

**Zakład Napędów Wieloźródłowych  
Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich PW  
Laboratorium Elektrotechniki i Elektroniki**

**Ćwiczenie E2 - instrukcja**

**Wzmacniacze napięciowe, sprzężenia zwrotne,  
układy generacyjne**

Data wykonania ćwiczenia.....  
Data oddania sprawozdania.....

**Zespół wykonujący ćwiczenie:**

	<i>Nazwisko i imię</i>	<i>ocena końcowa</i>
1.	.....	.....
2.	.....	.....
3.	.....	.....
4.	.....	.....
5.	.....	.....
6.	.....	.....
7.	.....	.....
8.	.....	.....
9.	.....	.....
10.	.....	.....

**Wydział SiMR PW**

**Rok ak. 20.../20...**

**Semestr.....**

**Grupa.....**

**Warszawa 2007r.**

# Spis treści

<b>1. CEL I ZAKRES ĆWICZENIA.</b> .....	<b>3</b>
<b>2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE: WZMACNIACZE, SPRZĘŻENIE ZWROTNE</b> .....	<b>3</b>
2.1 WZMACNIACZE. ....	3
2.2 SPRZĘŻENIE ZWROTNE.....	7
<b>3.WIADOMOŚCI TEORETYCZNE: UKŁADY GENERACYJNE Z DODATNIM SPRZĘŻENIEM     ZWROTNYM.....</b>	<b>7</b>
3.1 Warunek generacji drgań. ....	7
3.2. Interpretacja geometryczna amplitudowego warunku generacji. ....	8
3.3. Bilans energetyczny w układzie generacyjnym. ....	9
3.4. Podstawowe rodzaje generatorów. ....	9
3.5. Drgania w układach mechanicznych. ....	10
3.6. Zasady odwzorowania elektromechanicznego. ....	11
<b>4. LITERATURA POMOCNICZA.....</b>	<b>13</b>

## 1. Cel i zakres ćwiczenia.

Ćwiczenie ma na celu poznanie podstawowych układów wzmacniających prądu przemiennego, charakterystyk tych układów oraz ich zastosowania. Przybliży ono również podstawową analizę ujemnego sprzężenia zwrotnego i jego wpływu na pracę wzmacniacza oraz umożliwi:

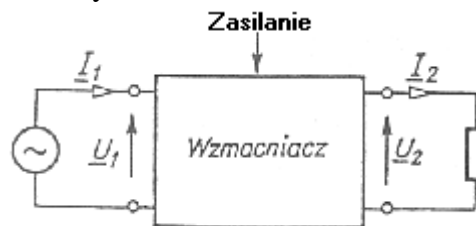
- poznanie zasad generacji drgań w układzie z zewnętrzną pętlą sprzężenia zwrotnego,
- stwierdzenie roli zespolonego warunku generacji w procesie wzbudzenia się układów sprzężysto – bezwładnościowych niedotłumionych.

## 2. Wiadomości teoretyczne - wzmacniacze, sprzężenie zwrotne.

### 2.1 Wzmacniacze elektryczne.

Wzmacniaczem elektrycznym nazywa się układ, w którym sygnał wejściowy w postaci napięcia  $u_1$  lub prądu  $i_1$  o małej mocy  $p_1$  powoduje powstanie na jego wyjściu sygnału  $u_2 = k_u u_1; i_2 = k_i i_1$  o znacznie większej mocy  $p_2 = k_p p_1$ .

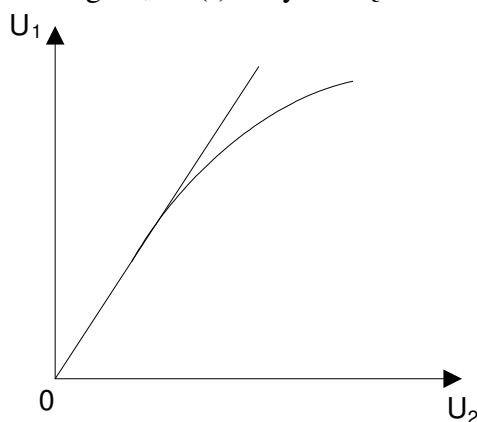
Wzmocnienie to uzyskuje się kosztem mocy doprowadzonej z zewnętrznego źródła zasilającego wzmacniacz. Współczynniki  $k_u, k_i, k_p$  nazywają się współczynnikami wzmocnienia. Wzmacniacze dzielą się na: napięciowe, prądowe i mocy (zarówno prądu stałego jak i przemiennego). Te ostatnie, w zależności od zakresu wzmacnianych częstotliwości, dzielą się na: akustyczne, szerokopasmowe i selektywne. Podstawowe charakterystyki wzmacniacza prądu przemiennego zdefiniowane są przy założeniu, że sygnał wejściowy ma charakter sinusoidalny.



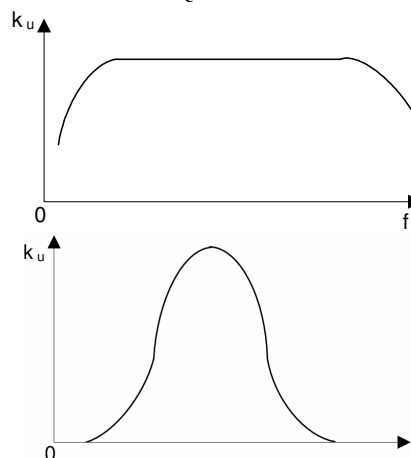
Rys. 1. Podstawowy schemat wzmacniacza sterowanego napięciem sinusoidalnym

Charakterystyką dynamiczną wzmacniacza napięciowego nazywa się zależność wartości napięcia wyjściowego  $u_2$  do napięcia wejściowego  $u_1$ . Charakterystyka ta powinna być liniowa, lub wykorzystywana w zakresie liniowym, to jest gdy wartość współczynnika wzmocnienia

$k_u$  pozostaje stała. Zależność współczynnika wzmocnienia od częstotliwości sygnału wejściowego  $k_u = f(f)$  nazywa się charakterystyką częstotliwościową wzmacniacza.



