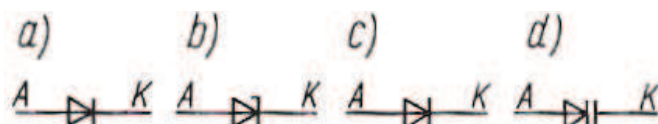


4. MATERIAŁ NAUCZANIA

4.1. Diody półprzewodnikowe

4.1.1. Materiał nauczania

Diody półprzewodnikowe to elementy zbudowane w oparciu o złącze półprzewodnik-półprzewodnik (p-n lub l-h: p-p⁺, n-n⁺) lub metal-półprzewodnik (m-p). Ze względu na budowę i technologię wykonania wyróżniamy diody ostrzowe (ostrze metalowe wtopione w półprzewodnik) i warstwowe (otrzymywane technologią stopową lub dyfuzyjną). Najważniejszym kryterium z punktu widzenia użytkownika jest podział diod ze względu na zastosowanie. Wg tego kryterium można wyróżnić diody: prostownicze, stabilizacyjne, detekcyjne, mieszające, impulsowe, generacyjne, pojemnościowe itd.. Symbole różnych diod przedstawia Rys.1.



Rys.1. Symbole graficzne diody: a) symbol ogólny; b) symbol diody tunelowej; c) symbol diody stabilizacyjnej (Zenera); d) symbol diody pojemnościowej [1, s.53]

Diody prostownicze

Stosowane są w układach prostowniczych urządzeń zasilających, przekształcających prąd zmienny w prąd jednokierunkowy pulsujący.

Parametry diod prostowniczych można podzielić na dwie podstawowe grupy:

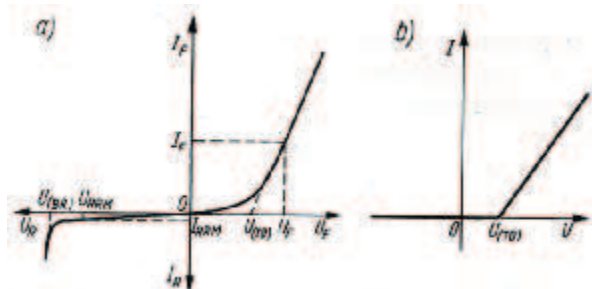
parametry charakterystyczne:

- napięcie progowe U_{T0} ,
- napięcie przebicia U_{BR} ,
- maksymalne powtarzalne napięcie wsteczne U_{RRM} ($U_{RRM} = 0,8 U_{BR}$),
- dopuszczalne średnie napięcie przewodzenia U_F ,

parametry graniczne:

- dopuszczalny prąd średni w kierunku przewodzenia $I_F(AV)$,
- dopuszczalna temperatura złącza T_{jmax} ,
- maksymalna moc strat przy danej temperaturze $P_{tot max}$.

Parametry charakterystyczne najlepiej przedstawia rzeczywista charakterystyka prądowo-napięciowa diody prostowniczej - Rys.2. Dodatkowo, dla kierunku przewodzenia podawana jest wartość prądu I_F , przy określonym napięciu U_F .



Rys.2. Charakterystyka diody prostowniczej a) rzeczywista; b) aproksymująca [1, s.54]

Ze względu na straty mocy diody prostownicze dzieli się na elementy:

- małej mocy $P_{tot\ max} < 1\text{ W}$,
- średniej mocy $1\text{ W} \leq P_{tot\ max} \leq 10\text{ W}$,
- dużej mocy $P_{tot\ max} \geq 10\text{ W}$.

Dopuszczalna temperatura złącza dla diod germanowych wynosi ok. 80°C , a dla diod krzemowych ok. 150°C .

Diody impulsowe

Diody te wykorzystywane są głównie w układach impulsowych i przerzutnikowych. Idealna dioda impulsowa powinna działać bez jakichkolwiek opóźnień i nie zniekształcać impulsów. Miarą bezwładności diody impulsowej jest czas przełączania t_{tr} ze stanu przewodzenia do stanu zaporowego. Parametry charakterystyczne to:

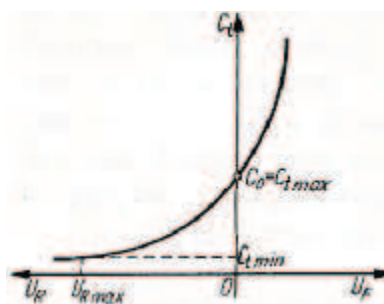
- czas ustalania charakterystyki wstecznej t_{rr} ,
- czas ustalania charakterystyki przewodzenia t_{fr} .

Diody pojemnościowe

W diodach tych (warikapach, waraktorach) wykorzystuje się zmiany pojemności złącza PN pracującego w kierunku zaporowym pod wpływem napięcia – Rys.3.

Parametry charakterystyczne to:

- pojemność minimalna C_{tmin} ,
- pojemność maksymalna C_{tmax} ,
- współczynnik przestrajania $K_0 = \frac{C_{tmax}}{C_{tmin}}$



Rys.3. Charakterystyka diody pojemnościowej [1,s.58]

Diody pojemnościowe stosuje się w układach automatycznego dostrajania, powielania i modulacji częstotliwości, w układach modulatorów amplitudy, we wzmacniaczach i mieszaczach parametrycznych i innych.

Diody stabilizacyjne (Zenera)

W diodach tych wykorzystuje się właściwości charakterystyki prądowo-napięciowej w zakresie przebicia- Rys.4. Po przekroczeniu pewnej wartości napięcia wstecznego następuje szybki wzrost prądu, przy prawie niezmiennym napięciu, na skutek zjawiska Zenera lub przebicia lawinowego. Oba zjawiska mają charakter całkowicie odwracalny.

Parametry charakterystyczne:

- napięcie stabilizacji U_Z (napięcie Zenera), Δ

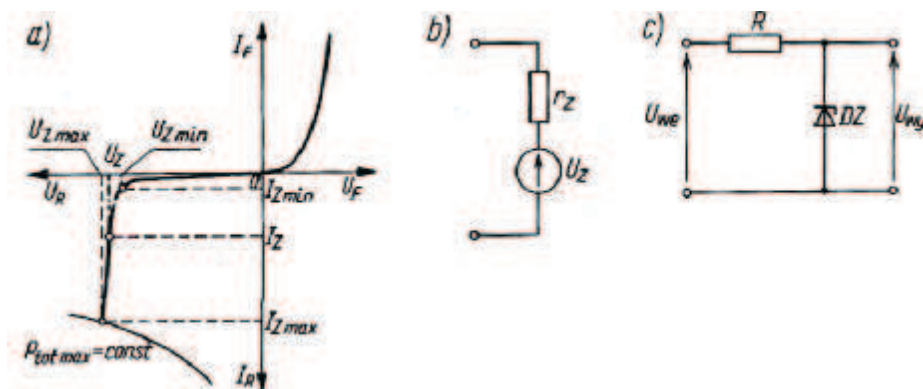
- rezystancja dynamiczna $r_z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} [\Omega]$

- rezystancja statyczna $R_z = \frac{U_Z}{I_Z} [\Omega]$

- współczynnik stabilizacji $S = \frac{\Delta I_Z}{\Delta U_Z} \frac{I_Z}{U_Z}$
- temperaturowy współczynnik napięcia stabilizowanego α_{U_Z} .

Stabilizacja jest tym lepsza im bardziej stromy jest przebieg charakterystyki prądowo-napięciowej, a więc im mniejsza jest rezystancja dynamiczna diody.

Diody stabilizacyjne umożliwiają stabilizację napięcia w zakresie od 3 do 300V. W zależności od dopuszczalnych strat mocy dzielimy je na diody: małej mocy ($P_{\text{tot max}} < 1\text{W}$), średniej mocy ($1\text{W} < P_{\text{tot max}} \leq 10\text{W}$), dużej mocy ($P_{\text{tot max}} > 10\text{W}$).



Rys.4. Dioda stabilizacyjna a) charakterystyka prądowo-napięciowa; b) schemat zastępczy; c) schemat stabilizatora z diodą stabilizacyjną [1,s.59]

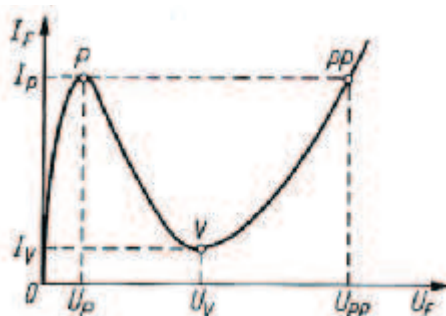
Diody Zenera stosuje się w m.in. układach stabilizacji napięć, w ogranicznikach amplitudy, w układach źródeł napięć odniesienia.

Diody tunelowe

Na skutek zjawiska tunelowania tzn. przejścia nośników pomiędzy pasmami przy polaryzacji w kierunku przewodzenia charakterystyka prądowo-napięciowa diody tunelowej znacznie różni się od charakterystyk pozostałych diod – Rys.5.

Parametry charakterystyczne:

- prąd szczytu I_P ,
- prąd doliny I_V ,
- napięcie szczytu U_P ,
- napięcie doliny U_V ,
- napięcie przeskoiku U_{PP} .



Rys.5. Charakterystyka diody tunelowej [1,s.61]

Diody tunelowe za względu na bardzo krótki czas przejścia tunelowego nośników wykorzystuje się w zakresie bardzo dużych częstotliwości – w układach generatorów, przerzutników,

detektorów i wzmacniaczy. W zakresie napięć od U_P do U_V dioda tunelowa może być wykorzystywana jako ujemna rezystancja (dynamiczna).

4.1.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Jakie są symbole diod stosowanych w układach elektronicznych?
2. Jakie są parametry charakterystyczne a jakie graniczne diod prostowniczych?
3. W jakich układach stosuje się diody prostownicze?
4. Jakie parametry charakteryzują diody stabilizacyjne?
5. W jakich układach są stosowane diody Zenera?
6. Jaką właściwość diod pojemnościowych wykorzystuje się w układach elektronicznych?
7. Jakie są parametry diody tunelowej?
8. W jakich układach można wykorzystać diody tunelowe?
9. Które diody w układach elektronicznych pracują głównie w zakresie przewodzenia, a które w kierunku zaporowym?

4.1.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Pomiar charakterystyk statycznych $I_A=f(U_{AK})$ diod prostowniczych krzemowych i germanowych oraz diod stabilizacyjnych metodą „punkt po punkcie”.

Sposób wykonania ćwiczenia:

Uwaga: Przed włączeniem zasilania poproś nauczyciela o sprawdzenie układu pomiarowego!

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z zasadą działania oraz rodzajami i parametrami diod prostowniczych i stabilizacyjnych;
- 2) zapoznać się z danymi katalogowymi diod podanych w ćwiczeniu oraz wypisać w tabeli ich najważniejsze parametry;

Tabela Parametry katalogowe diod prostowniczych

Symbol diody	U_{T0}	U_{RRM}	$P_{tot\ max}$	$I_{F(AV)}$

Tabela Parametry katalogowe diod stabilizacyjnych

Symbol diody	$U_{(BR)}$	$P_{tot\ max}$	S	r_Z	α_{UZ}

- 3) narysować układ pomiarowy;
- 4) zmontować układ pomiarowy do badania diod w kierunku przewodzenia:
 - a) wyznaczyć charakterystykę statyczną diody prostowniczej w kierunku przewodzenia podłączając diodę poprzez rezystor ograniczający do zasilacza, w obwód anodowy włączyć miliamperomierz do pomiaru prądu anodowego I_F , a do zacisków diody woltomierz służący do pomiaru napięcia U_{AK} ;
 - b) zwiększać napięcie z zasilacza od 0 aż do chwili, gdy wartości prądu przewodzenia zbliży się do wartości $I_{F(AV)}$ (pomiaru należy zageścić gdy prąd I_F zacznie gwałtownie rosnąć);

- 5) wykonać około 15 pomiarów w celu uzyskania odpowiedniej dokładności pomiaru, wyniki umieścić w tabeli pomiarowej;

Tabela. Pomiary charakterystyk statycznych diod w kierunku przewodzenia

$U_{AK1}[V]$	$I_A[mA]$	$U_{AK2}[V]$	$I_{A2}[mA]$	$U_{AK3}[V]$	$I_{A3}[mA]$

- 6) przeprowadzić pomiary dla dwóch innych diod i wyniki zamieścić w tabeli;
 7) zmontować układ pomiarowy do badania diod w kierunku zaporowym:
 a) wyznaczyć charakterystykę statyczną diody prostowniczej w kierunku zaporowym - podłączyć diodę w kierunku zaporowym do zasilacza, w obwód katody włączyć mikroamperomierz do pomiaru prądu I_K , a do zacisków zasilacza woltomierz do pomiaru napięcia U_{KA} ;
 b) odczytać wartości prądu zwiększając napięcie z zasilacza od 0 do, jeśli to możliwe, U_{RRM} lub $U_{(BR)}$ (w przypadku diody Zenera) co 1 V, wyniki umieścić w tabeli pomiarowej;

Tabela. Pomiary charakterystyk statycznych diod w kierunku zaporowym

$U_{KA1}[V]$	$I_{K1}[\mu A]$	$U_{KA2}[V]$	$I_{K2}[\mu A]$	$U_{KA3}[V]$	$I_{K3}[\mu A]$

- 8) przeprowadzić pomiary dla dwóch innych diod i wyniki zamieścić w tabeli;
 9) narysować na podstawie pomiarów wykresy $I=f(U_{AK})$ (dla obu kierunków przewodzenia) dla 3 przykładowych diod prostowniczych;
 10) zaznaczyć na wykresie dla diody Zenera napięcie stabilizacji;
 11) dokonać oceny poprawności wykonanego ćwiczenia;
 12) sformułować wnioski na podstawie uzyskanych wyników pomiarów.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- makiety (trenażery) z diodami różnych typów do pomiaru ich parametrów i wyznaczania charakterystyk,
- sprzęt pomiarowy i laboratoryjny: elektroniczne mierniki uniwersalne, zasilacze laboratoryjne stabilizowane,
- katalogi elementów i układów elektronicznych,
- literatura z rozdziału 6.

4.1.4. Sprawdzenie postępów

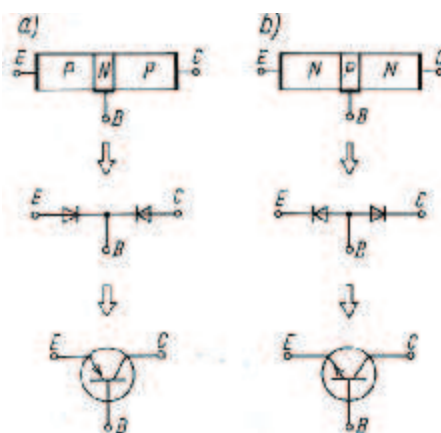
Czy potrafisz:

- | | Tak | Nie |
|---|--------------------------|--------------------------|
| 1) podać parametry charakterystyczne diod prostowniczych oraz ich przykładowe wartości? | ☐ | ☐ |
| 2) narysować charakterystyki statyczne diod prostowniczych? | ☐ | ☐ |
| 3) podać parametry charakterystyczne diod stabilizacyjnych oraz ich przykładowe wartości? | ☐ | ☐ |
| 4) narysować charakterystyki statyczne diod Zenera? | ☐ | ☐ |
| 5) zaproponować układy pomiarowe do pomiarów charakterystyk diod? | ☐ | ☐ |
| 6) rozpoznać diody na podstawie wyników pomiarów? | ☐ | ☐ |
| 7) sprawdzić, czy dioda jest sprawna? | ☐ | ☐ |

4.2. Tranzystory bipolarne BJT

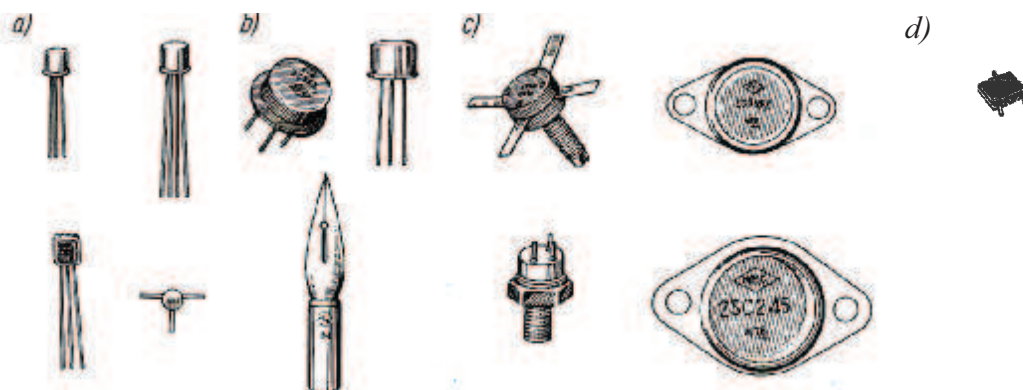
4.2.1. Materiał nauczania

Tranzystory bipolarne są elementami, które w swojej strukturze zawierają kombinacje dwóch półprzewodnikowych złączy p-n utworzonych w jednej płytce półprzewodnika niesamoistnego. Uszeregowanie obszarów o różnym typie przewodnictwa (p-n-p lub n-p-n) daje dwa przeciwstawne typy tranzystorów – Rys.6. Zasada działania obu rodzajów tranzystorów jest taka sama, różnica polega na sposobie polaryzacji złączy i kierunku przepływu prądów. Procesy zachodzące w jednym złączy oddziałują na drugie, a nośnikami ładunku są i elektrony i dziury.



Rys.6. Model struktury i symbole graficzne tranzystora bipolarnego: a) pnp b) npn [1,s.62]
E - emiter, C – kolektor, B – baza

Wytworzona w płytce półprzewodnika struktura jest umieszczona w hermetycznie zamkniętej obudowie metalowej, ceramicznej lub plastikowej chroniącej przed uszkodzeniami mechanicznymi oraz umożliwiającej odprowadzanie ciepła -Rys.7.



