości selekcyjnego sygnał informacyjny o częstotliwości  $\Omega$ . W układzie nieliniowym następuje mieszanie składowych przebiegu zmodulowanego amplitudowo. Dzięki temu w widmie wyjściowym otrzymuje się składowa niskiej częstotliwości, która jest odtwarzana przez słuchawkę.



Odbiorniki detektorowe mogą być wykorzystywane tylko do odbioru bardzo silnych stacji. Aby poprawić czułość radioodbiorników wmontowywano do nich **heterodyny**, czyli

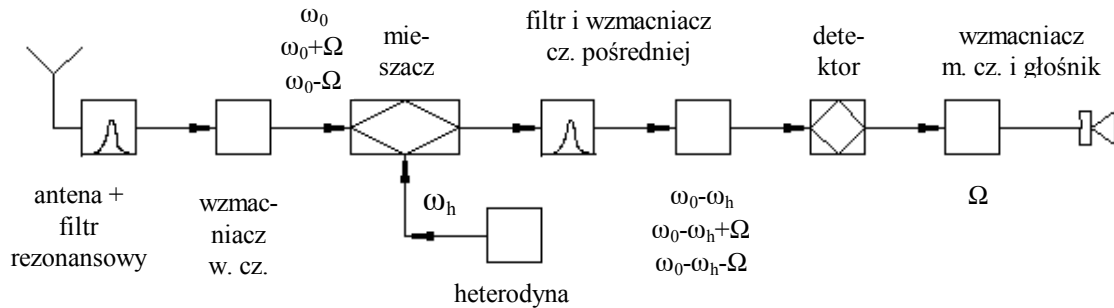


wewnętrzne generatory pracujące na częstotliwości odbieranej stacji.

Dzięki temu, że do mieszania wykorzystuje się silną falę o częstotliwości  $\omega_0$ , otrzymuje się większą amplitudę fali o częstotliwości  $\Omega$ , którą po wzmocnieniu można odsłuchać przez głośnik.



Najdoskonalszymi odbiornikami **odbiorniki superheterodynowe**. Ich oscylatory wewnętrzne (heterodyny) pracują na częstotliwości  $\omega_h$  takiej, że :  $\omega_0 - \omega_h = \omega_p = const.$  **Częstotliwości różnicowe  $\omega_p$  (tzw. częstotliwości pośrednie)** stałe, niezależne od odbieranej stacji, stanowią międzynarodowe standardy i są przez służby radiowe specjalnie chronione przez zakłóceniami.



Za pomocą mieszacza sygnał radiowy jest przesuwany na skali częstości w rejon **częstotliwości pośredniej**  $\omega_0 - \omega_h$ , , gdzie podlega wąskopasmowej filtracji, wzmocnieniu, a następnie zwykłej detekcji. Dzięki temu uzyskuje się wysoką selektywność, co pozwala otrzymywać czułości radioodbiorników rzędu mikrowoltów.

Zjawiska zachodzące w układach nieliniowych wykorzystuje się powszechnie do przetwarzania fal elektromagnetycznych w zakresie częstotliwości radiowych, mikrofal, aż do promieniowania świetlnego

## **Kolokwium końcowe - pytania**

1. Źródło napięciowe i prądowe
2. Prawo Ohma i prawa Kirchhoffa.
3. Zasada Thevenina i zasada Nortona
4. Impedancja: rezystancja i reaktancja
5. Łączenie impedancji - impedancje zastępcze
6. Dzielnik napięcia
7. Układy rezonansowe, zjawisko rezonansu, dobroć i częstotliwość rezonansowa.
8. Układ całkujący i różniczkujący
9. Częstotliwość graniczna. Pasma przenoszenia.
10. Pasożytnicze dzielniki napięcia powstające przy łączeniu aparatury elektrycznej.
11. Pasożytnicze filtry powstające przy łączeniu aparatury elektrycznej.
12. Impedancja falowa linii przesyłowych. Odbicia sygnałów w liniach.
13. Fizyczne podstawy przewodnictwa w ciałach stałych.
14. Półprzewodniki samoistne i domieszkowane
15. Fizyczne podstawy działania diody półprzewodnikowej. Napięcie przewodzenia.
16. Prostowniki jedno- i dwupołówkowe.
17. Diody Zenera, diody elektroluminescencyjne, fotodiody.
18. Działanie tranzystora bipolarnego
19. Działanie tranzystora polowego złączowego
20. Działanie tranzystora polowego z izolowaną bramką
21. Wzmacniacze tranzystorowe
22. Częstotliwość graniczna tranzystora
23. Punkt pracy tranzystora we wzmacniaczu
24. Układy nieliniowe. Rezystancja zwykła i rezystancja dynamiczna
25. Co to jest widmo sygnału
26. Powielanie i sumowanie częstotliwości
27. Modulacja i detekcja fali zmodulowanej amplitudowo.
28. Zasilacz, woltomierz, amperomierz, oscyloskop, generator.

**Notatki własne**