Rys. 2. Ch-ka dynamiczna

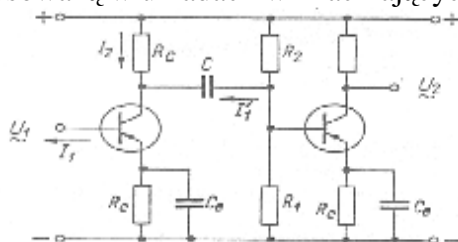


Ch-ki częstotliwościowe pasmowa, selektywno-rezonansowa

We wszystkich rodzajach wzmacniaczy wykorzystuje się zdolność złącz p-n-p lub n-p-n, o odpowiednio spolaryzowanych elektrodach, do wzmacniania prądu lub napięcia. Jako element trójelektrodowy tranzystor może pracować wykorzystując jedną z nich jako wspólną w układzie czwórnika. Istnieją trzy konfiguracje pracy tranzystora, noszące nazwy: wspólna baza –OB., wspólny emiter -OE, wspólny kolektor -OC. W każdej z tych konfiguracji tranzystor wykazuje odmienne właściwości i parametry.

Ze względu na możliwości wzmocnienia projektuje się wzmacniacze jedno i wielostopniowe o charakterze sprzężenia poszczególnych stopni: rezystancyjno pojemnościowym, transformatorowym, dławikowym.

Podstawową konfiguracją stosowaną w układach wzmacniających jest układ OE.

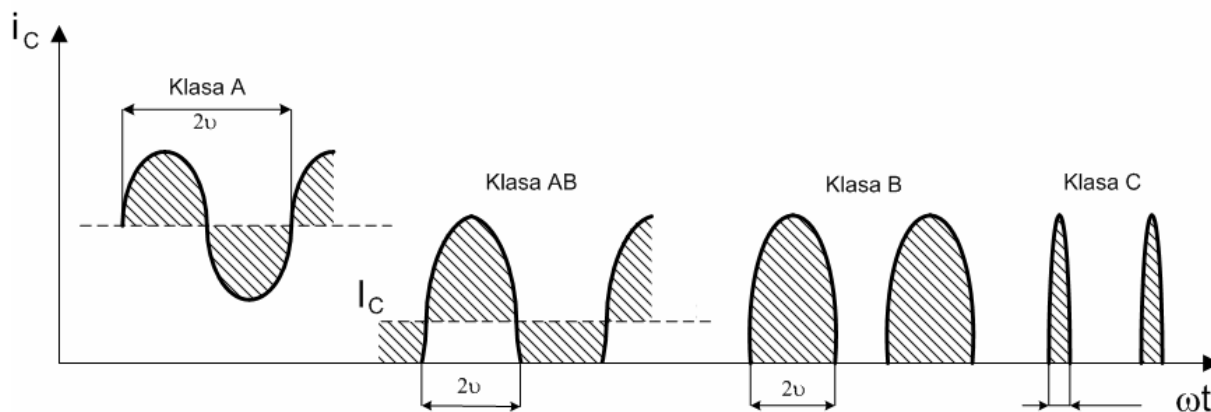


**Rys. 3. Schemat dwustopniowego wzmacniacza ze sprzężeniem rezystancyjno pojemnościowym.**

Schemat ten zawiera elementy sprzęgające (C), ustalające odpowiednią polaryzację elektrod ( $R_c$ ,  $R_e$ ) oraz stabilizujące punkt pracy ( $C_e$ ). Wstępna polaryzacja elektrod – ustalenie punktu pracy ma zasadniczy wpływ na wzmacniany sygnał. Po ustaleniu punktu pracy (składowe stałe) należy analizować charakter wzmacniacza dla składowych zmiennych. Kondensatory sprzęgające mają pojemności dostatecznie duże, co dla sygnału zmiennego stanowi reaktancję bliską zeru, a napięcie stałe (składowa stała) nie polaryzuje elektrod stopnia następnego, gdyż kondensator dla prądu stałego ma reaktancję bliską nieskończoności.

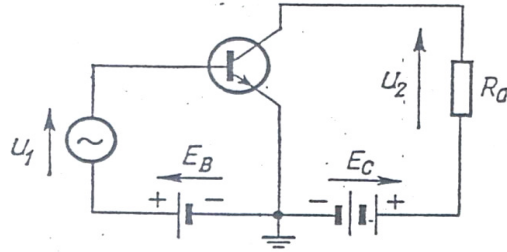
Działanie wzmacniacza przy określonych warunkach przepływu prądu kolektora w jednym okresie zmian napięcia sygnału opisuje klasa pracy. Czas, w którym tranzystor znajduje się w stanie aktywnym, określa się wartością kąta przepływu.

We wzmacniaczu klasy A prąd płynie bez przerwy przez cały okres napięcia sygnału  $i_2 v = 2\pi$ . We wzmacniaczu klasy AB  $\pi < 2v < 2\pi$ . W klasie B prąd kolektora płynie tylko przez pół okresu  $2v = \pi$ , natomiast wzmacniacz klasy C charakteryzuje się kątem przepływu  $2v < \pi$ .