Rys.7. Przykłady typowych obudów tranzystorów bipolarnych: a) małej mocy; b) średniej mocy; c) dużej mocy; d) przystosowanej do montażu powierzchniowego. Dla określenia skali umieszczono widok stalówki. [1,s.62]

Zewnętrzna polaryzacja obu złączy tranzystora pozwala na uzyskanie pożądanego stanu pracy: aktywnego (złącze emiterowe – w kierunku przewodzenia, kolektorowe – w kierunku zaporowym), nasycenia (oba złącza w kierunku przewodzenia), zatkania (oba złącza w kierunku zaporowym) lub

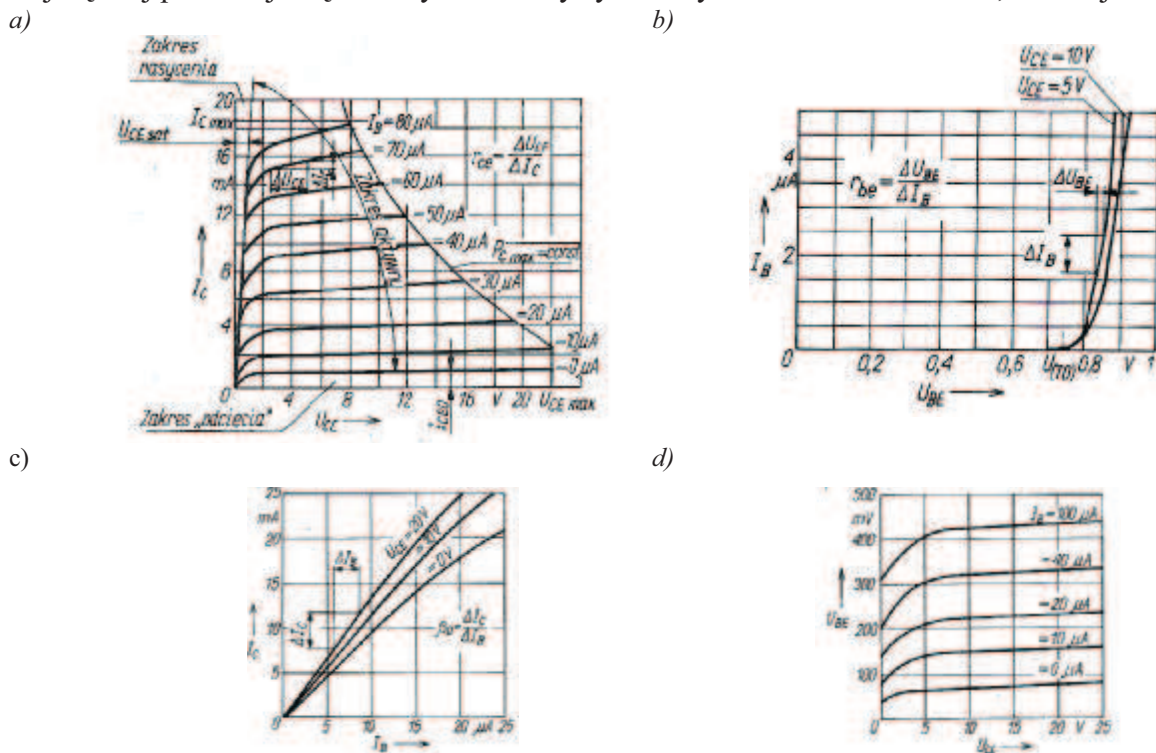
inwersyjnego (złącze emiterowe w kierunku zaporowym, złącze kolektorowe w kierunku przewodzenia). Tranzystor może pracować również jako klucz elektroniczny, znajdując się na przemian w zakresach nasycenia i zatkania.

Właściwości tranzystorów opisują rodziny charakterystyk statycznych oraz parametry dynamiczne. Charakterystyki statyczne przedstawiają zależności między stałymi lub wolnozmiennymi prądami: emitera I_E , bazy I_B , kolektora I_C i napięciami: baza-emiter U_{BE} , kolektor-emiter U_{CE} i kolektor-baza U_{CB} – Rys.9. Charakterystyki te pokazują zależności prądowo-napięciowe tranzystora i nazwane zostały charakterystykami: wejściowymi, wyjściowymi, przejściowymi (prądowymi) i sprzężenia zwrotnego. Ponieważ mierzone są na wejściu i wyjściu tranzystora, a tranzystor ma tylko 3 wyprowadzenia (E, B, C), jedna z elektrod jest wspólna dla wejścia i wyjścia, co jednoznacznie określa układ pracy tranzystora – WE, WB, WC – Rys.8.



Rys. 8. Układy pracy tranzystorów oraz strzałkowanie prądów i napięć: a) układ wspólnego emitera WE; b) układ wspólnego kolektora WC; c) układ wspólnej bazy WB [1,s.150]

Najczęściej prezentuje się rodziny charakterystyk tranzystorów w układzie WE, rzadziej WB.



Rys.9. Charakterystyki tranzystora bipolarnego w układzie WE: a) wyjściowa; b) wejściowa; c) prądowa przejściowa; d) zwrotna (sprzężenia zwrotnego) [1,s.66; 1,s.69; 1,s.70]

Charakterystyki wyjściowe stanowią rodzinę krzywych $I_C = f(U_{CE})|_{I_B = \text{const}}$ dla układu WE –Rys.9a lub $I_C = f(U_{CB})|_{I_E = \text{const}}$ dla układu WB. Można na nich wyróżnić kilka zakresów związanych z polaryzacją złącz E-B i C-B. Najczęściej wykorzystuje się zakres aktywny (złącze E-B w kierunku przewodzenia, złącze C-B w kierunku zaporowym), ponieważ tranzystor ma wtedy właściwości wzmacniające.

Charakterystyczne parametry to:

w układzie WE:

- wielkosygnałowy współczynnik wzmocnienia prądowego dla $U_{CE} = \text{const}$, $\beta = h_{21E} \approx \frac{I_C}{I_B}$,
- małosygnałowy współczynnik wzmocnienia prądowego dla $U_{CE} \rightarrow 0$, $\beta_0 = h_{21e} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$,
- prądy zerowe złącz przy polaryzacji wstecznej I_{CB0}, I_{CEO} ,
- rezystancja wyjściowa dla $I_B = \text{const}$, $r_{CE} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}$,
- napięcie nasycenia $U_{CE\text{sat}}$,
- dopuszczalna moc strat $P_{C\text{max}}$,
- dopuszczalne napięcie $U_{CE\text{max}}$,
- dopuszczalny prąd $I_{C\text{max}}$.

w układzie WB:

- wielkosygnałowy współczynnik wzmocnienia prądowego dla $U_{CB} = \text{const}$ $\alpha = h_{21B} = -\frac{I_C}{I_E}$,
- małosygnałowy współczynnik wzmocnienia prądowego dla $U_{CB} \rightarrow 0$, $\alpha_0 = h_{21b} = -\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$,
- prądy zerowe złącz przy polaryzacji wstecznej I_{EB0}, I_{CB0} ,
- rezystancja wyjściowa dla $I_E = \text{const}$ $r_{CB} = \frac{\Delta U_{CB}}{\Delta I_C}$,
- dopuszczalny prąd $I_{C\text{max}}$,
- dopuszczalna moc strat $P_{C\text{max}}$,

Charakterystyki wejściowe przedstawiają zależność $I_B = f(U_{BE})|_{U_{CE} = \text{const}}$ w układzie WE-Rys.9b i $U_{EB} = f(I_E)|_{U_{CB} = \text{const}}$ w układzie WB. Ponieważ złącze baza-emiter jest diodą, więc charakterystyka wejściowa jest identyczna jak charakterystyka diody i posiada taki sam parametr tzn. napięcie progowe $U_{(T0)}$, poniżej którego prąd bazy jest bardzo mały. Wartość napięcia progowego dla tranzystorów krzemowych zawiera się w zakresie od 0,5 do 0,8V, a dla tranzystorów germanowych od 0,1 do 0,2V.

Charakterystyki prądowe (przejściowe) są graficznym przedstawieniem zależności $I_C = f(I_E)|_{U_{CB} = \text{const}}$ dla układu WB i $I_C = f(I_B)|_{U_{CE} = \text{const}}$ dla układu WE-Rys.9c.

Charakterystyki sprzężenia zwrotnego pokazują zależność $U_{EB} = f(U_{CB})|_{I_E = \text{const}}$ dla układu WB i $U_{BE} = f(U_{CE})|_{I_B = \text{const}}$ dla układu WE-Rys.9d.

Parametry tranzystorów bipolarnych w dużym stopniu zależą od temperatury. Prąd I_{CB0} jest w przybliżeniu wykładniczą funkcją temperatury, współczynnik wzmocnienia prądowego β_0

wzrasta o kilka procent na 1K. Parametry dynamiczne tranzystora to parametry różniczkowe i impulsowe.

Parametry różniczkowe są wielkościami opisującymi właściwości tranzystora dla małych sygnałów prądu zmiennego. Najczęściej używa się parametrów admitancyjnych y i mieszanych h . Sens fizyczny parametrów h to:

$h_{11} = \frac{U_{WE}}{I_{WE}} \quad \text{dla } U_{WY}=0$	- impedancja wejściowa przy zwartym wyjściu,
$h_{12} = \frac{U_{WE}}{U_{WY}} \quad \text{dla } I_{WE}=0$	- współczynnik sprzężenia zwrotnego przy rozwartym wejściu,
$h_{21} = \frac{I_{WY}}{I_{WE}} \quad \text{dla } U_{WY}=0$	- współczynnik wzmocnienia prądowego przy zwartym wyjściu,
$h_{22} = \frac{I_{WY}}{U_{WY}} \quad \text{dla } I_{WE}=0$	- admitancja wyjściowa przy rozwartym wejściu.

Przy wszystkich parametrach podaje się dodatkowy indeks (b, e lub c) wskazujący układ pracy tranzystora np. h_{21e} . W zakresie małych częstotliwości parametry te mają charakter rzeczywisty, natomiast dla wielkich częstotliwości są zespolone, a ich części rzeczywiste i urojone stanowią funkcje częstotliwości. Parametry y stosowane są głównie przy wielkich częstotliwościach. Do parametrów różniczkowych należą również współczynniki wzmocnienia w układach WE i WB oraz rezystancje wejściowe r_{CE} i r_{CB} .

Parametry impulsowe opisują procesy przejściowe podczas przełączania między stacjonarnymi stanami pracy, tzn. stanem zatkania i stanem nasycenia. Przy przełączaniu tranzystora impulsem prostokątnym ważne są czasy: włączania t_{on} (suma czasów opóźnienia t_d i narastania t_r) oraz wyłączania t_{off} (suma czasów magazynowania t_s i opadania t_f).

Właściwości częstotliwościowe tranzystora bipolarnego charakteryzują:

- częstotliwość f_α , przy której moduł zwarcowego współczynnika wzmocnienia prądowego $h_{21b} \approx \alpha_0$ dla tranzystora w układzie WB, zmniejszy się o 3dB ($\sqrt{2}$ razy) w stosunku do wartości przy małej częstotliwości,
- częstotliwość f_β , przy której moduł zwarcowego współczynnika wzmocnienia prądowego $h_{21e} \approx \beta_0$ dla tranzystora w układzie WE, zmniejszy się o 3dB ($\sqrt{2}$ razy) w stosunku do wartości przy małej częstotliwości,
- częstotliwość f_T , przy której moduł zwarcowego współczynnika wzmocnienia prądowego maleje do jednośc; $f_T \approx f_\beta \beta_0$.

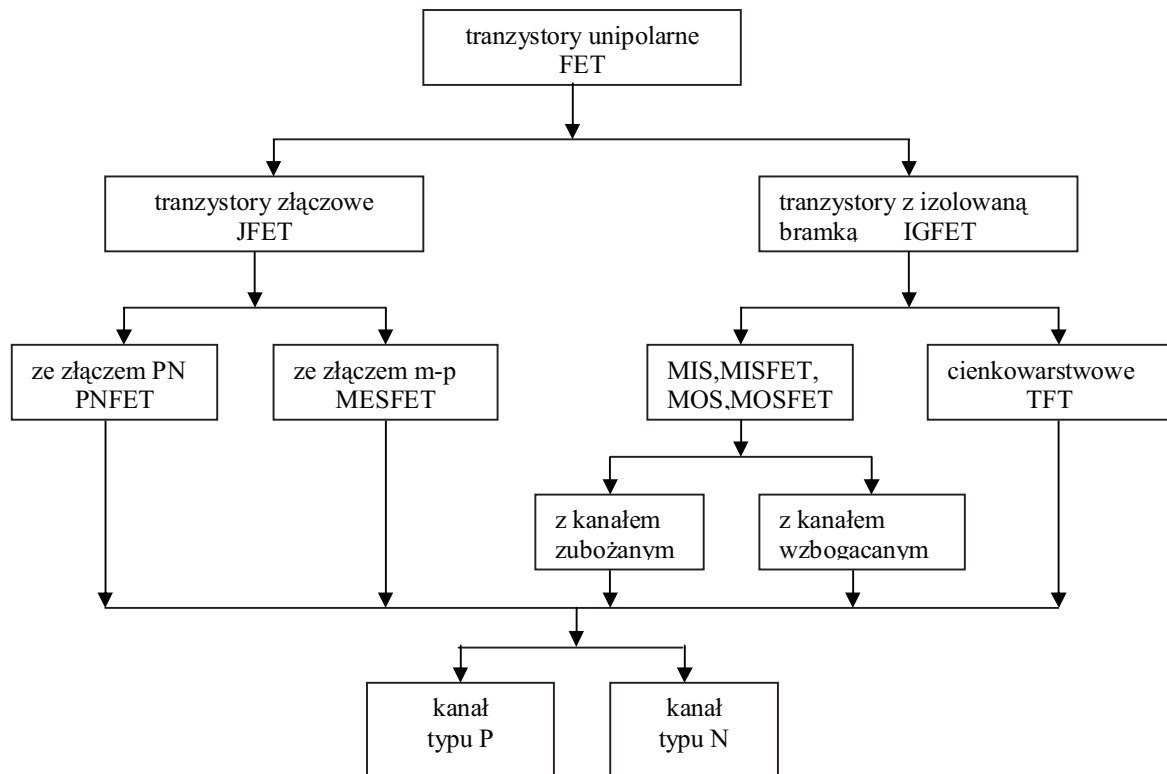
Miedzy tymi częstotliwościami zachodzi relacja: $f_\beta < f_T < f_\alpha$.

Ze względu na wartość częstotliwości f_T tranzystory dzieli się na elementy:

- małej częstotliwości $f_T \leq 3 \text{ MHz}$,
- średniej częstotliwości $3 \text{ MHz} < f_T \leq 30 \text{ MHz}$,
- wielkiej częstotliwości $30 \text{ MHz} < f_T < 300 \text{ MHz}$,
- bardzo wielkiej częstotliwości $f_T \geq 300 \text{ MHz}$.

Tranzystory unipolarne FET

Tranzystory te, nazywane też tranzystorami polowymi, stanowią grupę kilku rodzajów elementów, których wspólną cechą jest pośrednie oddziaływanie pola elektrycznego na rezystancję półprzewodnika lub na rezystancję cienkiej warstwy nieprzewodzącej.



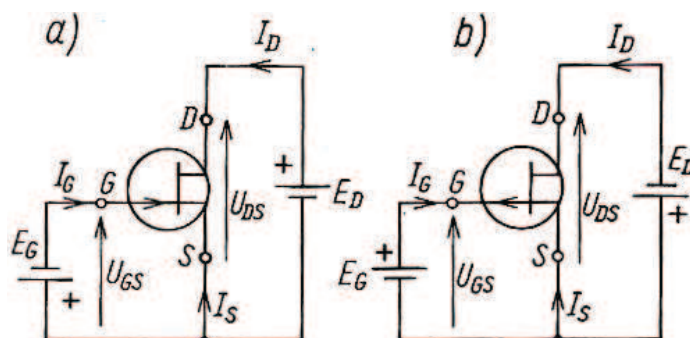
Rys.10. Klasyfikacja tranzystorów unipolarnych

Teoretycznie sterowanie pracą tranzystora unipolarnego może odbywać się bez poboru mocy. W działaniu elementów bierze udział tylko jeden rodzaj nośników ładunków np. elektrony.

Tranzystor unipolarny złączowy zbudowany jest z warstwy półprzewodnika typu N (w tranzystorach z kanałem typu N) lub półprzewodnika typu P (w tranzystorach z kanałem typu P) tworzącej kanał. Wyprowadzenia zewnętrzne kanału i obszaru, do których wdyfundowuje się domieszki przeciwnego typu niż kanał tworzą trzy elektrody:

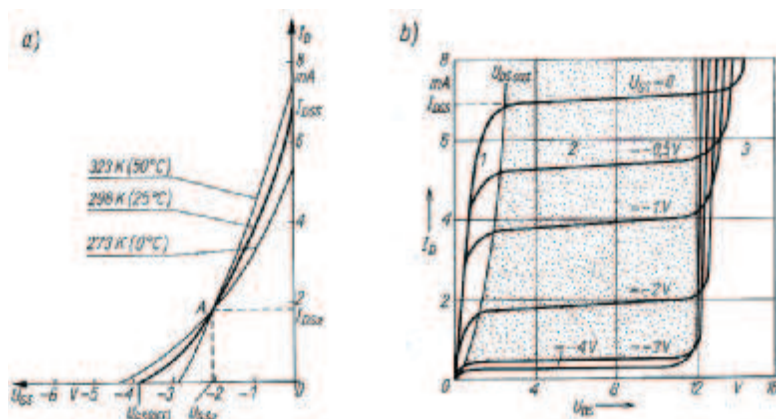
- źródło S, z którego nośniki ładunku wpływają do kanału, prąd źródła - I_S ,
- dren D, do którego dochodzą nośniki ładunku z kanału, prąd drenu – I_D , napięcie dren-źródło U_{DS} ,
- bramka G, jest elektrodą sterującą przepływem ładunków pomiędzy źródłem i drenem, prąd bramki I_G , napięcie bramka-źródło U_{GS} .

Źródło i dren tranzystora unipolarnego są spolaryzowane tak, aby umożliwić przepływ ładunków większościowych przez kanał od źródła do drenu. Złącze bramka-kanał powinno być spolaryzowane w kierunku wstecznym. Dla ustalonego napięcia dren-źródło, rezystancja kanału, a więc i prąd drenu, jest funkcją napięcia bramka-źródło. Sterowanie przepływem prądu w tranzystorze unipolarnym zachodzi na skutek zmian pola elektrycznego (efekt polowy).



Rys. 11. Symbol i polaryzacja tranzystorów unipolarnych złączowych JFET: a) z kanałem typu N;
b) z kanałem typu P [1,s.82]

Tranzystory unipolarne złączowe podobnie jak tranzystory bipolarne, charakteryzują parametry statyczne i dynamiczne. Właściwości statyczne tranzystora unipolarnego opisują rodziny charakterystyk przejściowych i wyjściowych – Rys.12.



Rys.12. Charakterystyki statyczne tranzystora unipolarnego złączowego typu N: a) przejściowe;
b) wyjściowe [1,s.83]

Charakterystyki przejściowe przedstawiają zależność prądu drenu od napięcia bramka-źródło $I_D = f(U_{GS}) \big|_{U_{DS} = \text{const}}$ - Rys. 12a. Parametry charakterystyczne to:

- napięcie odcięcia bramka-źródło $U_{GS\text{OFF}}$ tj. napięcie jakie należy doprowadzić do bramki aby przy ustalonym napięciu U_{DS} nie płynął prąd drenu. W praktyce przyjmuje się, że przy napięciu $U_{GS\text{OFF}}$ prąd drenu nie przekracza określonej wartości (najczęściej 1 lub 10 μA);
- prąd nasycenia I_{DSS} , tj. prąd drenu płynący przy napięciu $U_{GS}=0$ i określonym napięciu U_{DS} .

Charakterystyki przejściowe zależą od temperatury, ale istnieje taki punkt A – przecięcia się charakterystyk dla różnych wartości temperatury, w którym współczynnik temperaturowy prądu drenu jest równy zero, co jest zaletą tranzystorów unipolarnych, ponieważ umożliwia dobór tego punktu jako punktu pracy i uniezależnienie się od temperatury.

Charakterystyki wyjściowe podają związek między prądem drenu a napięciem dren-źródło $I_D = f(U_{DS}) \big|_{U_{GS} = \text{const}}$ - Rys. 12b. Na charakterystykach tych wyróżnia się trzy zakresy:

- zakres liniowy (triutowy) – 1, w którym tranzystor zachowuje się jak zwykły półprzewodnikowy rezystor (przy wzroście napięcia U_{DS} w przybliżeniu liniowo rośnie prąd I_D);
- zakres nasycenia (pentodowy) – 2, w którym napięcie U_{DS} w bardzo małym stopniu wpływa na wartość prądu drenu, natomiast bramka zachowuje właściwości sterujące, a napięcie przy którym zaczyna się zakres nasycenia oznacza się jako U_{DS sat}. W tym zakresie tranzystor pracuje najczęściej jako wzmacniacz;
- zakres powielania lawinowego – 3, z którego nie korzysta się w czasie normalnej pracy ze względu na możliwość trwałego uszkodzenia tranzystora.

Przy opisie właściwości stykowych tranzystora unipolarnego podaje się również parametry:

- napięcie odcięcia $U_{GS OFF}$,
- prąd nasycenia $I_{D SS}$,
- prąd wyłączenia, tj. prąd drenu płynący przy spolaryzowaniu bramki napięciem $|U_{GS}| > |U_{GS OFF}|$ $I_{D OFF}$
- rezystancja statyczna włączenia, tj. rezystancja między drenem a źródłem tranzystora pracującego w zakresie liniowym przy $U_{GS}=0$ $r_{DS on}$,
- rezystancja statyczna wyłączenia, tj. rezystancja między drenem a źródłem tranzystora znajdującego się w stanie odcięcia przy $|U_{GS}| > |U_{GS OFF}|$ $r_{DS off}$,
- prądy upływu
- napięcia przebicia między poszczególnymi elektrodami

Ważne są również **parametry graniczne**, których nie należy przekraczać. Najważniejsze parametry graniczne tranzystora to:

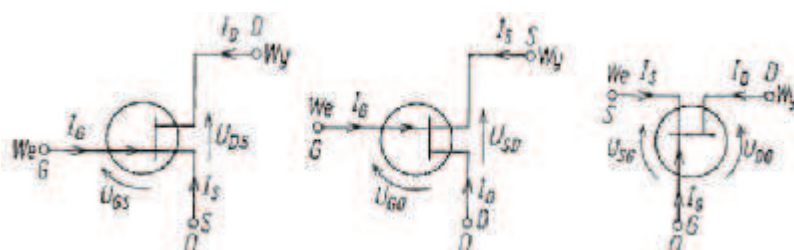
- dopuszczalny prąd drenu I_{Dmax},
- dopuszczalny prąd bramki I_{Gmax},
- dopuszczalne napięcie dren-źródło U_{DSmax},
- dopuszczalne straty mocy P_{totmax} ≈ P_{Dmax}.

W zakresie małych sygnałów przyjmuje się, że prąd drenu, oprócz składowej stałej zawiera składową zmienną o małej wartości $i_D \ll I_D$. Prąd drenu jest funkcją napięcia bramka-źródło i napięcia dren-źródło.

Parametry dynamiczne tranzystorów JFET to:

- transkonduktancja przy $U_{DS} = \text{const}$, $g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$
- rezystancja wyjściowa (drenu) przy $U_{GS} = \text{const}$, $r_{ds} = \frac{\Delta U_{GS}}{\Delta I_D}$
- współczynnik wzmocnienia napięciowego przy $I_D = \text{const}$. $k_u = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta U_{GS}}$

Podstawowe układy pracy tranzystorów polowych zależą od sposobu ich włączenia w układ i są analogiczne jak tranzystorów bipolarnych: wspólny dren – WD, wspólne źródło – WS i wspólna bramka – WG – Rys.13.



Rys. 13. Układy pracy tranzystorów oraz strzałkowanie prądów i napięć: a) układ wspólnego źródła WS; b) układ wspólnego drenu WD; c) układ wspólnej bramki WG [1,s.150]

Tranzystory z izolowaną bramką MOSFET mają bramkę oddzieloną cienką warstwą izolacyjną od kanału. Dzięki temu, teoretycznie, niezależnie od jej polaryzacji, nie płynie przez nią żaden prąd. Praktycznie w tranzystorach MOSFET prądy bramki są ok. 10^3 razy mniejsze niż w tranzystorach JFET (dla JFET są rzędu 1pA - 10nA), co pozwala na uzyskanie rezystancji wejściowej układu 10^{12} - $10^{16}\Omega$ (dla JFET są rzędu 10^9 - $10^{12}\Omega$). Tranzystory te mają dodatkową elektrodę – podłoże, oznaczone symbolem B. Spełnia ona podobną rolę jak bramka, jest jednak oddzielona od kanału tylko złączem PN.

Charakterystyki tranzystorów MOSFET mają przebieg zbliżony do charakterystyk tranzystorów JFET – Tabela 2.

Tabela 1. Charakterystyki tranzystorów MOSFET [1,s.88]

Rodzaj tranzystora	Symbol graficzny	Charakterystyka przejściowa	Charakterystyka wyjściowa	Napięcie U_{GS}	Napięcie U_T	Prąd I_D	Prąd I_S
Kanał zubożony typu p				< 0	> 0	< 0	> 0
Kanał wzbogacany typu p				< 0	< 0	< 0	> 0
Kanał zubożony typu n				> 0	< 0	> 0	< 0
Kanał wzbogacany typu n				> 0	> 0	> 0	< 0

Oznaczenia: G – zacisk bramki; S – zacisk źródła; D – zacisk drenu; B – zacisk podłoża

Tranzystory MOSFET charakteryzuje się przez podanie takich samych parametrów jak tranzystory JFET, a schemat zastępczy po przyjęciu pewnych uproszczeń jest także identyczny. Cenne zalety tranzystorów unipolarnych w porównaniu do bipolarnych: duża rezystancja wejściowa, małe szумы w zakresie małych i średnich częstotliwości, możliwość autokompensacji temperaturowej, odporność na promieniowanie oraz małe wymiary powodują, że są one coraz powszechniej stosowane w układach analogowych i cyfrowych, zwłaszcza w układach o dużej i bardzo dużej skali integracji. Należy jednak pamiętać o pewnym ograniczeniu: nie wolno przekraczać maksymalnego dopuszczalnego napięcia bramki, gdyż prowadzi to do uszkodzenia tranzystora. Szczególnie niebezpieczne mogą być ładunki statyczne, które mogą zniszczyć tranzystor polowy już po dotknięciu.

4.2.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania sprawdzisz czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczenia.

1. Jakie są rodzaje tranzystorów ze względu na budowę i sposób sterowania? Podaj ich symbole oraz oznacz i nazwij elektrody.
2. W jakich stanach może pracować tranzystor bipolarny i jaka polaryzacja złącz odpowiada poszczególnym stanom? Przedstaw na charakterystykach tranzystora w układzie WE.
3. W jakich układach może pracować tranzystor bipolarny? Podaj prądy i napięcia wejściowe i wyjściowe w każdym układzie pracy.
4. Jakie są najważniejsze parametry statyczne, dynamiczne i graniczne tranzystorów bipolarnych?
5. Jakie są rodzaje i cechy charakterystyczne tranzystorów unipolarnych?
6. W jaki sposób w tranzystorach unipolarnych złączowych następuje sterowanie prądem wyjściowym?
7. Jakie znasz charakterystyki oraz parametry statyczne, graniczne i małosygnałowe tranzystorów polowych?
8. Jakie właściwości tranzystorów unipolarnych powodują, że są one coraz częściej używane?

4.2.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Badanie tranzystora bipolarnego.

Sposób wykonania ćwiczenia:

Pomiar polega na wyznaczeniu charakterystyk statycznych tranzystora bipolarnego w układzie WE:

- wejściowej $I_B = f(U_{BE})$,
- wyjściowej $I_C = f(U_{CE})$,
- przejściowej $I_C = f(I_B)$.

Uwaga: Przed włączeniem zasilania poproś nauczyciela o sprawdzenie układu pomiarowego!

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się przed przystąpieniem do ćwiczenia z danymi katalogowymi podanych w ćwiczeniu tranzystorów i wypisać najważniejsze parametry oraz oznaczenia końcówek;

- 2) narysować układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyk tranzystora w układzie WE;
- 3) zmontować układ pomiarowy na podstawie schematu;
- 4) wyznaczyć charakterystykę wejściową tranzystora bipolarnego $I_B = f(U_{BE})$ zmieniając napięcie zasilacza bazowego od 0 aż do wartości, przy której $U_{BE} = 0,7V$ utrzymując napięcie U_{CE} na stałym poziomie, zmiany U_{BE} i I_B odnotować w tabeli pomiarowej;
- 5) wykonać przynajmniej 15 pomiarów dla każdej z trzech wartości U_{CE} dla zapewnienia odpowiedniej dokładności;

Tabela Charakterystyka wejściowa tranzystora bipolarnego w układzie WE

$U_{CE}[V]$	$U_{BE}[V]$	$I_B[\mu A]$

- 6) wyznaczyć charakterystykę przejściową tranzystora bipolarnego $I_C = f(I_B)$ zwiększając prąd bazy I_B od 0 uważając, by prąd I_C nie przekroczył wartości dopuszczalnej;
- 7) wykonać przynajmniej 15 pomiarów dla zapewnienia odpowiedniej dokładności, wyniki zanotować w tabeli pomiarowej;

Tabela Charakterystyka przejściowa tranzystora bipolarnego w układzie WE

$I_B[\mu A]$	$I_C[mA]$

- 8) wyznaczyć charakterystykę wyjściową tranzystora bipolarnego $I_C = f(U_{CE})$ zmieniając napięcie U_{CE} od 0 nie przekraczając , przy której następuje stabilizacja prądu kolektorowego I_C , pomiary wykonać przy $I_{B1} = \text{const}$;
- 9) wykonać przynajmniej 15 pomiarów dla zapewnienia odpowiedniej dokładności i umieścić je w tabeli pomiarowej;
- 10) powtórzyć pomiary dla dwóch innych prądów I_B ;

Tabela Charakterystyka wyjściowa tranzystora bipolarnego w układzie WE

dla $I_{B1} =$		dla $I_{B2} =$		dla $I_{B3} =$	
$U_{CE1}[V]$	$I_{C1}[mA]$	$U_{CE2}[V]$	$I_{C2}[mA]$	$U_{CE3}[V]$	$I_{C3}[mA]$

- 11) narysować charakterystyki statyczne tranzystora bipolarnego na podstawie wykonanych pomiarów:
 - obliczyć wzmocnienie prądowe β z charakterystyki $I_C = f(I_B)$;
 - nanieść prostą pracy na charakterystykę wyjściową oraz odczytać parametry otrzymanych punktów pracy;
- 13) dokonać oceny poprawności wykonanego ćwiczenia;
- 14) sformułować wnioski na podstawie uzyskanych wyników pomiarów.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- makiety (trenażery) z tranzystorami bipolarnymi różnych typów do pomiaru ich parametrów i wyznaczania charakterystyk,
- sprzęt pomiarowy: elektroniczne mierniki uniwersalne, zasilacze laboratoryjne stabilizowane,
- katalogi elementów i układów elektronicznych,
- literatura z rozdziału 6.

Ćwiczenie 2

Badanie tranzystora unipolarnego.

Sposób wykonania ćwiczenia

Pomiar polega na wyznaczeniu charakterystyk statycznych:

- wyjściowej $I_D=f(U_{GS})$,
- przejściowej $I_D=f(U_{DS})$,

oraz parametrów statycznych tranzystora polowego w układzie WS.

Uwaga: Przed włączeniem zasilania poproś nauczyciela o sprawdzenie układu pomiarowego!

Aby wykonać ćwiczenie powinienś:

- 1) zapoznać się przed przystąpieniem do ćwiczenia z danymi katalogowymi podanych w ćwiczeniu tranzystorów i wypisać najważniejsze parametry oraz oznaczenia końcówek;
- 2) zaproponować układy pomiarowe do wyznaczania poszczególnych charakterystyk tranzystora w układzie WS;

Wyznaczanie charakterystyki przejściowej $I_D=f(U_{GS})$:

- 3) zmontować układ pomiarowy na podstawie zaproponowanego schematu;
- 4) zmieniać napięcie z zasilacza polaryzującego bramkę tranzystora od 0 aż do wartości, przy której $I_D=0$, zanotować w tabeli pomiarowej zmiany U_{GS} i I_D , (należy utrzymywać stałą wartość U_{DS});

Tabela Charakterystyka przejściowa tranzystora unipolarnego

$U_{GS}[V]$	$I_D[mA]$

- 5) wykonać przynajmniej 15 pomiarów w celu uzyskania odpowiedniej dokładności, notując wyniki w tabeli pomiarowej

Wyznaczanie charakterystyki wyjściowej $I_D=f(U_{DS})$:

- 6) zmontować układ pomiarowy na podstawie zaproponowanego schematu;
- 7) ustalić przed rozpoczęciem pomiarów wartość $U_{GS}=0V$;
- 8) zmieniać napięcie U_{DS} od 0 aż do wartości, przy której następuje stabilizacja prądu drenu I_D , wyniki zapisać w tabeli pomiarowej;

Tabela Charakterystyka wyjściowa tranzystora unipolarnego

dla $U_{GS1}=0V$		dla $U_{GS2}=$		dla $U_{GS3}=$	
$U_{DS1}[V]$	$I_{D1}[mA]$	$U_{DS2}[V]$	$I_{D2}[mA]$	$U_{DS3}[V]$	$I_{D3}[mA]$

- 9) wykonać przynajmniej 15 pomiarów dla zapewnienia odpowiedniej dokładności i umieścić je w tabeli pomiarowej;
- 10) powtórzyć pomiary dla dwóch innych napięć U_{GS} pamiętając, że U_{GS} ma wartość ujemną; narysować na podstawie wyników pomiarów charakterystyki statyczne tranzystora unipolarnego:
 - charakterystykę przejściową $I_D=f(U_{GS})$ dla $U_{DS}=const$,
 - charakterystykę wyjściową $I_D=f(U_{DS})$ dla $U_{GS}=const$;
- 11) obliczyć parametry tranzystora na podstawie charakterystyk statycznych;
- 12) dokonać oceny poprawności wykonanego ćwiczenia;
- 13) sformułować wnioski na podstawie uzyskanych wyników pomiarów.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- makiety (trenażery) z tranzystorami polowymi różnych typów do pomiaru ich parametrów i wyznaczania charakterystyk,
- sprzęt pomiarowy i laboratoryjny: elektroniczne mierniki uniwersalne, zasilacze laboratoryjne stabilizowane,
- katalogi elementów i układów elektronicznych,
- literatura z rozdziału 6.

Ćwiczenie 3

Projektowanie i symulacja działania układów z tranzystorami bipolarnymi i unipolarnymi.

Sposób wykonania ćwiczenia

W programie symulacyjnym EWBA zrealizować układy wykorzystujące tranzystor bipolarny i polowy jako klucz elektroniczny.

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z zasadą działania i parametrami tranzystorów bipolarnych i unipolarnych;
- 2) zapoznać się z obsługą programu symulacyjnego EWBA;
- 3) zaproponować układ wykorzystujący tranzystor bipolarny jako klucz elektroniczny;
- 4) zamodelować układ w programie symulacyjnym i sprawdzić jego działanie;
- 5) zaproponować układ wykorzystujący tranzystor polowy jako klucz elektroniczny;
- 6) zamodelować układ w programie symulacyjnym i sprawdzić jego działanie;
- 7) zaprezentować wykonaną symulację i wnioski z ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- komputer PC,
- oprogramowanie EWB,
- literatura z rozdziału 6.

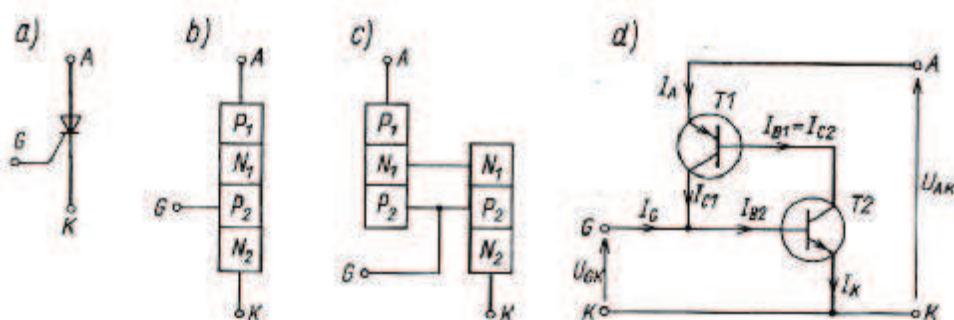
4.2.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:	Tak	Nie
1) podać parametry charakterystyczne tranzystorów bipolarnych oraz ich przykładowe wartości?	☐	☐
2) narysować charakterystyki statyczne tranzystorów bipolarnych w różnych układach pracy ?	☐	☐
3) zaproponować układy pomiarowe do pomiarów charakterystyk tranzystorów bipolarnych?	☐	☐
3) podać parametry charakterystyczne tranzystorów polowych oraz ich przykładowe wartości?	☐	☐
4) narysować charakterystyki statyczne tranzystorów polowych?	☐	☐
5) zaproponować układy pomiarowe do pomiarów charakterystyk tranzystorów unipolarnych?	☐	☐
6) rozpoznać rodzaj tranzystora na podstawie wyników pomiarów?	☐	☐
7) sprawdzić czy tranzystor jest sprawny?	☐	☐

4.3. Półprzewodnikowe elementy sterowane

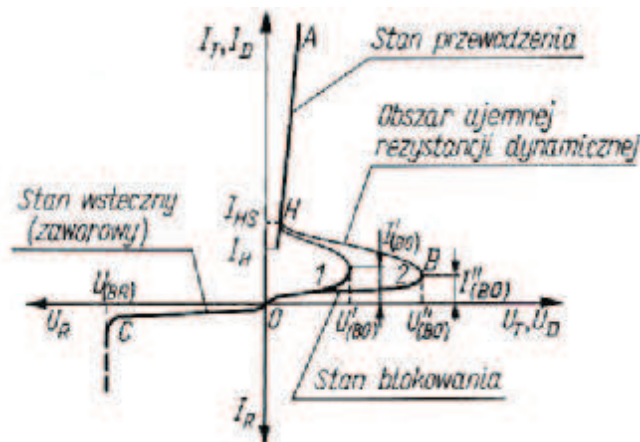
4.3.1. Materiał nauczania

Półprzewodnikowe elementy sterowane stanowią grupę elementów elektronicznych, których cechą charakterystyczną jest dwustanowość pracy, co oznacza, że te elementy mogą znajdować się w stanie przewodzenia lub nieprzewodzenia. W stanie przewodzenia płyną przez nie duże prądy przy małym spadku napięcia, co odpowiada małej rezystancji, a w stanie nieprzewodzenia spadek napięcia jest duży, a płynący prąd mały, co odpowiada dużej rezystancji. Podstawą większości tych elementów jest wielowarstwowa struktura PNPN, a typowym reprezentantem tyrystor - Rys.14.