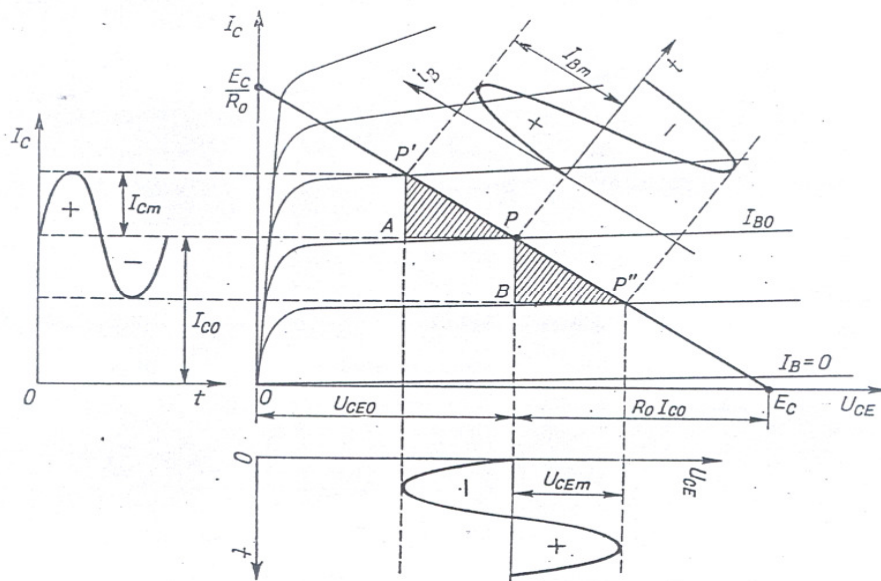
**Rys. 4. Prądy wyjściowe dla poszczególnych klas wzmacniacza.**

Klasa pracy wzmacniacza wiąże się ściśle z wyborem punktu pracy. Do analizy wyboru punktu pracy wybrano wzmacniacz o tranzystorze w układzie OE i klasie A.



Rys. 5. Wzmacniacz OE.

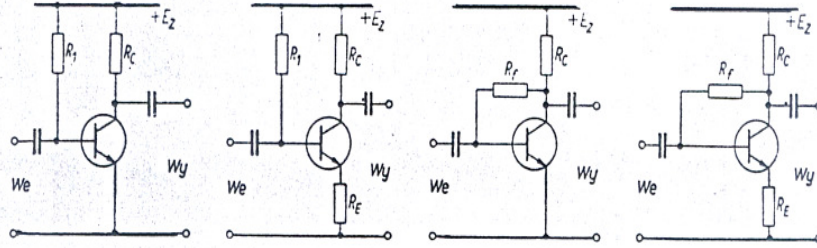
W obwodzie kolektora jest rezystancja obciążenia  $R_0$  i źródło zasilające  $E_c$ . Na rodzinie charakterystyk kolektorowych tranzystora  $I_c = f(U_{ce})$  należy nanieść charakterystykę rezystancji  $R_0$ , zwaną charakterystyką roboczą wzmacniacza. Charakterystyka ta przechodzi przez punkt osi odciętych, odpowiadający wartości napięcia  $E_c$  oraz przez punkt osi rzędnych, odpowiadający wartości prądu  $E_c/R_0$ .



Rys. 6. Analiza graficzna wzmacniacza w układzie OE.

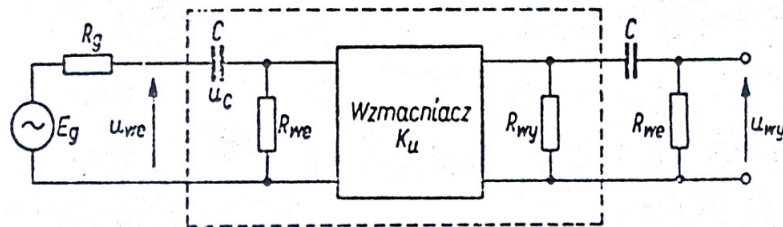
Przy braku sygnału wejściowego ( $u_1=0$ ) w obwodzie bazy płynie prąd stały  $I_{b0}$  (składowa stała). Ustala się w tranzystorze stan początkowy określony przez punkt P. Punkt ten nazywa się punktem pracy tranzystora. Prąd w obwodzie kolektora ma w tym przypadku stałą wartość  $I_{c0}$  i nazywa się składową stałą prądu kolektorowego. Składowa ta tworzy w obwodzie kolektorowym dwa spadki napięcia: spadek napięcia na rezystancji  $R_0 = R_0 I_{c0}$  i spadek napięcia na tranzystorze  $U_{ce0}$ , zwany składową stałą napięcia kolektorowego. Napięcie zasilania  $E_c = R_0 I_{c0} + U_{ce0}$

Jeżeli pojawi się sygnał wejściowy w postaci napięcia przemiennego  $U_1$ , które w obwodzie bazy wywoła prąd przemienny o amplitudzie  $I_{bm}$ , to punkt będzie się przesuwal cyklicznie po charakterystyce roboczej od P' do P''. Spowoduje to powstanie składowej zmiennej prądu kolektora  $i_c$ , która wywoła zmienny spadek napięcia na rezystancji obciążenia  $R_0$   $i_c$ , a także zmienne napięcia kolektora  $u_{ce} = R_0 i_c$ . Otrzymana składowa zmienna napięcia kolektorowego stanowi sygnał wyjściowy wzmacniacza. Dodatkim przyrostom napięcia wejściowego towarzyszą dodatnie przyrosty prądu bazy i prądu kolektora oraz ujemne przyrosty napięcia kolektorowego, zatem pojedynczy stopień wzmacniacza w układzie OE odwraca fazę napięcia wejściowego. W praktyce nie stosuje się wieloźródłowego zasilania elektrod, lecz różne rozwiązania potencjometryczne.



Rys. 7. Metody potencjometrycznego zasilania tranzystora.

Przedstawiona analiza pracy wzmacniacza przez wprowadzenie do obwodów tranzystorowych elementów reaktancyjnych i rezystancyjnych, włączonych do obwodu szeregowo bądź równolegle, określa również zakres przenoszonych częstotliwości. W zakresie małych częstotliwości o przebiegu charakterystyki decydują wartości pojemności kondensatorów sprzęgających oraz pojemności bocznikujące rezystor  $R_e$ .



Rys. 8. Układ zastępczy wzmacniacza w zakresie małych częstotliwości.