Rys. 14. Tyrystor: a) symbol; b) c) podstawowa struktura; d) model dwutranzystorowy [1,s.75]

Tyrystor, nazywany także sterowaną diodą krzemową, jest elementem zbudowanym z czterech warstw półprzewodników tworzących trzy złącza PN. Wyprowadzone na zewnątrz trzy końcówki dołączone są do dwóch skrajnych warstw: anody i katody oraz do wewnętrznej warstwy, z reguły P_2 , nazywanej bramką. Dzięki takiej strukturze tyrystor może być uważany za połączenie dwóch tranzystorów objętych dodatnim sprzężeniem zwrotnym. Na charakterystykach prądowo-napięciowych tyrystora można wyróżnić polaryzację w kierunku przewodzenia i polaryzację w kierunku zaporowym. Charakterystyka tyrystora przy polaryzacji w kierunku wstecznym jest identyczna jak charakterystyka diody krzemowej, natomiast przy polaryzacji w kierunku przewodzenia można wyróżnić na niej trzy odcinki – Rys.15:



Rys.15. Charakterystyka prądowo-napięciowa tyrystora [1,s.76]

1 - prąd bramki $I_G \neq 0$, 2 - prąd bramki $I_G = 0$

- odcinek 0B odpowiada stanowi identycznemu z polaryzacją wsteczną, tzn. przez tyrystor płynie mały prąd (o wartości zbliżonej do wartości prądu wstecznego) pomimo polaryzacji anody napięciem dodatnim w stosunku do katody; stan ten nazywa się stabilnym stanem blokowania;
- odcinek BH rozpoczyna się w punkcie B - przegięcia charakterystyki, która przechodzi w odcinek o ujemnej rezystancji dynamicznej, a kończy w punkcie H, gdzie następuje załączenie tyrystora; napięcie $U_{(BO)}$ nazywa się napięciem przełączania, natomiast odpowiadający mu prąd $I_{(BO)}$ – prądem przełączania;
- odcinek HA przedstawia charakterystykę tyrystora w stanie przewodzenia (tyrystor przechodzi w stan przewodzenia po przekroczeniu prądu załączania I_{HS}), która ma taki sam kształt jak charakterystyka zwykłej diody krzemowej w stanie przewodzenia.

W stanie zaporowym (zaworowym) tyrystor zachowuje się jak dioda spolaryzowana wstecznie. Zgodnie z PN dla tyrystorów przyjęto oznaczenia: U_T – napięcie przewodzenia, U_R – napięcie wsteczne, U_D – napięcie blokowania, I_T – prąd przewodzenia, I_R – prąd wsteczny, I_D – prąd blokowania, U_A – napięcie anodowe, I_A – prąd anodowy.

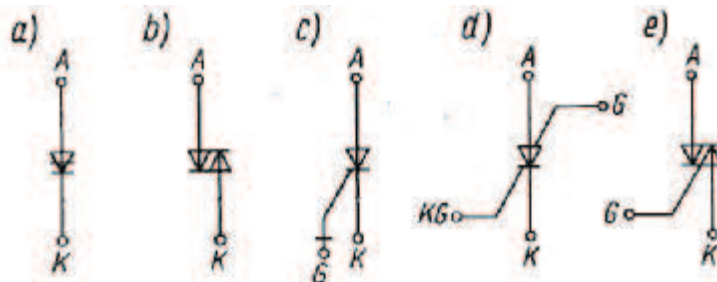
Załączenie tyrystora, czyli przejście ze stanu blokowania do stanu przewodzenia może być zainicjowane gwałtownym wzrostem napięcia anoda-katoda, wzrostem temperatury, oświetleniem struktury tyrystora itp., ale najczęściej jest wywołane doprowadzeniem do bramki dodatniego impulsu prądowego. Wyłączenie tyrystora, czyli przejście ze stanu przewodzenia w stan blokowania lub zaporowy, wymaga zmniejszenia prądu anodowego poniżej tzw. prądu podtrzymania I_H lub zmiany polaryzacji napięcia anoda-katoda. Przełączanie tyrystora z jednego stanu w drugi nie zachodzi natychmiast, lecz trwa określony czas, który jest charakteryzowany przez czasy: załączenia - t_{gt} i wyłączenia - t_{gf} .

Parametry graniczne tyrystora to:

- powtarzalne szczytowe napięcie blokowania UDRM ,
- powtarzalne szczytowe napięcie wsteczne URRM ,
- średni prąd przewodzenia $I_T(AV)$, określający dopuszczalną składową stałą prądu anodowego;
- powtarzalny szczytowy prąd przewodzenia I_{TRM} ;
- maksymalne dopuszczalne napięcie bramki U_{FGmax} ,
- maksymalny dopuszczalny prąd bramki I_{FGmax} ,
- maksymalna dopuszczalna moc strat w bramce P_{FGmax} .
- dopuszczalna temperatura złącza T_{jmax}

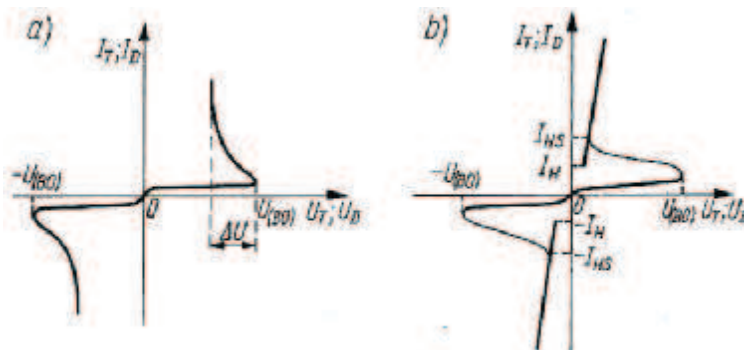
Duży wpływ na te parametry mają warunki pracy elementu tzn. temperatura otoczenia, warunki chłodzenia, kształtu i czasu trwania przebiegów napięcia i prądu itp.

Strukturę wielozłączową (cztero- lub pięciowarstwową) wykorzystuje się do budowy innych elementów dwustanowych – Rys. 16.



Rys.16. Symbole graficzne: a) dynistora; b) dynistora symetrycznego; c) tyrystora wyłączalnego; d) tyrystora dwubramkowego; e) tyrystora symetrycznego-triaka [1,s.79]

Dynistor – dioda przełączająca - Rys.16a, ma strukturę PNPN identyczną jak tyrystor, ale bez wyprowadzonej bramki. Dynistory stosuje się jako elementy sterujące, przełączane przez zmianę polaryzacji napięcia anoda-katoda i zmniejszenie prądu anodowego poniżej prądu podtrzymania. Dynistor symetryczny – diak ma charakterystykę w I i III ćwiartce symetryczną względem punktu zerowego – Rys.17a. Diaki stosowane są do wytwarzania impulsów załączających tyrystory oraz w układach sterujących jako szybkie przełączniki reagujące na wartość chwilową napięcia. **Tyrystory wyłączalne** - Rys.16c– GTO, SCS, GCS mogą być wyłączane ujemnym impulsem w obwodzie bramki, a **tyrystory dwubramkowe** – Rys.16d - dzięki dodatkowej elektrodzie sterującej, działającej podobnie jak bramka, załączane podanym na nią ujemnym, a wyłączane dodatnim impulsem. Podstawowa wada tyrystorów, jaką jest możliwość przewodzenia prądu tylko w jednym kierunku, została wyeliminowana w **tyrystorach symetrycznych - triakach** – Rys.16d. Charakterystyka triaka jest symetryczna w I i III ćwiartce względem zera – Rys.17b.



Rys.17. Charakterystyka prądowo-napięciowa a) dynistora symetrycznego – diaka; b) triaka

Triaki można załączać zarówno przy dodatnim, jak i ujemnym napięciu anoda-katoda. Najczęściej spotyka się triaki, które są przełączane w stan przewodzenia w jednym kierunku dodatnim impulsem prądowym, a w drugim kierunku – prądem o polaryzacji ujemnej.

Tyrystory stosuje się najczęściej w układach, w których płyną duże prądy i występują dość znaczne napięcia, np. w energoelektronice, prostownikach sterowanych, napędach elektrycznych, trakcji elektrycznej, w układach regulacji o dużych mocach itd.

4.3.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania sprawdzisz czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Jakie znasz półprzewodnikowe elementy sterowane?
2. Dlaczego tyrystor nazywa się diodą sterowaną?
3. W jakich stabilnych stanach pracy może znajdować się tyrystor?
4. W jaki sposób można załączyć, a jak wyłączyć tyrystor?
5. Jakie są parametry graniczne tyrystorów?
6. Jak działają elementy symetryczne diaki i triaki? Jakie są ich charakterystyki?
7. Gdzie można zastosować półprzewodnikowe elementy sterowane?

4.3.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Wyznaczenie charakterystyk statycznych i parametrów przełączania tyrystora:

- charakterystyki blokowania,
- charakterystyki zaporowej,
- charakterystyki przewodzenia.

Sposób wykonania ćwiczenia

Charakterystykę prądowo-napięciową tyrystora wyznacza się niezależnie dla trzech jego stanów pracy: blokowania, przewodzenia i stanu zaporowego. Pomiary polegają na zmierzeniu wartości napięć i prądów przy zasilaniu badanego elementu napięciem regulowanym. Pomiary można wykonać zarówno dla prądów stałych (tylko dla tyrystorów o małych mocach), jak i zmiennych.

Uwaga: Przed włączeniem zasilania poproś nauczyciela o sprawdzenie układu pomiarowego!

Aby wykonać ćwiczenie powinien:

- 1) zapoznać się z zasadą działania oraz rodzajami i parametrami tyrystorów;
- 2) odszukać w katalogu badane elementy, wypisać ich podstawowe parametry oraz oznaczenia końcówek;
- 3) zaproponować układy pomiarowe do wyznaczania poszczególnych charakterystyk;
- 4) zmontować układy pomiarowe:
 - charakterystyka blokowania:
 - a) spolaryzować tyrystor w kierunku przewodzenia przy odłączonej bramce;
 - b) włączyć mikroamperomierz prądu stałego do pomiaru prądu blokowania (I_A) w obwód anodowy, a do zacisków anoda(A)- katoda(K) woltomierz napięcia stałego do pomiaru napięcia anoda-katoda (U_{AK});
 - c) zwiększać napięcie U_{AK} od 0 co 1V uważając, aby nie przekroczyć dopuszczalnej dla badanego elementu wartości U_{DRM} , wyniki zanotować w tabeli pomiarowej;

Tabela Charakterystyka blokowania tyrystora

$U_{AK}[V]$	$I_A[\mu A]$

- charakterystyka zaporowa:

- d) spolaryzować tyrystor w kierunku zaporowym przy odłączonej bramce;
włączyć mikroamperomierz prądu stałego do pomiaru prądu zaporowego (I_K) w obwód katodowy, a do zacisków katoda (K)- anoda (A) woltomierz napięcia stałego do pomiaru napięcia katoda-anoda (U_{KA});
- e) zwiększać napięcie U_{KA} od 0 co 1V uważając, aby nie przekroczyć dopuszczalnej dla badanego elementu wartości U_{RRM} , wyniki zanotować w tabeli pomiarowej;

Tabela Charakterystyka zaporowa tyrystora

$U_{KA}[V]$	$I_K[\mu A]$

- parametry przełączania tyrystora:

- f) spolaryzować tyrystor w kierunku przewodzenia, w obwód anodowy wpiąć rezystor ograniczający dobrany do parametrów tyrystora (nie wolno przekroczyć prądu dopuszczalnego $I_{T(AV)}$), do pomiaru prądu I_A użyć miliamperomierza;
- g) zasilić złącze bramka (G)-katoda (K) poprzez rezystor ograniczający z drugiego zasilacza, do pomiaru prądu I_G użyć miliamperomierza prądu stałego, zanotować wyniki pomiaru w tabeli pomiarowej;
- h) ustalić napięcie $U_{AK}=5V$ i zwiększać prąd bramki (I_G) aż do momentu załączenia tyrystora, wyniki zapisywać w tabeli pomiarowej;

Tabela Parametry przełączania tyrystora

$U_{AK}[V]$	$I_A[uA]$	$I_G[mA]$	$U_{AK}'[V]$	$I_A'[mA]$
5				
10				
15				

gdzie:

U_{AK} , I_A - parametry przed załączeniem,

U_{AK}' , I_A' - parametry po załączeniu,

I_G - prąd bramki powodujący załączenie tyrystora.

- i) powtórzyć pomiary dla innych wartości napięcia anoda-katoda np. $U_{AK}=10V$ oraz $15V$, ponownie zanotować wyniki w tabeli pomiarowej;

- charakterystyka przewodzenia:

- j) spolaryzować tyrystor w kierunku przewodzenia, w obwód anodowy wpiąć rezystor ograniczający, dobrany do parametrów tyrystora i podać przez chwilę napięcie z zasilacza przez rezystor na bramkę, aby załączyć tyrystor;
- k) mierzyć wartości prądu I_A po załączeniu tyrystora (nie wolno przekroczyć prądu dopuszczalnego $I_{T(RV)}$), zwiększając napięcie U_{AK} , przy stałej wartości prądu bramki, wyniki zanotować w tabeli pomiarowej;

Tabela Charakterystyka przewodzenia tyrystora

$U_{AK}[V]$	$I_A[mA]$

- prąd podtrzymania tyrystora:

- l) spolaryzować tyrystor w kierunku przewodzenia, zwiększając napięcie U_{AK} i napięcie tak aby I_A był większy od prądu załączenia załączyć tyrystor, odłączyć zasilanie bramki $U_{GK}=0$;
 - m) obserwować wskazania miliamperomierza w obwodzie anodowym zmniejszając napięcie U_{AK} , aż do skokowego zmniejszenia prądu I_A prawie do zera, co oznacza wyłączenie tyrystora, wartość prądu I_A w chwili poprzedzającej wyłączenie tyrystora jest prądem podtrzymania I_H ;
- 5) narysować charakterystykę statyczną tyrystora $I_A=f(U_{AK})$ na podstawie uzyskanych wyników pomiarowych, zaznaczyć na charakterystyce stany pracy oraz najważniejsze parametry tyrystora;
 - 6) obliczyć rezystancje tyrystora dla poszczególnych stanów pracy i przedstawić wyniki w postaci zestawienia;
 - 7) dokonać oceny poprawności wykonanego ćwiczenia;
 - 8) sformułować wnioski dotyczące pracy tyrystora.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- makiety (trenażery) z tyrystorami różnych typów do pomiaru ich parametrów i wyznaczania charakterystyk,
- sprzęt pomiarowy: elektroniczne mierniki uniwersalne, zasilacze laboratoryjne stabilizowane,
- katalogi elementów i układów elektronicznych,
- literatura z rozdziału 6.

Ćwiczenie 2

Wyznaczenie charakterystyk statycznych i parametrów przełączania triaka:

- charakterystyki blokowania,
- charakterystyki przewodzenia.

Sposób wykonania ćwiczenia

Charakterystykę prądowo-napięciową triaka wyznacza się niezależnie dla jego dwóch stanów pracy: blokowania, przewodzenia. Pomiary polegają na zmierzeniu wartości napięć i prądów przy zasilaniu badanego elementu napięciem regulowanym. Pomiary można wykonać zarówno dla prądów stałych (tylko dla triaków o małych mocach), jak i zmiennych.

Uwaga: Przed włączeniem zasilania poproś nauczyciela o sprawdzenie układu pomiarowego!

Aby wykonać ćwiczenie powinien:

- 1) zapoznać się z zasadą działania oraz rodzajami i parametrami triaków;
- 2) odszukać w katalogu badane elementy, wypisać ich podstawowe parametry oraz oznaczenia końcówek;
- 3) zaproponować układy pomiarowe do wyznaczania poszczególnych charakterystyk;
- 4) zmontować układy pomiarowe;
 - charakterystyka blokowania:
 - a) spolaryzować triak przy odłączonej bramce;
 - b) włączyć mikroamperomierz prądu stałego do pomiaru prądu blokowania (I_A) w obwód anodowy, a do zacisków anoda (A)- katoda (K) woltomierz napięcia stałego do pomiaru napięcia anoda-katoda (U_{AK});
 - c) zwiększać napięcie U_{AK} od 0 do 1V uważając aby nie przekroczyć dopuszczalnej dla badanego elementu wartości U_{DRM} , wyniki zanotować w tabeli pomiarowej;

Tabela Charakterystyka blokowania tyrystora

$U_{AK}[V]$	$I_A[\mu A]$

- d) powtórzyć pomiary przy odwrotnej polaryzacji napięcia anoda-katoda U_{AK} ;

- parametry przełączania triaka:

- e) spolaryzować triak, w obwód anodowy wpiąć rezystor ograniczający dobrany do parametrów triaka (nie wolno przekroczyć prądu dopuszczalnego $I_{T(AV)}$), do pomiaru prądu I_A użyć miliamperomierza;
- f) zasilic złącze bramka (G)-katoda (K) poprzez rezystor ograniczający z drugiego zasilacza, do pomiaru prądu I_G użyć miliamperomierza prądu stałego, zanotować wyniki pomiaru w tabeli pomiarowej;

- g) ustalić napięcie $U_{AK}=5V$ i zwiększać prąd bramki (I_G) aż do momentu załączenia triaka, wyniki zapisywać w tabeli pomiarowej;

Tabela Parametry przełączania triaka

$U_{AK}[V]$	$I_A[uA]$	$I_G[mA]$	$U_{AK}'[V]$	$I_A'[mA]$
5				
10				
15				
-5				
-10				

gdzie:

U_{AK} , I_A - parametry przed załączeniem

U_{AK}' , I_A' - parametry po załączeniu

I_G - prąd bramki powodujący załączenie triaka

- h) powtórzyć pomiary dla innych wartości napięcia anoda-katoda np. $U_{AK}=10V$ oraz $15V$, ponownie zanotować wyniki w tabeli pomiarowej;
i) powtórzyć pomiary przy odwrotnej polaryzacji napięcia anoda-katoda U_{AK} ;

- charakterystyka przewodzenia:

- j) spolaryzować triak, w obwód anodowy wpiąć rezystor ograniczający, dobrany do parametrów elementu i podłączyć napięcie zasilające bramkę, aby załączyć triak;
k) mierzyć wartości prądu I_A po załączeniu triaka (nie wolno przekroczyć prądu dopuszczalnego $I_{T(RV)}$), zwiększając napięcie U_{AK} , przy stałej wartości prądu bramki, wyniki zanotować w tabeli pomiarowej;

Tabela Charakterystyka przewodzenia triaka

$U_{AK}[V]$	$I_A[mA]$

- l) powtórzyć pomiary przy odwrotnej polaryzacji napięcia anoda-katoda U_{AK} ;

- prąd podtrzymania triaka:

- m) spolaryzować triak, zwiększając napięcie U_{AK} i napięcie bramki U_{GK} , tak aby I_A był większy od prądu załączenia załączyć triak, odłączyć zasilanie bramki $U_{GK}=0$;
n) obserwować wskazania miliamperomierza w obwodzie anodowym, aż do skokowego zmniejszenia prądu I_A prawie do zera, co oznacza wyłączenie triaka, zmniejszając napięcie U_{AK} , wartość prądu I_A w chwili poprzedzającej wyłączenie triaka jest prądem podtrzymania I_H ;
5) narysować charakterystykę statyczną triaka $I_A=f(U_{AK})$ na podstawie uzyskanych wyników pomiarowych, zaznaczyć na charakterystyce stany pracy oraz najważniejsze parametry triaka;
6) obliczyć rezystancje triaka dla poszczególnych stanów pracy i przedstawić wyniki w postaci zestawienia;
7) dokonać oceny poprawności wykonanego ćwiczenia;
8) sformułować wnioski dotyczące pracy triaka.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- makiety (trenażery) z triakami różnych typów do pomiaru ich parametrów i wyznaczania charakterystyk,

- sprzęt pomiarowy: elektroniczne mierniki uniwersalne, zasilacze laboratoryjne stabilizowane,
- katalogi elementów i układów elektronicznych,
- literatura z rozdziału 6.

Ćwiczenie 3

Zastosowanie tyrystorów i triaków w układach elektronicznych.

Sposób wykonania ćwiczenia

W programie symulacyjnym EWBA zrealizować układ sterowania jasnością świecenia żarówki za pomocą zmiany czasu przewodzenia tyrystora.

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z zasadą działania i parametrami tyrystorów i triaków;
- 2) zapoznać się z zasadą działania programu symulacyjnego EWBA;
- 3) zaproponować układ sterowania jasnością żarówki poprzez zmianę czasu przewodzenia tyrystora, włączyć miliamperomierz w obwód anodowy w celu pomiaru średniej wartości prądu I_A ;
- 4) zamodelować układ zasilając żarówkę napięciem przemiennym, podłączyć generator sygnału prostokątnego na bramkę tyrystora;
- 5) obserwować zmiany prądu żarówki zmieniając współczynnik wypełnienia impulsów generatora;
- 6) wyciągnąć wnioski dotyczące przyczyn zmian prądu żarówki (jasności świecenia);
- 7) powtórzyć symulację, zamiast tyrystora włączając do układu triak;
- 8) porównać działanie układów z tyrystorem i triakiem ze względu na jasność świecenia żarówki, wyjaśnić różnice;
- 9) zaprezentować wykonaną symulację i wnioski z ćwiczenia.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- komputer PC,
- oprogramowanie EWB,
- literatura z rozdziału 6.

4.3.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:	Tak	Nie
1) podać parametry charakterystyczne tyrystorów oraz ich przykładowe wartości?	☐	☐
2) podać parametry graniczne tyrystorów oraz ich przykładowe wartości?	☐	☐
3) zaproponować układy pomiarowe do pomiarów charakterystyk i parametrów tyrystora?	☐	☐
4) narysować i wyjaśnić charakterystyki statyczne tyrystora?	☐	☐
5) wyznaczyć wartości napięć i prądów przełączania tyrystora?	☐	☐
6) narysować charakterystyki statyczne triaka?	☐	☐
7) podać przykłady praktycznych układów wyzwalania tyrystorów?	☐	☐
8) sprawdzić czy tyrystor jest sprawny?	☐	☐

4.4. Elementy optoelektroniczne

4.4.1. Materiał nauczania

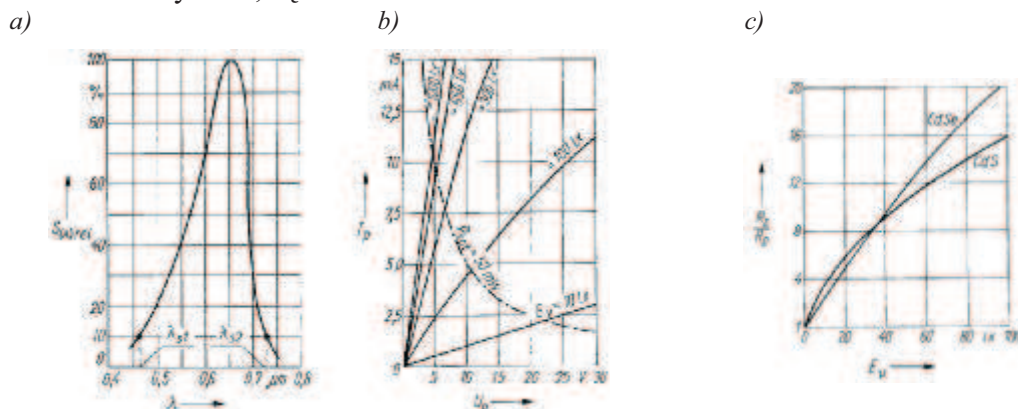
Elementy optoelektroniczne są to elementy przystosowane do pracy w zakresie widzialnym widma promieniowania elektromagnetycznego. Fotelementy mogą być lampowe lub półprzewodnikowe. W fotelementach lampowych (fotokomórka, fotopowielacz) wykorzystywane jest zewnętrzne zjawisko fotoelektryczne, natomiast w półprzewodnikowych – zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne. Elementy wykorzystywane w optoelektronice można podzielić na: fotodetektory, fotoemitery (źródła promieniowania) i transoptory. Dużą grupę elementów optoelektronicznych stanowią wskaźniki odczytowe, do których należą wskaźniki półprzewodnikowe (cyfrowe i alfanumeryczne), wskaźniki ciekłokrystaliczne oraz starszego typu wskaźniki jarzeniowe i elektroluminescencyjne. Symbole graficzne wybranych elementów optoelektronicznych przedstawia Rys. 18.



Rys.18. Symbole półprzewodnikowych elementów optoelektronicznych: a) fotorezystora; b) fotodiody; c) fotodiody lavinowej; d) fotoogniwa; e) fototranzystora; f) diody elektroluminescencyjne [1,s.436]

Półprzewodnikowe detektory promieniowania są elementami fotoczułymi, reagującymi na promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie widzialnym lub podczerwonym. Wykonywane są jako elementy objętościowe (fotorezystory) lub złączowe ze złączem PN (fotodiody, fototranzystory, fototyristory, fotoogniwa itp.). Z wyjątkiem fotoogniwa, które jest przetwornikiem generacyjnym, należą one do przetworników parametrycznych, tzn. zmieniają swoje parametry charakterystyczne pod wpływem padającego na nie strumienia światła, ale wymagają zasilania energią elektryczną z zewnątrz.

Fotorezystory wykonuje się najczęściej z półprzewodników samoistnych lub domieszkowanych. Od materiału półprzewodnikowego zależy zakres widmowy wykrywanego promieniowania, czyli zakres długości fal, dla którego czułość fotorezystora wynosi co najmniej 10% czułości maksymalnej. Charakterystyki fotorezystora: widmowa – Rys.19a, prądowo-napięciowa – Rys.19b oraz oświetlenia – Rys.19c, są nieliniowe.

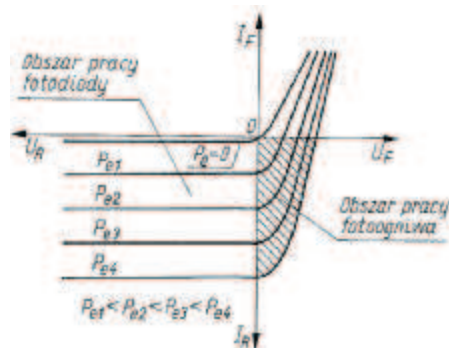


Rys.19. Charakterystyki fotorezystora: a) widmowa; b) prądowo-napięciowa; c) oświetlenia [1,s.440]

Wadami fotorezystorów są: duża bezwładność (graniczna częstotliwość pracy jest rzędu 10Hz), zależność rezystancji ustalonej od „przeszłości” elementu oraz znaczna wrażliwość temperaturowa. Specjalne konstrukcje fotorezystorów z wysokorezystywnego krzemu lub germanu umożliwiają pracę z sygnałami o częstotliwości kilku MHz.

Ze względu na dużą czułość i prosty układ pomiarowy fotorezystory są wykorzystywane do pomiaru temperatury i ostrzegania w systemach przeciwpożarowych, do wykrywania zanieczyszczeń w rzekach i zbiornikach wodnych, do detekcji strat ciepła przez izolację termiczną budynków, do badania zasobów ziemi z samolotów i satelitów oraz do celów wojskowych.

Fotodioda jest najprostszym optoelementem wykorzystującym złącze PN. W czasie normalnej pracy jest spolaryzowana zaporowo, a jej charakterystyka prądowo-napięciowa jest zbliżona do charakterystyki zwykłej diody w kierunku zaporowym – Rys.20. Przy braku oświetlenia płynie przez fotodiodę niewielki prąd ciemny, a po oświetleniu dodatkowo prąd fotoelektryczny, co powoduje, że całkowity prąd jasny oświetlonego złącza znacznie wzrasta.



Rys.20. Charakterystyki prądowo-napięciowe fotodiody [1,s.442]

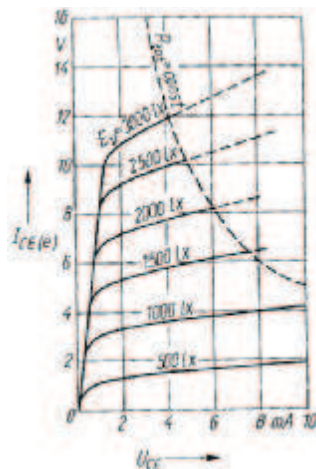
Prąd fotodiody wzrasta proporcjonalnie do mocy promieniowania P_e , a czułość elementu na moc promieniowania (stosunek zmiany prądu do mocy padającego promieniowania) jest stała w szerokim zakresie.

Zaletami fotodiod są: duża częstotliwość pracy (do kilkuset MHz) i stała czułość na moc promieniowania. Fotodiody lawinowe i PIN charakteryzują się znacznie większą czułością i szybkością działania niż „zwykłe” fotodiody. W fotodiodach PIN dwa silnie domieszkowane obszary P i N są rozdzielone szeroką warstwą półprzewodnika samoistnego I, w którym, padające promieniowanie generuje dodatkowe nośniki poruszające się z dużą prędkością, dzięki silnemu polu elektrycznemu istniejącemu przy polaryzacji zaporowej. W fotodiodach lawinowych wykorzystuje się wewnętrzne zjawisko fotoelektryczne oraz zjawisko lawinowego powielania nośników, które powoduje wzmocnienie prądu fotoelektrycznego.

Fotodiody są stosowane w układach pomiarowych wielkości elektrycznych i nieelektrycznych, np. do pomiarów odległości, wymiarów, częstotliwości i amplitudy drgań, naprężeń, stężeń roztworów, w urządzeniach komutacji optycznej, w układach zdalnego sterowania oraz w szybkich przetwornikach A/C.

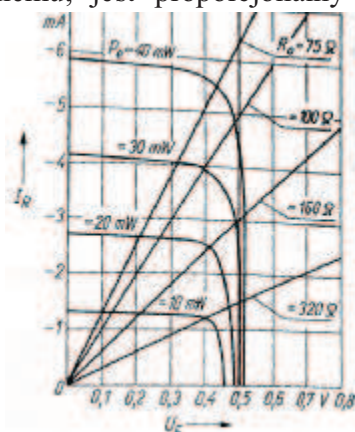
Fototranzystor ma czułość wielokrotnie większą niż czułość fotodiody, ponieważ prąd wytworzony pod wpływem promieniowania jest wzmacniany. Zasada działania i budowa fototranzystora jest podobna do tranzystora bipolarnego, ale sterowanie odbywa się poprzez zmianę oświetlenia bazy. Charakterystykę prądowo-napięciową fototranzystora przedstawia Rys. 21. Wadą fototranzystora jest niezbyt duża częstotliwość graniczna – rzędu kilkudziesięciu kHz. Główne obszary zastosowań fototranzystorów to układy automatyki i zdalnego sterowania, układy

pomiarowe wielkości elektrycznych i nieelektrycznych, przetworniki A/C, układy łączące optoelektronicznych, czynniki taśm i kart kodowych itp.



Rys.21. Charakterystyki wyjściowe fototranzystora w układzie WE [1,s.447]

Fotoogniwo jest elementem generacyjnym (nie wymaga polaryzacji zewnętrznym napięciem), w którym pod wpływem promieniowania powstaje napięcie fotoelektryczne U_p . Prąd zwarcia, równy prądowi fotoelektrycznemu, jest proporcjonalny do natężenia oświetlenia, natomiast



napięcie U_p jest nieliniową (logarytmiczną) funkcją mocy promieniowania – Rys.22.

Rys.22. Charakterystyki prądowo-napięciowe fotoogniwa [1,s.445]

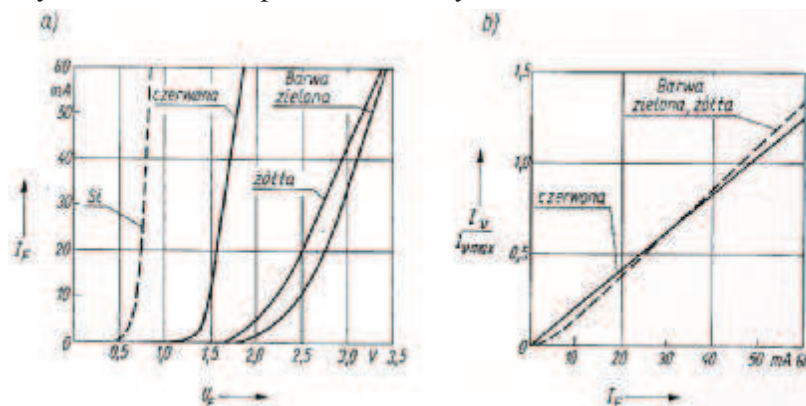
Fotoogniwa dzieli się na: fotoogniwa pomiarowe i fotoogniwa zasilające. Pierwsze pracują jako źródła sygnałów sterowane promieniowaniem w układach pomiaru mocy promieniowania, a drugie jako baterie słoneczne.

Półprzewodnikowe źródła promieniowania – fotoemitery – przekształcają energię elektryczną w energię promieniowania elektromagnetycznego w zakresie widzialnym i podczerwieni.

Diody elektroluminescencyjne – LED – pracują przy polaryzacji w kierunku przewodzenia, a typowe charakterystyki napięciowo-prądowe przypominają charakterystyki zwykłych diod w tym kierunku – Rys.23. Różnica polega na innej wartości napięcia progowego. Kolor świecenia diody LED zależy od rodzaju użytego półprzewodnika, a konkretnie domieszkowania.

Częstotliwości graniczne diod elektroluminescencyjnych wynoszą od kilku do kilkunastu MHz. Stosuje się je jako sygnalizatory stanu urządzenia (włączony/wyłączony), wskaźniki w windach i telefonach, wskaźniki poziomu, jako elementy podświetlające skale i przełączniki, w łączach

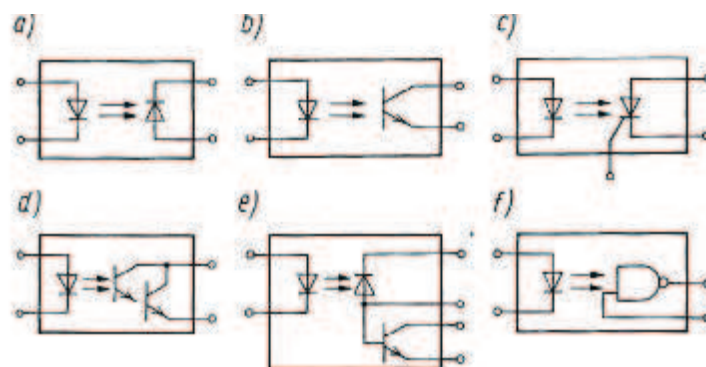
światłowodowych, a także w urządzeniach zdalnego sterowania i in. Diody LED są najbardziej rozpowszechnionymi elementami optoelektronicznymi.



Rys.23. Charakterystyki diody LED: a) napięciowo-prądowe; b) światłości [1,s.452]

Diody OLED to elementy zbudowane z materiałów organicznych, wykorzystujące bardzo efektywne procesy fluorescencji i fosforescencji, dzięki czemu świecą one dużo jaśniej niż tradycyjne diody LED (PHOLED), a także mogą wytwarzać czyste światło białe (WOLED). Zastosowanie technologii polimerowej do ich produkcji pozwala na umieszczanie materiałów świecących na dowolnych, również elastycznych, powierzchniach.

Transoptory to półprzewodnikowe elementy optoelektroniczne składające się co najmniej z jednego fotoemitera i jednego fotodetektora, sprzężonych optycznie i umieszczonych we wspólnej obudowie. Różne rodzaje transoptorów przedstawia Rys.24.



Rys.24. Schematy transoptorów: a) z fotodiodą; b) z fototranzystorem; c) z fototyristorem; d) z fotodarlingtonem; e) z fotodiodą i tranzystorem; f) z bramką NAND [1,s.456]

Parametry transoptora zależą od właściwości jego elementów składowych, tzn. diody LED i fotodetektora. Najważniejszym parametrem transoptora jest współczynnik wzmocnienia prądowego. Transoptor pozwala na przesyłanie sygnałów elektrycznych z wejścia na wyjście bez połączeń galwanicznych obwodów wejściowego i wyjściowego np. w technice wysokich napięć, technice pomiarowej i automatyce, w sprzęcie komputerowym i telekomunikacyjnym. Pełni on także rolę bezstykowych potencjometrów oraz przekaźników optoelektronicznych, a także wyłączników krańcowych, czujników położenia, wskaźników poziomu itp. w układach sygnalizacyjnych i zabezpieczających.

Wskaźniki służą do wyświetlania informacji w postaci cyfr, liter i znaków pomocniczych. Obecnie najczęściej wykorzystywane są wskaźniki półprzewodnikowe i ciekłokrystaliczne.

Wskaźnik półprzewodnikowy to zestaw diod LED umieszczonych we wspólnej obudowie. Ze względu na budowę można wyróżnić wskaźniki segmentowe (cyfrowe) - Rys. 25a i mozaikowe (alfanumeryczne) - Rys.25b.