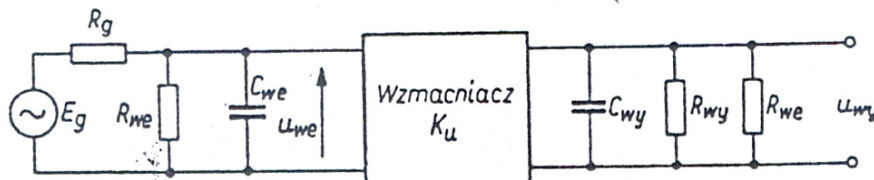
Wpływ pojemności kondensatora  $C_e$  przejawia się w ten sposób, że dla stosunkowo dużych częstotliwości sygnał z emitera zwierany jest przez ten kondensator, co likwiduje jego wpływ na stabilizację punktu pracy. Pojemność sprzęgająca przedstawia sobą pewną reaktancję, która rośnie, gdy częstotliwość sygnału maleje. Część sygnału wejściowego zostaje stracona przez spadek napięcia na kondensatorze. Elementy te określają dolną wartość częstotliwości:

$f_d = \frac{1}{2\pi C(R_{we} + R_g)}$  odpowiadającą spadkowi wzmocnienia (wyrażonemu w skali

geometrycznej  $q = \frac{|U_c|}{|E_g|} = \frac{1}{\sqrt{2}}$  wzmacnianego sygnału i odpowiada spadkowi wzmocnienia o

3 Db.

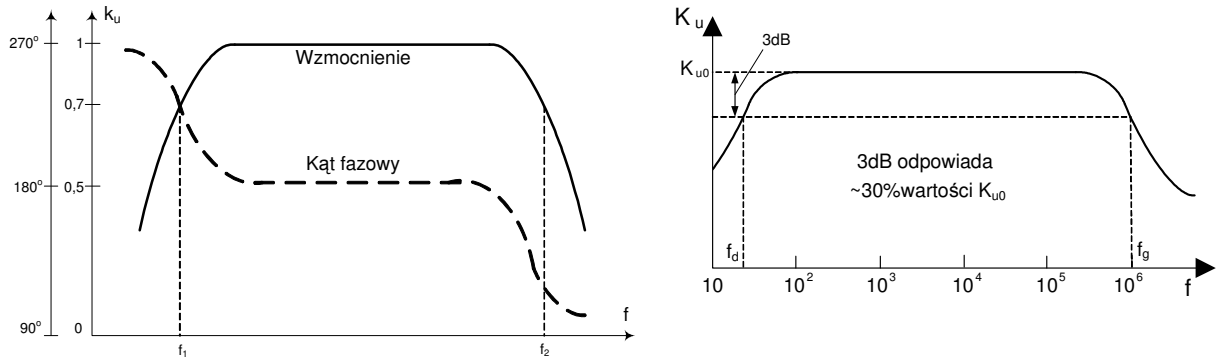
W zakresie dużych częstotliwości w układzie zastępczym można pominąć kondensatory sprzęgające, natomiast trzeba uwzględnić kondensatory bocznikujące  $C_{we}$  i  $C_{wy}$ .



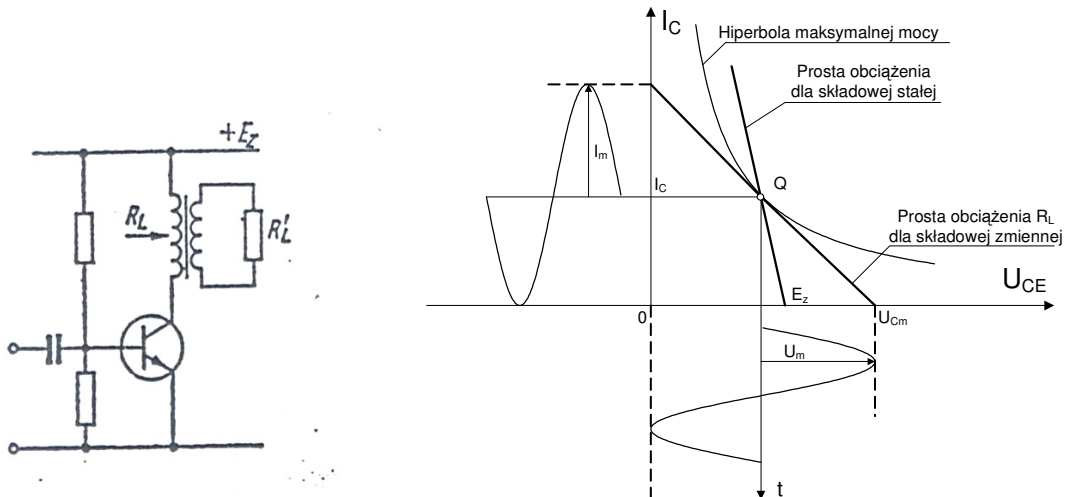
Rys. 9. Układ zastępczy wzmacniacza w zakresie dużych częstotliwości

Pojemności  $C_{we}$  i  $C_{wy}$  nie są elementami składowymi układu, lecz reprezentują wypadkowe wartości pojemności wejściowej lub wyjściowej układu i montażu. Górną częstotliwość

wzmacniacza można, więc określić jako:  $f_g = \frac{1}{2\pi C_{we} R_r}$  gdzie  $R_r = \frac{R_g R_{we}}{R_{we} + R_g}$



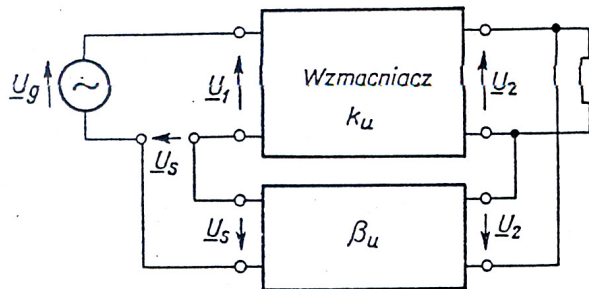
Rys. 10. Charakterystyka częstotliwościowa i fazowa wzmacniacza.



Rys. 11. Wzmacniacz ze sprzężeniem transformatorowym – wybór punktu pracy.

## 2.2 Sprzężenie zwrotne.

Sprzężenie zwrotne jest to oddziaływanie sygnału wyjściowego (lub jego części) na obwód wejściowy w celu poprawienia właściwości wzmacniacza; głównie stałości wzmocnienia, liniowości charakterystyki dynamicznej i zmniejszenia wpływu zmian temperatury. Rozróżnia się sprzężenia: napięciowe i prądowe, uwzględniając fazę podawanego na wejście sygnału, ujemne i dodatnie (podstawa układów generacyjnych).



Rys. 12. Wzmacniacz ze sprzężeniem zwrotnym

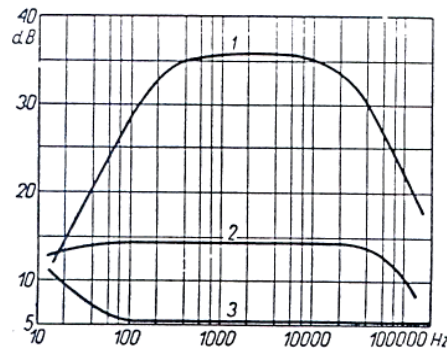
Obwód sprzężenia zwrotnego wprowadza do obwodu wejściowego wzmacniacza o współczynniku wzmocnienia  $k_u$ , napięcie  $U_s = \beta_u U_2$ , będące częścią napięcia wyjściowego.

Współczynnik  $B_u = U_s / U_2$  nazywa się współczynnikiem sprzężenia zwrotnego.

Uwzględniając zależność:  $U_2 = k_u U_1 = k_u (U_g + U_s) = k_u (U_g + \beta_u U_2)$  można współczynnik wzmocnienia układu wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym zapisać jako:

$k'_u = \frac{U_2}{U_g} = \frac{k_u}{1 - B_u k_u}$ . Sprężenie zwrotne powoduje zmianę wzmocnienia układu, przy czym rozróżnia się:

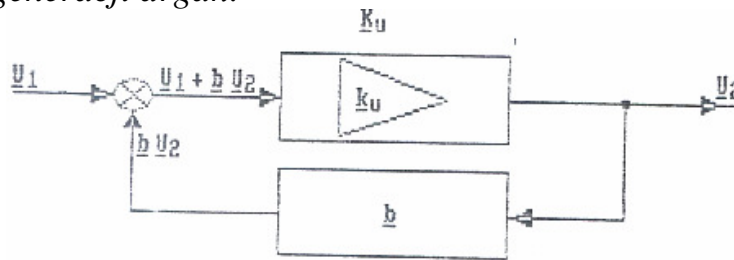
- 1)  $|1 - B_u k_u| > 1$  to  $k'_u < k_u$ . Napięcie sprężenia zwrotnego jest w tym przypadku skierowane przeciwnie do napięcia sygnału wejściowego, co powoduje zmniejszenie wzmocnienia. Jest to przypadek ujemnego sprężenia zwrotnego.
- 2)  $0 < |1 - B_u k_u| < 1$  to  $k'_u > k_u$ . Napięcie sprężenia zwrotnego jest zgodne w fazie z napięciem sygnału wejściowego, co powoduje zwiększenie wzmocnienia układu. Jest to sprężenie dodatnie.
- 3)  $|1 - B_u k_u| = 0$ , to  $k'_u \rightarrow \infty$ . Układ może pracować bez napięcia wejściowego ( $U_g = 0$ ), stając się generatorem drgań.



Rys. 13. Charakterystyki częstotliwościowe wzmacniacza RC: 1 – bez sprężenia, 2 – ze sprężeniem (0,1), 3- ze sprężeniem (0,55).

### 3. Wiadomości teoretyczne - układy generacyjne z dodatnim sprężeniem zwrotnym.

#### 3.1 Warunek generacji drgań.



Rys. 14. Wzmacniacz z zewnętrzną pętlą sprężenia zwrotnego. wzmacniacz o współczynniku wzmocnienia napięciowego  $k_u = k_u \exp(j\psi_k)$  z zewnętrzną pętlą sprężenia zwrotnego o współczynniku sprężenia zwrotnego  $b = b \exp(j\psi_b)$

Wypadkowy współczynnik wzmocnienia napięciowego takiego układu określa zależność:

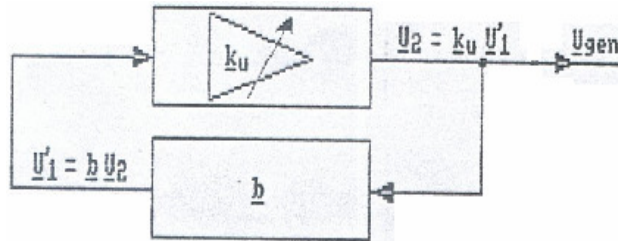
$$k'_u = \frac{U'_2}{U'_1} = \frac{k'_u}{1 - k'_u b'}$$

z której wynika, że wzmocnienie układu może być nieskończenie duże gdy spełniony zostanie zespolony warunek generacji:

$$k_u b = 1$$

Nieskończenie duże wzmocnienie oznacza stan wzbudzenia układu czyli pojawienie się sygnału na jego wyjściu przy zerowym sygnale na wejściu jak wynika z poniższego rysunku, na którym zaciski wejściowe nie występują.





**Rys. 15. Schemat blokowy układu generacyjnego.**

Jakość generowanego sygnału  $U_2 = U_{gen}$  zależy od jakości bloków układu generującego. Gdy bloki są liniowe sygnał jest sinusoidalny, gdy choć jeden jest nieliniowy (np. przesterowany wzmacniacz), sygnał jest odkształcony.