Rys.25. Struktury wskaźników półprzewodnikowych: a) segmentowe; b) mozaikowe [1,s.458]

Wskaźniki ciekłokrystaliczne – LCD – wykorzystują właściwości ciekłych kryształów, które zmieniają swoją przezroczystość, sterowane za pomocą niewielkich pól elektrycznych. Wskaźniki LCD nie są źródłami światła i muszą być oświetlane światłem zewnętrznym lub wewnętrznym. Wadą tych elementów jest konieczność zasilania napięciem przemiennym oraz duża bezwładność, natomiast podstawową zaletą – bardzo mały pobór mocy.

4.4.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania sprawdzisz czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Jakie znasz elementy optoelektroniczne? Podaj ich przeznaczenie.
2. Co to jest prąd ciemny fotorezystora?
3. Przy jakiej polaryzacji normalnie pracuje fotodioda?
4. Dlaczego fototranzystor może być sterowany słabszym promieniowaniem niż fotodioda?
5. Co to jest prąd jasny fotodiody?
6. Jak jest polaryzowana dioda LED w czasie pracy?
7. Od czego zależy kolor świecenia diody LED?
8. Z jakich optoelementów mogą być zbudowane transoptory?
9. Czym różni się wyświetlacze diodowe od wskaźników LCD?

4.4.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Wyznaczanie charakterystyk statycznych i oświetleniowych fotoelementów.

Sposób wykonania ćwiczenia

Pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych fotoelementów wyznacza się dla ich normalnych stanów pracy. Pomiary polegają na zmierzeniu wartości napięć i prądów przy zasilaniu badanego elementu napięciem regulowanym oraz oświetleniu promieniowaniem o regulowanej jasności.

Uwaga: Przed pomiarami ustal dopuszczalne dla danego elementu natężenie oświetlenia! Przed włączeniem zasilania poproś nauczyciela o sprawdzenie układu pomiarowego!

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z zasadą działania oraz rodzajami i parametrami optoelementów;
- 2) odszukać w katalogu badane elementy, wypisać ich podstawowe parametry oraz oznaczenia końcówek;

3) zaproponować układy pomiarowe do wyznaczania poszczególnych charakterystyk:

- charakterystyka diody LED:

- zmontować układ pomiarowy do pomiaru charakterystyki diody LED w kierunku przewodzenia, dobierając rezystor ograniczający prąd diody I_F tak, aby nie przekroczyć dopuszczalnej wartości, do pomiaru prądu I_F należy użyć miliamperomierza prądu stałego, a do pomiaru napięcia U_{AK} woltomierza napięcia stałego;
- zwiększać napięcie zasilające aż do momentu ustalenia prądu płynącego przez diodę na wartości nominalnej, typowej dla danej diody LED, podanej w katalogu, notować w tabeli zmiany napięcia U_{AK} oraz prądu I_F ;
- wykonać co najmniej 15 pomiarów pamiętając o zagęszczeniu ich, gdy prąd zaczyna gwałtownie rosnąć, wyniki zapisać w tabeli pomiarowej;

Tabela Charakterystyki diod LED

dioda 1		dioda 2		dioda 3	
$U_{AK1}[V]$	$I_{A1}[mA]$	$U_{AK2}[V]$	$I_{A2}[mA]$	$U_{AK3}[V]$	$I_{A3}[mA]$

- powtórzyć pomiary dla dwóch innych diod, wyniki ponownie zanotować w tabeli, każdorazowo opisując kolor badanej diody;

- charakterystyka fotodiody:

- zmontować układ pomiarowy do pomiaru charakterystyki fotodiody w kierunku zaporowym, do pomiaru prądu I_R należy użyć miliamperomierza prądu stałego, a do pomiaru napięcia U_{AK} woltomierza napięcia stałego, a do pomiaru natężenia oświetlenia E - luksomierza;
- zwiększać napięcie polaryzujące diodę od 0 do 10V co 1V przy zaciemnieniu elementu ($E=0$), wyniki (U_{AK} i I) zanotować w tabeli pomiarowej;

Tabela Charakterystyka fotodiody

$E_1=$		$E_2=$		$E_3=$	
$U_{AK1}[V]$	$I_R[mA]$	$U_{AK2}[V]$	$I_R[mA]$	$U_{AK3}[V]$	$I_R[mA]$

- powtórzyć pomiary dla co najmniej dwóch innych natężeń oświetlenia, wyniki zanotować;

- charakterystyki fotorezystora:

- zmontować układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyki oświetleniowej fotorezystora, do pomiaru prądu I_R należy użyć miliamperomierza prądu stałego, do pomiaru napięcia U_R woltomierza napięcia stałego, a do pomiaru natężenia oświetlenia E luksomierza;
- zwiększać natężenie oświetlenia od 0 do np. 500 lx przy ustalonej wartości napięcia U_R np. 10V, wyniki zanotować w tabeli pomiarowej;

Tabela Charakterystyka oświetleniowa i prądowo-napięciowa fotorezystora

$U_R[V]$	$E[lx]$	$I_R[mA]$	$R[\Omega]$

- dokonać obliczenia R dla każdego pomiaru, wyniki umieścić w tabeli;
- zmontować układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyki prądowo-napięciowej fotorezystora, do pomiaru prądu I_R należy użyć miliamperomierza prądu stałego, do

pomiaru napięcia U_R woltomierza napięcia stałego, a do pomiaru natężenia oświetlenia E luksomierza;

l) zmieniając napięcie, przy ustalonej wartości natężenia oświetlenia E , odczytać wartość prądu I_R , wyniki zapisać w tabeli;

- charakterystyka fototranzystora:

m) zmontować układ pomiarowy do wyznaczania wyjściowej charakterystyki prądowo-napięciowej fototranzystora, , dobrać rezystor ograniczający prąd kolektorowy I_C , tak aby nie przekroczyć dopuszczalnej wartości, do pomiaru prądu I_R należy użyć miliamperomierza prądu stałego, do pomiaru napięcia U_R woltomierza napięcia stałego, a do pomiaru natężenia oświetlenia E luksomierza;

n) zwiększać napięcie zasilacza U_{CE} aż do momentu ustabilizowania się prądu kolektora przy ustalonej wartości natężenia oświetlenia np. $E=30$ lx, pamiętając o nie przekroczeniu prądu dopuszczalnego I_{Cmax} , wyniki (zmiany I_C i U_{CE}) zanotować w tabeli;

Tabela Charakterystyka fototranzystora

$E_1=$		$E_2=$		$E_3=$	
$U_{CE1}[V]$	$I_{C1}[mA]$	$U_{CE2}[V]$	$I_{C2}[mA]$	$U_{CE3}[V]$	$I_{C3}[mA]$

o) wykonać co najmniej 15 pomiarów, pamiętając o ich zagęszczeniu, gdy prąd I_C zaczyna gwałtownie rosnąć;

p) powtórzyć pomiary dla dwóch innych natężeń oświetlenia E , wyniki umieścić w tabeli;

- charakterystyka transoptora:

q) zmontować układ pomiarowy do pomiaru charakterystyki przejściowej transoptora z fototranzystorem, dobierając rezystor ograniczający prąd kolektorowy I_C oraz prąd wejściowy I_{FI} tak aby nie przekroczyć dopuszczalnych wartości, do pomiaru prądu I_{FI} należy użyć miliamperomierza prądu stałego, a do pomiaru napięcia U_{AK} i U_{CE} woltomierze napięcia stałego;

r) zanotować zmiany prądu I_A zwiększając napięcie zasilające obwód wejściowy U_{AK} i prądu I_C w tabeli pomiarowej;

Tabela Charakterystyka przejściowa transoptora

$I_A[mA]$	$I_C[mA]$

4) ocenić poprawność wykonania ćwiczenia;

5) stworzyć w programie Excell i wydrukować charakterystyki statyczne badanych optoelementów wykorzystując otrzymane wyniki pomiarów, zaznaczyć na nich parametry charakterystyczne oraz zakresy pracy:

- diod LED $I_A = f(U_{AK})$,
- fotodiody $I_R = (U_R)$ przy różnych wartościach natężenia oświetlenia,
- fotorezystora $R = f(E)$,
- fototranzystora $I_C = f(U_{CE})$ przy różnych wartościach natężenia oświetlenia,
- transoptora $I_C = f(I_A)$;

6) sformułować wnioski dotyczące działania fotoelementów.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- makiety (trenażery) z optoelementami różnych typów do pomiaru ich parametrów i wyznaczania charakterystyk,
- sprzęt pomiarowy: elektroniczne mierniki uniwersalne, zasilacze laboratoryjne stabilizowane, luksomierz,
- katalogi elementów i układów elektronicznych,
- komputer PC,
- program Excel,
- literatura z rozdziału 6.

Ćwiczenie 2

Zastosowanie optoelementów w układach elektronicznych.

Sposób wykonania ćwiczenia

W programie symulacyjnym EWBA zrealizować różne typy transoptorów

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z zasadą działania i parametrami optoelementów;
- 2) zapoznać się z obsługą programu symulacyjnego EWBA;
- 3) zaproponować układ transoptora np. wykorzystując diodę LED i fotodiodę;
- 4) zamodelować układ, włączając miliamperomierze w obwody wejściowy i wyjściowy w celu pomiaru prądów;
- 5) wyciągnąć wnioski dotyczące wzmocnienia;
- 6) powtórzyć symulację dla innych typów transoptora np. dioda LED - fotorezystor, dioda LED – fototranzystor;
- 7) porównać działanie układów uwzględniając wzmocnienie, wyjaśnić różnice;
- 8) zaprezentować wykonaną symulację i wnioski z ćwiczenia.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- komputer PC,
- oprogramowanie EWB,
- literatura z rozdziału 6.

4.4.4. Sprawdzian postępów

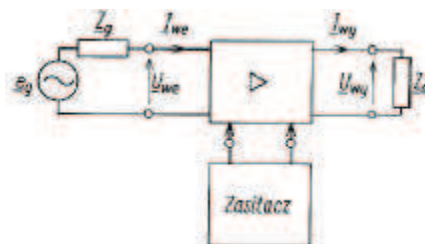
Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) rozróżnić fotoelementy na podstawie wyglądu i liczby końcówek?	☐	☐
2) narysować charakterystyki statyczne optoelementów w zakresach normalnej pracy?	☐	☐
3) podać parametry charakterystyczne optoelementów oraz ich przykładowe wartości?	☐	☐
4) zaproponować układy pomiarowe do pomiarów charakterystyk diod?	☐	☐
5) rozpoznać fotoelementy na podstawie wyników pomiarów?	☐	☐
6) przedstawić układy praktyczne wykorzystujące optoelementy?	☐	☐
7) sprawdzić, czy optoelement jest sprawny?	☐	☐

4.5. Wzmacniacze tranzystorowe

4.5.1. Materiał nauczania

Podstawową funkcją wzmacniacza jest wzmocnienie sygnału, przy zachowaniu nie zmienionego jego kształtu. Wzmocnienie to odbywa się kosztem energii doprowadzonej ze źródła zasilania.



Rys.26. Schemat ogólny wzmacniacza [1,s.144]

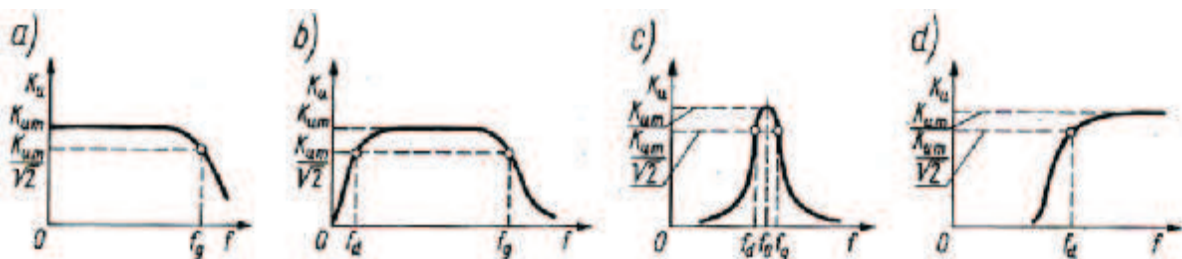
Klasyfikacji wzmacniaczy można dokonać ze względu na różne kryteria:

- rodzaj wzmacnianego sygnału: napięciowe, prądowe, mocy,
- pasmo przenoszonych częstotliwości: stałoprądowe, dolnoprzepustowe, górnoprzepustowe, szerokopasmowe, selektywne, itd. – Rys.27,
- zastosowane elementy: tranzystorowe, lampowe, na układach scalonych,
- liczba stopni wzmacniających: jednostopniowe, wielostopniowe, itd. – Rys.35.

Podstawowe parametry wzmacniaczy to:

- wzmocnienie: napięciowe, prądowe i mocy,
- dolna i górna częstotliwość graniczna oraz pasmo przenoszonych częstotliwości,
- rezystancja wejściowa i wyjściowa,
- sprawność energetyczna,
- zniekształcenia liniowe i nieliniowe.

Właściwości wzmacniacza określa się również na podstawie charakterystyk częstotliwościowych: amplitudowej i fazowej. Do ważnych wielkości charakteryzujących wzmacniacze należą również stałość parametrów i stabilność.



Rys.27. Charakterystyki amplitudowe wzmacniacza: a) prądu stałego; b) szerokopasmowego; c) selektywnego; d) górnoprzepustowego [1,s.148]

We wzmacniaczach rzeczywistych powstają zniekształcenia: liniowe, wywołane niejednakowym przenoszeniem przez wzmacniacz sygnałów o różnych częstotliwościach oraz nieliniowe – wywołane przez nieliniowość charakterystyk statycznych niektórych elementów wzmacniacza. W efekcie stosowania elementów nieliniowych charakterystyka przejściowa wzmacniacza odbiega od teoretycznej linii prostej.

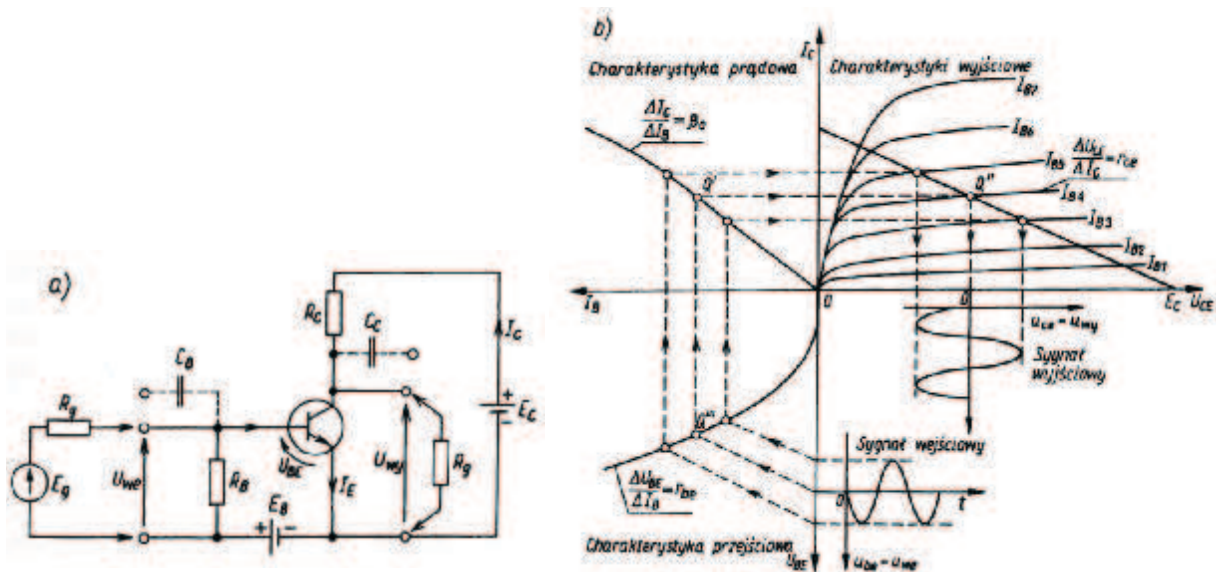
Podstawowa funkcja wzmacniaczy - zwiększanie mocy sygnałów - może być zrealizowana przez zastosowanie w układzie elementów czynnych np. tranzystorów bi- lub unipolarnych. Ponieważ dla wzmacnianego sygnału wzmacniacz stanowi czwórnik, a tranzystory posiadają tylko trzy wyprowadzenia konieczne jest „użycie” jednej z elektrod równocześnie na wejściu i wyjściu. Sposób włączenia tranzystora – Rys.8 i Rys.13, wpływa na właściwości wzmacniacza – Tabela 3 i Tabela 4. Praktyczne zastosowania znalazły trzy układy połączeń dla tranzystorów bipolarnych - WE, WC i WB i dwa dla tranzystorów polowych – WS i WD.

Układ wspólnego emitera WE (OE) – układ, w którym emiter stanowi elektrodę wspólną dla obwodu wejściowego i wyjściowego, sygnał wejściowy doprowadzany jest między emiter i bazę, a obciążenie jest włączone pomiędzy kolektor i emiter.

Układ wspólnego kolektora WC (OC) – układ, w którym kolektor stanowi elektrodę wspólną dla obwodu wejściowego i wyjściowego, sygnał wejściowy doprowadzany jest między bazę i kolektor, a obciążenie jest włączone pomiędzy emiter i kolektor.

Układ wspólnej bazy WB (OB) – układ, w którym baza stanowi elektrodę wspólną dla obwodu wejściowego i wyjściowego, sygnał wejściowy doprowadzany jest między emiter i bazę, a obciążenie jest włączone pomiędzy kolektor i bazę.

Najpowszechniej stosowaną konfiguracją wzmacniaczy zbudowanych na tranzystorach bipolarnych jest układ o wspólnym emiterze – Rys.28a.



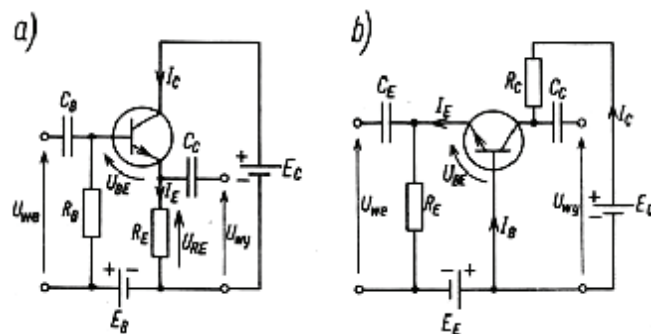
Rys. 28. Wzmacniacz w układzie WE; a) schemat; b) ilustracja działania [1,s.151]

Źródła napięć stałych E_C i E_B służą do polaryzacji złącz emiterowego i kolektorowego tranzystora, tak aby znajdował się on w stanie aktywnym. Sygnał wejściowy doprowadzany jest pomiędzy bazę i emiter, a sygnał wyjściowy pobierany z kolektora. Zmiana prądu bazy spowoduje zmianę prądu kolektora, a ponieważ charakterystyki tranzystora w zakresie aktywnym mają przebieg prawie poziomy można przyjąć, że prąd I_C zależy tylko od I_B , a nie zależy od U_{CE} . Korzystając z II prawa Kirchhoffa dla obwodu wyjściowego można stwierdzić, że zmiana prądu kolektora spowoduje zmianę napięcia wyjściowego U_{CE} w ten sposób, że wzrost I_C spowoduje zmniejszenie U_{CE} , a zmniejszenie I_C zwiększy napięcie U_{CE} . Ponieważ $I_E \approx I_C$, oznacza to, że układ WE odwraca fazę sygnału. Działanie wzmacniacza przy wejściowym sygnale sinusoidalnym przedstawia Rys. 28b, a punkt Q jest punktem pracy układu, którego położenie

zależy od wartości napięć i prądów stałych. polaryzujących tranzystor. Parametry układu WE zostały zebrane w tabeli 2.

Układ o wspólnym kolektorze WC – Rys.29a, nazywany jest wtórnikiem emiterowym, ponieważ napięcie wyjściowe U_{CB} „wtóruje” napięciu wejściowemu, tzn. pomijając niewielkie zmiany napięcia U_{BE} , $U_{WY} \approx U_{WE}$, co oznacza również, że układ nie odwraca fazy. Pozostałe parametry wzmacniacza w układzie WC zestawiono w Tabeli 2.

Układ o wspólnej bazie WB obecnie wykorzystywany jest głównie we wzmacniaczach wielkich częstotliwości, ze względu na stabilność pracy i znacznie szersze niż pozostałe układy pasmo przenoszonych sygnałów.



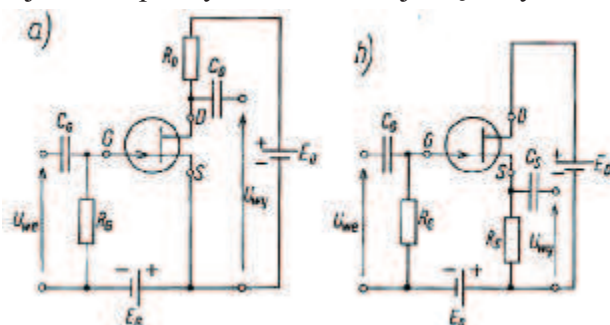
Rys.29. Schematy wzmacniacza z tranzystorami bipolarnymi: a) w układzie WC; b) w układzie WB [1,s.155]

Podsumowując, można stwierdzić, że duże wzmocnienie napięciowe wykazują układy WE i WB, duże wzmocnienie prądowe charakteryzuje układy WE i WC, największe wzmocnienie mocy posiada układ WE, a najlepsze właściwości częstotliwościowe układ WB. Ze względu na impedancje (największą wejściową i najmniejszą wyjściową) najlepsze właściwości posiada układ WC, co powoduje, że jest często stosowany jako układ dopasowujący.

Tabela 2 Parametry podstawowych układów wzmacniających z tranzystorem bipolarnym [1,s.154]

Układ / Parametr	WE		WC		WB	
	wzór	wartość liczbową	wzór	wartość liczbową	wzór	wartość liczbową
Rezystancja wejściowa r_{we}	$r_{we} \approx r_{be} \parallel R_B$	ok. 1,7 kΩ	$r_{we} \approx (\beta_0 + 1) R_E \parallel R_B$	201 kΩ 10 kΩ (ok. 10 kΩ)	$r_{we} \approx \frac{r_{be}}{\beta_0 + 1} \parallel R_E$	ok. 10 Ω
Rezystancja wyjściowa r_{wy}	$r_{wy} \approx r_{ce} \parallel R_C$	ok. 4,5 kΩ	$r_{wy} \approx \frac{r_{be} + R_B}{(\beta_0 + 1)} \parallel R_E$	ok. 59 Ω	$r_{wy} \approx r_{ce} (\beta_0 + 1) \parallel R_C$	ok. 10 MΩ 5 kΩ (ok. 5 kΩ)
Wzmocnienie napięciowe K_u	$K_u \approx \beta_0 \frac{r_{ce} \parallel R_C}{r_{be}}$	-450 V/V	$K_u \approx 1$	ok. 1 V/V	$K_u = \beta_0 \frac{R_C}{r_{be}}$	ok. 500 V/V
Wzmocnienie prądowe K_i	$K_i \approx -\beta_0 \frac{r_{wy}}{r_{wy} + R_C}$ $R_C \rightarrow 0; K_i \rightarrow -\beta_0$	-62 A/A	$K_i \approx (\beta_0 + 1) \frac{R_B}{R_E + R_C}$ $R_C \rightarrow 0; K_i \rightarrow \beta_0 + 1$	ok. 18 A/A	$K_i = \alpha_0 \frac{r_{wy}}{r_{wy} + R_C}$ $R_C \rightarrow 0; K_i \rightarrow \alpha_0$	ok. 0,3 A/A
$\beta_0 = 200; \alpha_0 = 0,995; r_{be} = 2 \text{ k}\Omega; r_{ce} = 50 \text{ k}\Omega; R_B = 10 \text{ k}\Omega; R_C = 5 \text{ k}\Omega; R_E = 1 \text{ k}\Omega; R_C = 10 \text{ k}\Omega$						

Odpowiednikami konfiguracji WE, WC i WB dla tranzystorów unipolarnych są układy WS, WD i WG, ale układu wspólnej bramki praktycznie nie stosuje się – Rys.30.



Rys. 30. Schematy wzmacniaczy z tranzystorami unipolarnymi; a) układ WS; b) układ WD [1,s.158]

Podstawowe parametry wzmacniaczy zbudowanych na tranzystorach polowych zawiera Tabela 3.

Tabela 3 Parametry podstawowych układów wzmacniających z tranzystorami unipolarnymi [1,s.159]

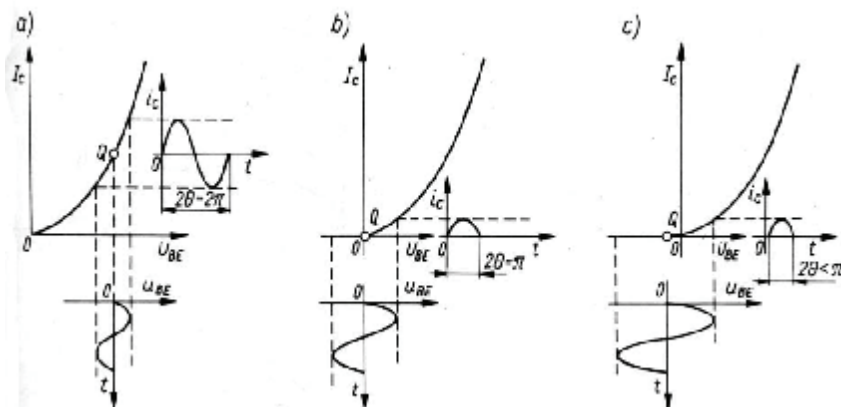
Układ	WS		WD	
	wzór	wartość liczbową	wzór	wartość liczbową
Rezystancja wejściowa r_{we}	$r_{we} \approx r_{gs} \parallel R_G$	1 GΩ 2 MΩ	$r_{we} \approx (1 + g_m R_s) r_{gs} \parallel R_G$	3,5 GΩ 20 MΩ
Raktancja wejściowa X_{we}	$ X_{we} = \frac{1}{\omega C_{we}}$ $C_{we} = C_{gs} + C_{gs}(1 + K_u)$	ok. 250 kΩ ok. 32 pF	$ X_{we} = \frac{1}{\omega C_{we}}$ $C_{we} = C_{gd} + (1 - K_u)$	ok. 2,3 MΩ ok. 3,5 pF
Rezystancja wyjściowa r_{wy}	$r_{wy} \approx r_{ds} \parallel R_D$	200 kΩ 5 kΩ	$r_{wy} \approx \frac{R_s}{(1 + g_m R_s)}$	ok. 286 Ω
Wzmocnienie napięciowe K_u	$K_u = -g_m R_D \parallel r_{ds}$ $R_D \rightarrow \infty; K_u \rightarrow -g_m r_{ds}$	ok. -12,2	$K_u \approx \frac{1}{1 + \frac{1}{g_m R_s}}$ $R_s \rightarrow \infty; K_u \rightarrow 1$	ok. 0,7
$g_m = 2,5 \text{ mA/V}; r_{ds} = 200 \text{ k}\Omega; r_{gs} = 1 \text{ G}\Omega; C_{ds} = 0,5 \text{ pF}; C_{gs} = 5 \text{ pF}; C_{gd} = 2 \text{ pF}; R_G = 2 \text{ M}\Omega; R_D = 5 \text{ k}\Omega; R_s = 1 \text{ k}\Omega; f = 20 \text{ kHz}$				

Analiza danych w tabelach pozwala porównać układy WS i WD, ale także porównać układy zrealizowane na tranzystorach bipolarnych z układami na tranzystorach polowych.

Układ WS ma duże wzmocnienie napięciowe, ale mniejsze niż WE w podobnym układzie, wtórnik źródłowy WD ma, podobnie jak WC, wzmocnienie napięciowe mniejsze od jedności i nie odwraca fazy. Rezystancja wejściowa obu układów na tranzystorach polowych jest bardzo duża (znacznie większa niż w układach z tranzystorami bipolarnymi), przy czym dla WD znacznie większa niż WS. Wtórnik źródłowy, podobnie jak wtórnik emiterowy, spełnia wymagania układu dopasowującego. Ze względu na bardzo duże wartości rezystancji wejściowej i małe szумы, wzmacniacze z tranzystorami unipolarnymi są najczęściej stosowane jako stopnie wejściowe układów wielostopniowych.

Aby wzmacniacz mógł spełniać swoje podstawowe zadanie, tzn. wzmacniać sygnały, muszą być stworzone odpowiednie warunki do przenoszenia sygnału przez układ. Realizowane jest to przez odpowiednią polaryzację elektrod tranzystorów, tzn. ustalenie statycznego punktu pracy elementu za pomocą obwodów zasilających. Wybór i stabilizacja punktu pracy jest bardzo istotna, ponieważ nawet niewielkie zmiany mogą skutkować wyraźną zmianą niektórych parametrów wzmacniacza np. wzmocnienia, rezystancji wejściowej, rezystancji wyjściowej. Zależnie od położenia punktu pracy na charakterystyce wyjściowej wzmacniacza dzieli się na klasy: A, AB, B oraz C.

Klasa A charakteryzuje się tym, że prąd wyjściowy płynie przez cały okres sygnału wejściowego, a więc kąt przepływu prądu $2\Theta = 2\pi$. Statyczny punkt pracy Q tranzystora leży na prawie prostolinijnym odcinku charakterystyki przenoszenia $I_C = f(U_{BE})$ – Rys.31a.



Rys. 31. Położenie statycznego punktu pracy Q wzmacniaczy: a) klasy A; b) klasy B; c) klasy C [1,s.161]

W **klasie B** prąd płynie w przybliżeniu tylko przez pół okresu sygnału wejściowego, więc kąt przepływu prądu $2\Theta \approx \pi$. Punkt pracy leży w pobliżu granicy odcięcia prądu, więc układ przenosi tylko jedną półfalię sygnału wejściowego - Rys.31b. Aby wzmacniacz mógł przenosić całą sinusoidę sygnału wejściowego konieczne jest zastosowanie drugiego elementu aktywnego dla drugiej półfali.

W **klasie C** punkt pracy leży w zakresie odcięcia, tzn. kąt przepływu prądu $2\Theta < \pi$, co oznacza, że sygnał wyjściowy jest znacznie zniekształcony, a przenoszona jest tylko część jednej półfali - Rys.31c.

Klasa AB jest klasą pośrednią pomiędzy klasami A i B, a kąt przepływu prądu zawiera się pomiędzy π a 2π .

We wzmacniaczach napięciowych stosuje się głównie klasę A, we wzmacniaczach mocy – klasę B i AB, a we wzmacniaczach w.cz. klasę C. Oznacza to odpowiedni dobór spoczynkowego punktu pracy Q, czyli ustalenia właściwych wartości I_C i U_{CE} , ponieważ wartość U_{BE} jest w przybliżeniu stała i dla tranzystorów krzemowych wynosi 0,6-0,7V. Przy wyborze punktu pracy w zakresie aktywnym stosuje się szereg kryteriów, np. uzyskanie maksymalnego zakresu dynamicznego lub maksymalnej mocy wyjściowej.

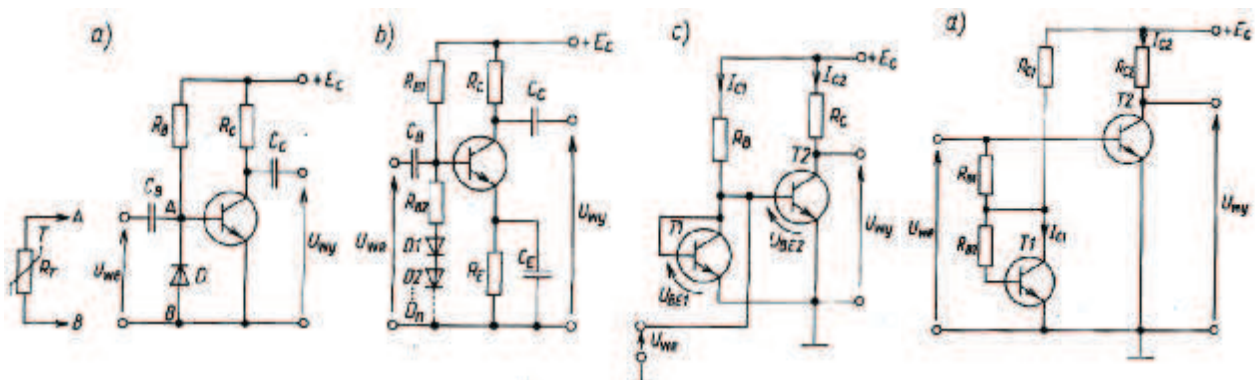
Sposób zasilania tranzystora jest określony sposobem polaryzacji złącz: złącza emiterowego w kierunku przewodzenia i złącza kolektor-baza, zaporowo. Można to zrobić w kilku różnych układach: układzie polaryzacji stałym prądem bazy, układzie potencjometrycznym (z dzielnikiem napięcia na bazie) i układzie ze stałym prądem emitera. Układy te nie zapewniają jednak stałości punktu pracy. Mniejszą niestaość uzyskuje się w układach przedstawionych w Tabeli 4.

Poprawa stałości punktu pracy następuje kosztem zmniejszenia wzmocnienia dla sygnałów stałych. Dla sygnałów zmiennych wadę tę usuwa się poprzez włączenie kondensatorów równolegle do rezystorów emiterowych – Tabela 4, układ 1 i 2, lub bazowych – Tabela 4, układ 3.

Tabela 4 Wpływ układu polaryzacji tranzystora na niestalość punktu pracy [1,s.164]

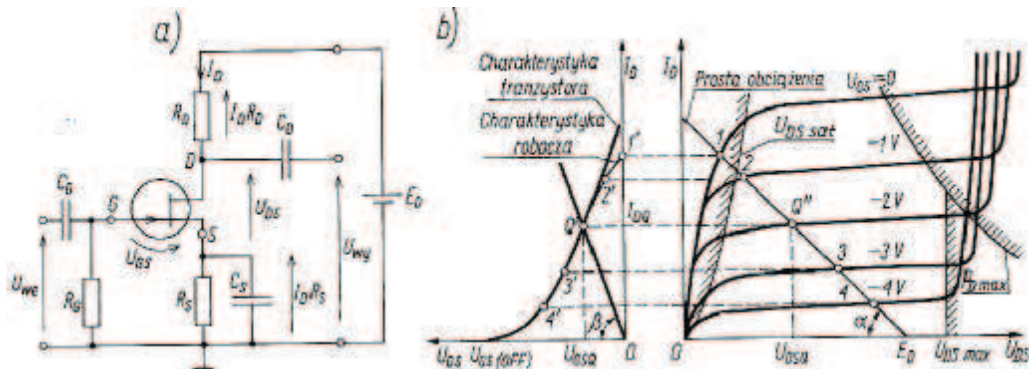
Układ ze sprzężeniem emiterowym	Układ potencjometryczny ze sprzężeniem emiterowym	Układ ze sprzężeniem kolektorowym
$R'_B = R_B$	$R'_B = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$	$R'_B = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2} + R_C}$
$R'_C = R_C$	$R'_C = R_C$	$R'_C = \frac{R_{B1} R_C}{R_{B1} + R_{B2} + R_C}$
$R'_E = R_E$	$R'_E = R_E$	$R'_E = \frac{R_{B2} R_C}{R_{B1} + R_{B2} + R_C}$
$E'_C = E_C$	$E'_C = E_C$	$E'_C = E_C \frac{R_{B1} - R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2} + R_C}$

Położenie wybranego punktu pracy tranzystora bipolarnego silnie zależy od temperatury ze względu na zależność temperaturową prądu zerowego tranzystora I_{CB0} , napięcia baza-emiter U_{BE} i współczynnika wzmocnienia prądowego β . Dryft temperaturowy prądu kolektora wynika z sumy zmian tych parametrów tranzystora i jest rzędu $\mu A/K$. Nawet najlepsza stabilizacja punktu pracy nie zabezpiecza całkowicie przed wpływem zmian temperatury na prąd kolektora, dlatego konieczne jest stosowanie nieliniowych elementów kompensujących zmiany prądu I_{CB0} i napięcia U_{BE} – Rys.32.



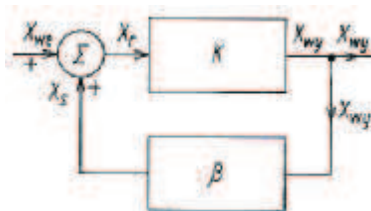
Rys. 32. Schematy układów kompensacji temperaturowej tranzystora bipolarnego: a) kompensacja diodowa zmian I_{CB0} ; b) kompensacja diodowa zmian U_{BE} ; c), d) kompensacja tranzystorowa [1,s.166]

Zasilanie tranzystorów unipolarnych jest prostsze niż tranzystorów bipolarnych ponieważ w normalnych warunkach pracy praktycznie nie płynie prąd elektrody sterującej, czyli bramki. Najprostszy układ zasilania stosowany jest dla tranzystorów złączowych JFET – Rys.33a. Taki sposób polaryzacji bramki nazywa się polaryzacją automatyczną, gdyż wzrost prądu drenu powoduje zwiększanie ujemnego potencjału bramki względem źródła i zahamowanie wzrostu prądu.



Rys.33. Zasilanie tranzystora unipolarnego JFET: a) schemat układu; b) położenie punktu pracy na charakterystykach wejściowych i wyjściowych [1,s.169]

W układach elektronicznych sprzężenie zwrotne polega na przekazywaniu części sygnału wyjściowego, z wyjścia na wejście, gdzie sumuje się on z sygnałem wejściowym, zmieniając właściwości układu.