Parametrami sygnału sinusoidalnego (harmonicznego) są: amplituda i częstotliwość. Analiza zespolonego warunku generacji umożliwia ustalenie jego „odpowiedzialności” za te parametry.

Współczynnik wzmocnienia wzmacniacza definiuje dwa aspekty jego działania:

- 1) aspekt amplitudowy stanowiący o krotności wzmocnienia ( $k_u$ ),
- 2) aspekt fazowy definiujący przesunięcie sygnału w fazie ( $\Psi_k$ ).

Wzmacniacz użyty w ćwiczeniu przesunął sygnał wzmacniany o ok.  $0^\circ$  ( $360^\circ$ ) – „wyjście współfazowe” lub  $180^\circ$  – „wyjście przeciwfazowe”. Jednocześnie ma on regulowany, za pomocą potencjometrów, współczynnik wzmocnienia  $k_u$ .

Bloki sprzężenia zwrotnego wchodzące w skład stanowiska są czwórnikami pracującymi w stanie rozwarcia, gdyż są obciążone dostatecznie dużym oporem wejściowym wzmacniacza. W takim przypadku o pracy układu decydują ich łańcuchowe parametry rozwarcia typu  $A = A \exp(j\psi_A)$  skorelowane ze współczynnikiem sprzężenia zwrotnego następująco:  $A = 1/b$ . Zespolony warunek generacji przyjmuje, więc nową formę:

$k_u = A$  czyli  $k_u \exp(j\psi_k) = A \exp(j\psi_A)$  stanowiącą dwa warunki w formie algebraicznej:

- 1) warunek fazowy  $\psi_k = \psi_A$
- 2) warunek amplitudowy  $k_u = A$

Interpretacja fizyczna tych warunków jest następująca:

-blok sprzężenia zwrotnego musi „cofnąć” sygnał w fazie ( lub przesunąć go o kąt dopełniający) o taki kąt, o jaki jest on przesuwany przez wzmacniacz (zachowanie dodatniego sprzężenia zwrotnego), blok sprzężenia zwrotnego musi „osłabić” sygnał tyle razy ile razy wzmacniacz go wzmacnia (zachowanie bilansu energetycznego).

Bloki sprzężenia zwrotnego zastosowane w ćwiczeniu dzielą się na:

- 1) przystosowane do współpracy ze wzmacniaczem o wyjściu współfazowym np. typ  $RC_w$ ,  $RL_M$ ,  $LC_{M(0)}$
- 2) przystosowane do współpracy ze wzmacniaczem o wyjściu przeciwfazowym np.  $RC_3$ ,  $RC_4$ ,  $CR_3$ ,  $CR_4$ ,  $LC_C$ ,  $LC_L$ ,  $LC_{CL}$ ,  $LC_m$ .
- 3) rezonansowe, zawierające elementy typu C i L ewentualnie M (bezwładnościowo – sprężyste)
- 4) nierezonansowe, o elementach typu C (bezwładnościowe) lub o elementach typu L (sprężystościowe).

Uwaga: określenia: „bezwładnościowe” i „sprężystościowe” nawiązują do dziedziny odwzorowania elektromechanicznego, o czym będzie mowa w dalszej części instrukcji.

Fakt istnienia elementów zachowawczych typu C i L, których wpływ na przesunięcia fazowe w układach generacyjnych zależy od częstotliwości sygnału, prowadzi do wniosku: o częstotliwości generowanego sygnału decyduje warunek fazowy.

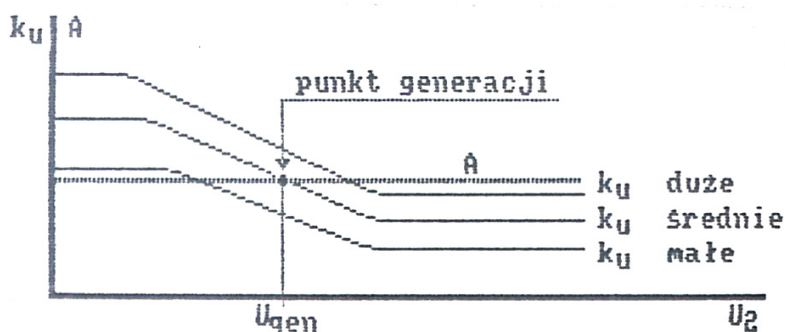
Elementy dysypacyjne w postaci rezystancji występujących w obszarze bloków sprzężenia zwrotnego decydują o stopniu tłumienia sygnałów. Fakt ten prowadzi do wniosku:

o amplitudzie generowanego sygnału decyduje warunek amplitudowy.

W omamianym stanowisku laboratoryjnym, amplitudowy warunek generacji ustala się przez dobór współczynnika wzmocnienia  $k_u$ .

### 3.2. Interpretacja geometryczna amplitudowego warunku generacji.

Dla łatwości uzyskiwania stabilnych drgań, w ćwiczeniu zastosowano wzmacniacz z wbudowanym układem ARW (Automatycznej Regulacji Wzmocnienia). Układ powoduje zmniejszanie współczynnika wzmocnienia w miarę wzrostu poziomu sygnału wzmacnianego ( $U_2$  lub  $U_1$ ). Amplitudowy warunek generacji, w interpretacji geometrycznej jest punktem przecięcia charakterystyk pokazanych na poniższym rysunku i jest nazywany punktem generacji. Punkt ten wyznacza na osi napięciowej poziom sygnału generowanego  $U_{gen}$  i odpowiada średniej nastawie potencjometrów regulacyjnych. Fazowy warunek generacji także podlega interpretacji geometrycznej. Różnica polega na tym, że interpretuje się go w dziedzinie częstotliwości. Na rysunku pokazano także typowy dla czwórnika liniowego kształt charakterystyki  $A(U_2)$  świadczący o tym, że parametr ten nie zależy od poziomu sygnału:  $A(U_2) = const$ .



Rys. 16. Geometryczna interpretacja amplitudowego warunku generacji.

### 3.3. Bilans energetyczny w układzie generacyjnym.

Podczas wzbudzenia układu, w pętli wzmacniacz – blok sprzężenia zwrotnego, krąży sygnał, który ulega wzmocnieniu we wzmacniaczu a w pozostałej części układu jest tłumiony. Dodatkowe tłumienie powoduje obciążenie przyłączone do układu.

Energetycznym warunkiem stabilnego stanu generacji jest zerowy bilans energetyczny układu. Polega on na dostarczeniu krążącemu sygnałowi takiej energii, jaką traci on w pozostałej części układu z obciążeniem włącznie.

Jeżeli dostarczona energia jest mniejsza od energii strat to generowany sygnał zanika. Prędkość zanikania zależy od stałej czasowej układu (od prędkości wyczerpywania się jego energii). W przypadku, gdy energia dostarczana przez wzmacniacz jest większa od strat, poziom energetyczny generowanego sygnału zwiększa się.

O ile końcowym efektem ujemnego bilansu energetycznego jest zanik drgań w układzie, o tyle efektem bilansu dodatniego jest doprowadzenie układu do stanu granicznego ujawniającego efekty nieliniowości lub ograniczeń np. wielkością napięcia zasilającego. Generowany sygnał jest wówczas odkształcony (nieharmoniczny).

W układach mechanicznych odpowiada to ujawnieniem się nieliniowości sprężyn, działaniem mechanicznych ograniczników (np. gum odbojowych w pojazdach samochodowych) i tp.

Klasycznym przykładem generatorów o nadmiarowym bilansie energetycznym są generatory z „lawinowym” dodatnim sprzężeniem zwrotnym, zwane generatorami impulsowymi. Znalazły one szczególnie szerokie zastosowanie w technice impulsowej tj. w impulsowej technice sterowania, telemechanice i w układach cyfrowych.

Interesujące są procesy energetyczne w układzie generacyjnym z rezonansowym blokiem sprzężenia zwrotnego. Elementy C i L (bezwładnościowe i sprężyste)

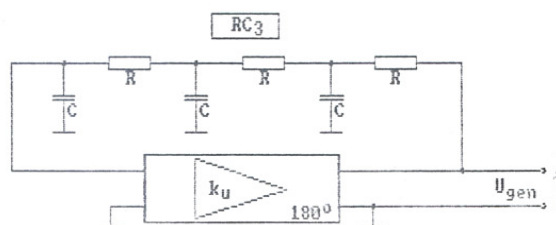
„przechwytyją” odpowiednią „porcję” energii, a następnie wprowadzają ją w stan „balansu”, który polega na tym, że przyjmuje ona przemienne, postać energii: pola elektrycznego kondensatora C i pola magnetycznego cewki indukcyjnej L (w układach mechanicznych, postać energii: kinetycznej i potencjalnej).

### 3.4. Podstawowe rodzaje generatorów elektronicznych.

Opracowano szereg generatorów elektronicznych różniących się stabilnością, prostotą konstrukcji i amplitudy generowanego sygnału, niezawodnością, prostotą konstrukcji, odpornością na warunki pracy jak temperatura i wilgotność, łatwością przestrajania, odpornością na zmiany obciążenia, odpornością na zakłócenia zewnętrzne i tp.

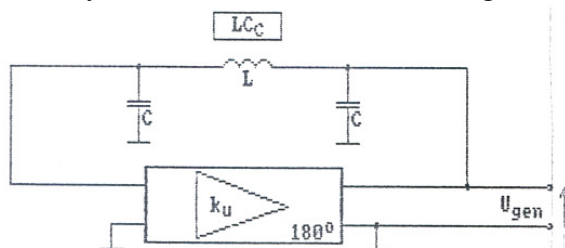
Dużą grupę stanowią generatory RC, do której należą: generatory „drabinkowe” z łańcuchem opóźniającym (RC) lub przyspieszającym (CR) i generatory z mostkiem Wiena .

Generatory RC tworzą konstrukcje najprostsze należące do najniższej klasy generatorów. Charakteryzują się największym wpływem wzmacniacza na częstotliwość sygnału generowanego, gdyż blok sprzężenia zwrotnego może pracować przy każdej z nich. Jedynie generatory z mostkiem Wiena (RCW) wykazują lepsze właściwości. Znalazły one zastosowanie jako zasilacze mostkowych mierników rezystancji, pojemności, indukcyjności własnej oraz indukcyjności wzajemnej. Wszystkie generatory RC pracują najlepiej w zakresie częstotliwości akustycznych.

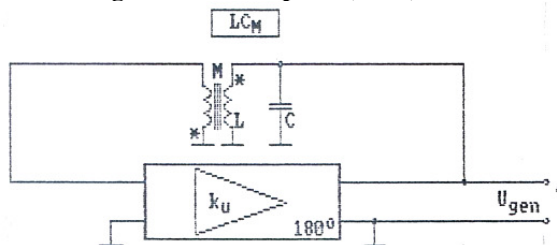


Rys. 17. Uproszczony schemat generatora RC (RC3).

Generatory LC znalazły najszersze zastosowanie w technice elektronicznej i pomiarowej. Charakteryzują się one tym, że częstotliwość generacji zależy głównie od częstotliwości drgań własnych bloku sprzężenia zwrotnego. Jeżeli wzmacniacz nie spełnia odpowiednich warunków fazowych, układ nie wchodzi w stan generacji.



Rys. 18. Uproszczony schemat generatora Colpitzta (LCC)



Rys. 19. Uproszczony schemat generatora Meissnera (LCM)

Podobnymi układami są generatory: Hartleya (LCL) i Clappa (LCCL).

Bloki sprzężenia zwrotnego generatorów rezonansowych nazywane są rezonatorami. Rezonatory elektryczne nie wykazują najlepszych właściwości w porównaniu z mechanicznymi lub elektromechanicznymi. Te ostatnie charakteryzują się bardzo dobrą

stabilnością częstotliwościową, należą do nich rezonatory kamertonowe ( $10^{-6}$ ) oraz kwarcowe ( $10^{-10}$ ).

Rezonator kwarcowy jest to płytką wyciętą z kryształu kwarcu tak, że jej częstotliwość mechanicznych drgań własnych jest równa częstotliwości drgań generowanych. Na boczne powierzchnie płytki napyłone są srebrne elektrody, do których przyłączone jest napięcie. Pole elektryczne wytworzone między elektrodami powoduje naprężenia mechaniczne w płytce, a zatem jej odkształcenie. Naprężenia mechaniczne płytki powodują powstawanie napięcia na elektrodach. Zjawisko to nazywane jest piezoelektrycznością. Jeżeli częstotliwość napięcia przyłożonego do elektrod jest równa częstotliwości drgań własnych płytki kwarcowej, to wchodzi ona w rezonans z tym napięciem. W ten sposób płytka kwarcowa staje się rezonatorem elektromechanicznym.

Rezonatory kwarcowe są przestrajalne w bardzo wąskim zakresie częstotliwości. Podobne właściwości wykazuje kryształ soli Segnetta stosowany jako przetwornik głowic adapterowych.

### 3.5. Drgania w układach mechanicznych.

Mało jest układów mechanicznych pracujących jako generatory drgań. Przedstawicielem takich układów jest mechanizm zegarowy. Urządzenia takie jak wstrząsarki, przesiewacze wibracyjne i tp. mają własne częstotliwości drgań rezonansowych lecz pracują przy częstotliwościach pod – lub nadrezonansowych.

Układy mechaniczne, w większości przypadków zawierają elementy tłumiące, bezwładnościowe i sprężyste. Stanowią, zatem odpowiedniki obwodów rezonansowych o znacznym tłumieniu. Drgania występujące w tych układach są zjawiskiem niepożądanym. Na przykład znane jest zjawisko wzbudzenia się urządzeń akustycznego nagłośnienia, zjawisko drgań nadwozia samochodowego poruszającego na jezdni, zjawisko drgań żurawi budowlanych i tp.

Znajomość mechanizmu wzbudzenia się układów umożliwia konstruktorom unikanie tego zjawiska. Odbywa się to zwykle przez wprowadzenie optymalnych elementów tłumiących kształtujących warunek amplitudowy drgań (np. amortyzatory samochodowe) lub elementów bezwładnościowych kształtujących warunek fazowy (np. tak zwane „tłumiki drgań” stosowane na liniach elektroenergetycznych).

### 3.6. Zasady odwzorowania elektromechanicznego.

Układy złożone z elementów R, L i C mogą być odwzorowaniem elementów mechanicznych takich jak tłumiki, bezwładności masowe i sprężystości, a także elementów hydraulicznych, pneumatycznych czy cieplnych.

Wszystkie mierzalne wielkości fizyczne można podzielić na:

- 1) szeregowe, np. siła  $F$  [N], moment obrotowy  $M$  [Nm], natężenie prądu elektrycznego  $I$  [A] itd.,
- 2) równoległe, np. prędkość w ruchu postępowym  $V$  [m/s], prędkość kątowna  $\Omega$  [1/s], napięcie elektryczne  $U$  [V], itd..

Torem transmisji mocy nazywa się układ elementów przenoszących energię. W każdym punkcie toru można określić moc jako iloczyn wielkości szeregowej i równoległej. Pary takich wielkości nazwano zmiennymi stanu energetycznego lub zmiennymi stanu.

Zmiennymi stanu w torze elektrycznym są  $U$  i  $I$ , w torze mechanicznym o ruchu postępowym -  $V$  i  $F$ , o ruchu obrotowym -  $\Omega$  i  $M$  itd.

Zmienne stanu tego samego typu mogą być wzajemnie przeliczalne. Obwody elektryczne zwane także sieciowymi postaciami modeli są najczęściej stosowane w technice odwzorowań wielkości i zjawisk mechanicznych.

Zmienne szeregowe przeliczane są na elektryczne przez mnożenie ich przez współczynniki odwzorowania elektromechanicznego, a zmienne równoległe – przez dzielenie. Łatwo stwierdzić, że iloczyn zmiennych odwzorowujących wyraża moc rzeczywistą.

Z analogii wyrażeń  $\frac{1}{2} J \Omega^2$  i  $\frac{1}{2} CU^2$  wynika, że jeżeli napięcie  $U$  odwzorowuje prędkość kątową  $\Omega$ :

$$U = \Omega k_{emo}$$

gdzie:  $k_{emo}$  [VS] – jest współczynnikiem odwzorowania elektromechanicznego (ruchu obrotowego),

to moment bezwładności  $J$  może być odwzorowany przez pojemność  $C$ :

$$C = J / k^2_{emo}$$

$$\text{wówczas: } \frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} (J / k^2_{emo}) (\Omega k_{emo})^2 = \frac{1}{2} CU^2$$

Rozumując analogicznie można udowodnić, że mechaniczne elementy, w których występuje tarcie (straty) mogą być odwzorowane przez rezystancję  $R$ , a elementy, w których występuje zjawisko sprężystości – przez indukcyjność  $L$ .

#### **4. Literatura pomocnicza.**

1. Arczewski K., Goraj Z., Pietrucha J.: Elementy modelowania w mechanice, Układy dyskretne, Wydawnictwa P.W., Warszawa 1983.
2. Koziej E., Sochoń B.: Elektrotechnika i elektronika, PWN, Warszawa.
3. Michałowski K., Przyjałkowski A.: Elektrotechnika z elektroniką, WNT, Warszawa 1978.
4. Notatki z wykładu Elektrotechnika i Elektronika.
5. Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków. Praca zbiorowa WNT.
6. Układy elektroniczne. S. Seely WNT.

Opracował: dr Ireneusz Krakowiak  
mgr inż. Jakub Dębicki