Rys. 34. Schemat wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym [1,s.176]

Sygnały X mogą być napięciami, prądami lub innymi wielkościami fizycznymi. Sprzężenie zwrotne zmienia wartość wzmocnienia, przy czym zależnie od rodzaju wprowadzonej zmiany można wyróżnić trzy przypadki:

1. Jeżeli $|1-K\beta| > 1$ następuje zmniejszenie wzmocnienia, a sprzężenie nazywa się ujemnym.
2. Jeżeli $0 < |1-K\beta| < 1$ następuje zwiększenie wzmocnienia, sprzężenie określa się jako dodatnie.
3. Jeżeli $|1-K\beta| \approx 0$, to wzmacniacz będzie niestabilny i będzie generował drgania, tzn. stanie się generatorem ze sprzężeniem zwrotnym.

Jeżeli wzmocnienie K wzmacniacza jest bardzo duże, to wzmocnienie układu ze sprzężeniem $K_f \approx -1/\beta$ i o parametrach układu decyduje człon sprzężenia zwrotnego.

We wzmacniaczach stosuje się głównie ujemne sprzężenie zwrotne, które ma wiele zalet:

- zmniejsza wrażliwość układu na zmiany parametrów elementów, warunków zasilania, czynników zewnętrznych itp.,
- zmniejsza zniekształcenia nieliniowe, zakłócenia i szumy,
- umożliwia rozszerzenie pasma przenoszenia wzmacniacza i kształtowanie pożądanych charakterystyk częstotliwościowych,
- umożliwia zmiany wartości impedancji wejściowej i wyjściowej.

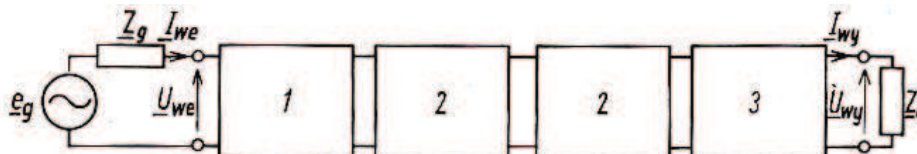
Zalety te uzyskuje się kosztem zmniejszenia wzmocnienia i stabilności układu w pewnych zakresach częstotliwości.

Rodzaj i właściwości sprzężenia zwrotnego zależą od sposobu pobierania sygnału z wyjścia oraz sposobu podawania go na wejście. Można w związku z tym wyróżnić sprzężenia: napięciowe i prądowe, ze względu na sposób pobierania sygnału z wyjścia oraz sprzężenia: szeregowo i równoległe, ze względu na sposób wprowadzenia sygnału na wejście wzmacniacza. Wpływ różnego typu sprzężeń zwrotnych na parametry wzmacniacza przedstawia Tabela 6.

Tabela 5 Wpływ ujemnego sprzężenia zwrotnego na parametry wzmacniacza [2,s.57]

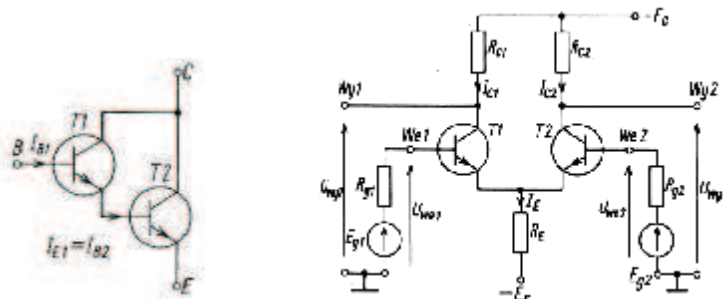
Rodzaj sprzężenia	szeregowe prądowe	szeregowe napięciowe	równoległe prądowe	równoległe napięciowe
Parametr				
wzmocnienie napięciowe	maleje	maleje	stałe	stałe
wzmocnienie prądowe	stałe	stałe	maleje	maleje
impedancja wejściowa	wzrasta	wzrasta	maleje	maleje
impedancja wyjściowa	wzrasta	maleje	wzrasta	maleje

Wzmocnienia – zarówno napięciowe, jak i prądowe – jednostopniowych wzmacniaczy są niezbyt duże, więc gdy potrzebne są większe wzmocnienia, stosuje się wzmacniacze wielostopniowe – Rys.35. Liczba stopni wzmacniających zależy od wymaganego wzmocnienia, szerokości pasma, stabilności układu itp.



Rys. 35. Kaskadowe połączenie stopni wzmacniających: 1 – wzmacniacz wstępny; 2 – wzmacniacz pośredni; 3 – wzmacniacz wyjściowy [1,s.148]

Wzmocnienie takiego wzmacniacza jest iloczynem wzmocnień poszczególnych stopni, a na przesunięcie fazowe całego układu składa się algebraiczna suma przesunięć fazowych poszczególnych stopni. Często stosowane są układy wzmacniaczy dwutranzystorowych np. układ Darlingtona, wzmacniacz różnicowy, kaskoda itd. – Rys.36.



Rys.36. Układy wzmacniaczy wielostopniowych: a) układ Darlingtona; b) wzmacniacz różnicowy [1,s.171,174]

Kolejne stopnie wzmacniaczy wielostopniowych mogą być połączone ze sobą bezpośrednio, co umożliwia wzmacnianie przebiegów wolnozmiennych łącznie ze składową stałą lub posiadać sprzężenie pojemnościowe eliminujące składową stałą.

Wzmacniacze różnicowe stanowią podstawę większości obecnie produkowanych monolitycznych wzmacniaczy operacyjnych.

4.5.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania sprawdzisz czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Według jakich kryteriów można klasyfikować wzmacniacze?
2. Jakie są podstawowe parametry wzmacniaczy?
3. W jakich układach wzmacniających może pracować tranzystor bipolarny? Podaj podstawowe schematy i właściwości.
4. W jaki sposób zapewnia się wymagany statyczny punkt pracy we wzmacniaczach z tranzystorami bipolarnymi?
5. Jakie układy pracy tranzystorów unipolarnych są praktycznie stosowane?
6. Jakie są podstawowe różnice pomiędzy wzmacniaczami w układzie WS i WD?
7. Co oznacza określenie: automatyczna polaryzacja bramki?
8. Jaki wpływ ma sprzężenie zwrotne na parametry wzmacniacza?
9. Czym różnią się wzmacniacze mocy pracujące w różnych klasach?
10. W jakim celu realizowane są wzmacniacze wielostopniowe?

4.5.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Badanie wzmacniaczy tranzystorowych w podstawowych układach pracy.

Sposób wykonania ćwiczenia

Pomiary polegają na wyznaczeniu charakterystyk przejściowych oraz charakterystyk amplitudowych wzmacniaczy na tranzystorach bipolarnych i unipolarnych w podstawowych układach pracy: WE, WC, WB, WS i WD oraz wyznaczeniu niektórych parametrów układów: rezystancji wejściowej, rezystancji wyjściowej i napięcia przesterowania. Pomiary wykonywane są dla prądów zmiennych.

Uwaga: Przed włączeniem zasilania poproś nauczyciela o sprawdzenie układów pomiarowych!

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z rodzajami, parametrami i schematami wzmacniaczy tranzystorowych przed przystąpieniem do ćwiczenia;
- 2) zaproponować układy pomiarowe do wyznaczania poszczególnych charakterystyk wzmacniaczy na tranzystorach bipolarnych w różnych układach pracy;
- 3) zaproponować układy pomiarowe do wyznaczania poszczególnych charakterystyk wzmacniaczy na tranzystorach polowych w różnych układach pracy;

- charakterystyki przejściowe i amplitudowe:

- 4) zmontować układ pomiarowy na podstawie zaproponowanego schematu dla pierwszego wzmacniacza;
- 5) podłączyć generator napięcia sinusoidalnego na wejście układu, do wejścia i wyjścia podłączyć woltomierze napięcia przemiennego, a dodatkowo dla kontroli kształtu napięcia wyjściowego – oscyloskop;
- 6) zwiększać amplitudę napięcia wejściowego od 0 aż do napięcia przesterowania tzn. napięcia przy którym sygnał wyjściowy zacznie ulegać zniekształceniu po ustaleniu stałej częstotliwości sygnału wejściowego $f=1\text{kHz}$, wyniki – U_{WE} , U_{WY} , oraz napięcie przesterowania odnotować w tabeli pomiarowej;

Tabela Charakterystyki przejściowe wzmacniaczy na tranzystorach bipolarnych

WE		WC		WB	
$U_{WE}[\text{V}]$	$U_{WY}[\text{V}]$	$U_{WE}[\text{V}]$	$U_{WY}[\text{V}]$	$U_{WE}[\text{V}]$	$U_{WY}[\text{V}]$

Tabela Charakterystyki przejściowe wzmacniaczy na tranzystorach unipolarnych

WS		WD	
$U_{WE}[\text{V}]$	$U_{WY}[\text{V}]$	$U_{WE}[\text{V}]$	$U_{WY}[\text{V}]$

- 7) ustalić amplitudę sygnału generatora wejściowego w tym samym układzie pomiarowym, tak aby sygnał wyjściowy nie był zniekształcony (U_{WE} mniejsze od napięcia przesterowania), a następnie zwiększać częstotliwość sygnału z generatora od 0 aż do wartości, przy której amplituda sygnału wyjściowego spadnie co najmniej do połowy wartości maksymalnej,
- 8) wykonać co najmniej 30 pomiarów, pamiętając o ich zagęszczaniu na zagięciach charakterystyki, wyniki zanotować w tabeli pomiarowej;

Tabela Charakterystyki amplitudowe wzmacniaczy na tranzystorach bipolarnych

$f[\text{Hz}]$	WE			WC			WB		
	$U_{WY}[\text{V}]$	$k_U[\text{V/V}]$	$k_U[\text{dB}]$	$U_{WY}[\text{V}]$	$k_U[\text{V/V}]$	$k_U[\text{dB}]$	$U_{WY}[\text{V}]$	$k_U[\text{V/V}]$	$k_U[\text{dB}]$

Tabela Charakterystyki amplitudowe wzmacniaczy na tranzystorach unipolarnych

$f[\text{Hz}]$	WS			WD		
	$U_{WY}[\text{V}]$	$k_U[\text{V/V}]$	$k_U[\text{dB}]$	$U_{WY}[\text{V}]$	$k_U[\text{V/V}]$	$k_U[\text{dB}]$

- 9) wykonać pomiary dla pozostałych układów wzmacniaczy tranzystorowych zapisując wyniki w tabelach pomiarowych;
- 10) narysować charakterystyki przejściowe wzmacniaczy $U_{WY}=f(U_{WE})$ na podstawie wyników pomiarów, wskazać napięcia przesterowania;
- 11) narysować charakterystyki amplitudowe wzmacniaczy $U_{WY}=f(f)$ na podstawie wyników pomiarów, obliczyć wzmocnienia układów $k_U[\text{V/V}]$ i $k_U[\text{dB}]$ oraz wyznaczyć częstotliwości graniczne dolną f_d i górną f_g i pasmo przenoszenia każdego układu;

- rezystancja wejściowa i wyjściowa układów wzmacniaczy:

- 12) zmontować układ pomiarowy na podstawie zaproponowanego schematu dla pierwszego wzmacniacza podłączając szeregowo do wejścia układu rezystor dekadowy ($200\text{k}\Omega$ dla układów na tranzystorach bipolarnych i $20\text{M}\Omega$ dla tranzystorów polowych), a do wyjścia woltomierz napięcia przemiennego i oscyloskop;
- 13) zwiększać rezystancję rezystora dekadowego od zera aż do wartości, przy której napięcie wyjściowe zmaleje dwukrotnie przy ustalonej wartości napięcia wejściowego (U_{WE} mniejsze od napięcia przesterowania) i częstotliwości ($f=1\text{kHz}$) sygnału wejściowego, zwracać uwagę aby nie wystąpiło zniekształcenie sygnału wyjściowego;
- 14) zanotować wartość rezystancji rezystora dekadowego dla zmniejszonego dwukrotnie napięcia wyjściowego, jest to R_{WE} układu;
- 15) zmontować układ pomiarowy na podstawie zaproponowanego schematu dla badanego wzmacniacza podłączając równolegle do wyjścia układu rezystor dekadowy oraz woltomierz napięcia przemiennego i oscyloskop;
- 16) zmniejszać rezystancję rezystora dekadowego od wartości maksymalnej aż do wartości, przy której napięcie wyjściowe zmaleje dwukrotnie przy ustalonej wartości napięcia (U_{WE} mniejsze od napięcia przesterowania) i częstotliwości ($f=1\text{kHz}$) sygnału wejściowego, zwracać uwagę, aby nie wystąpiło zniekształcenie sygnału wyjściowego;
- 17) zanotować wartość rezystancji rezystora dekadowego dla zmniejszonego dwukrotnie napięcia wyjściowego, jest to R_{WY} układu;
- 18) dokonać oceny poprawności wykonania ćwiczenia;
- 19) sformułować wnioski na podstawie charakterystyk i wyznaczonych parametrów wzmacniaczy;
- 20) porównać wzmacniacze na tranzystorach bipolarnych i unipolarnych.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- makiety (trenażery) ze wzmacniaczami tranzystorowymi bipolarnymi w różnych układach pracy do pomiaru ich parametrów i wyznaczania charakterystyk,
- makiety (trenażery) ze wzmacniaczami na tranzystorach unipolarnych w różnych układach pracy do pomiaru ich parametrów i wyznaczania charakterystyk,
- sprzęt pomiarowy: elektroniczne mierniki uniwersalne, zasilacze laboratoryjne stabilizowane, generator regulowany napięcia sinusoidalnego,
- katalogi elementów i układów elektronicznych,
- literatura z rozdziału 6.

Ćwiczenie 2

Symulacja działania wzmacniaczy tranzystorowych ze sprzężeniem zwrotnym.

Sposób wykonania ćwiczenia

W programie symulacyjnym EWB zrealizować układ wzmacniacza w układzie WE zasilanego potencjometrycznie ze sprzężeniem emiterowym dla różnych wartości rezystora w sprzężeniu oraz wzmacniacza w układzie WE zasilanego potencjometrycznie ze sprzężeniem kolektorowym dla różnych wartości rezystancji w sprzężeniu. Na podstawie wyników symulacji wyznaczyć wzmocnienia napięciowe układów przy różnych sprzężeniach. Badanie wykonywać dla sygnałów zmiennych.

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z zasadą działania wzmacniaczy ze sprzężeniem zwrotnym;
- 2) zapoznać się z zasadą działania programu symulacyjnego EWB,
- 3) zaproponować układ do pomiaru charakterystyki przenoszenia i parametrów wzmacniacza WE z emiterowym sprzężeniem zwrotnym, włączając na wejście i wyjście układu woltomierze napięcia przemiennego, a na wyjście dodatkowo oscyloskop;
- 4) zamodelować układ podłączając generator sygnału przemiennego na wejście wzmacniacza, przyjmując, w pierwszym układzie, niewielką wartość rezystora emiterowego;
- 5) obserwować zmiany amplitudy sygnału wejściowego zmieniając wartość napięcia generatora, zwrócić uwagę aby nie przesterować wzmacniacza, określić wzmocnienie układu;
- 6) powtórzyć pomiary dla co najmniej dwóch innych wartości rezystora emiterowego;
- 7) wyciągnąć wnioski dotyczące wpływu sprzężenia emiterowego na właściwości wzmacniacza układzie WE;
- 8) zaproponować układ do pomiaru charakterystyki przenoszenia i parametrów wzmacniacza WE z kolektorowym sprzężeniem zwrotnym;
- 9) zamodelować układ i wykonać pomiary jak dla układu ze sprzężeniem emiterowym, przyjmując trzy wartości rezystora w sprzężeniu;
- 10) wyciągnąć wnioski dotyczące wpływu sprzężenia kolektorowego na właściwości wzmacniacza w układzie WE;
- 11) porównać właściwości wzmacniaczy WE ze sprzężeniem emiterowym i kolektorowym;
- 12) dokonać oceny poprawności wykonania ćwiczenia;
- 13) zaprezentować wykonaną symulację i wnioski z ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- komputer PC,
- oprogramowanie EWB,
- literatura z rozdziału 6.

Ćwiczenie 3

Prezentacja właściwości wzmacniaczy mocy w podstawowych klasach pracy.

Sposób wykonania ćwiczenia

Ćwiczenie polega na obserwacji przebiegów wzmacniaczy mocy w klasie A, B, AB i C.

Pomiary wykonywane są dla prądów zmiennych.

Uwaga: Przed włączeniem zasilania poproś nauczyciela o sprawdzenie układów pomiarowych!

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z rodzajami, parametrami i schematami wzmacniaczy mocy przed przystąpieniem do ćwiczenia;
- 2) zaproponować układy pomiarowe do obserwacji przebiegów na wyjściach wzmacniaczy mocy w różnych klasach pracy, ustalić statyczny punkt pracy tranzystora, odpowiedni do klasy pracy układu;
- 3) zmontować układ pomiarowy na podstawie zaproponowanego schematu dla wzmacniacza klasy A, na wejście układu podłączyć generator napięcia sinusoidalnego, do wyjścia podłączyć oscyloskop;

- 4) dokonać obserwacji przebiegów wyjściowych, przerysować oscylogramy, określić kąt przepływu prądu, podając sygnał wejściowy zwrócić uwagę, aby nie przekroczyć napięcia przesterowania,;
- 5) zmontować układy pomiarowe na podstawie zaproponowanych schematów dla wzmacniaczy mocy klas B, AB i C, dokonać obserwacji przebiegów wyjściowych, przerysować oscylogramy oraz określić kąt przepływu prądu dla wszystkich klas pracy;
- 6) ocenić poprawność wykonania ćwiczenia;
- 7) sformułować wnioski dotyczące działania wzmacniaczy mocy w różnych klasach.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- makiety (trenażery) ze wzmacniaczami mocy w różnych układach pracy do pomiaru ich parametrów lub wzmacniacz w układzie WE z możliwością zmiany położenia statycznego punktu pracy,
- sprzęt pomiarowy: elektroniczne mierniki uniwersalne, zasilacze laboratoryjne stabilizowane, generator regulowany napięcia sinusoidalnego, oscyloskop,
- katalogi elementów i układów elektronicznych,
- literatura z rozdziału 6.

4.5.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:	Tak	Nie
1) rozróżnić wzmacniacze w różnych układach pracy na podstawie schematu?	☐	☐
2) zaproponować układy pomiarowe do pomiarów charakterystyk wzmacniaczy tranzystorowych w różnych układach pracy?	☐	☐
3) podać parametry charakterystyczne wzmacniaczy tranzystorowych oraz ich przykładowe wartości?	☐	☐
4) narysować charakterystyki przenoszenia i amplitudowe wzmacniaczy w różnych układach pracy?	☐	☐
5) zaproponować sposoby stabilizacji punktu pracy wzmacniacza?	☐	☐
6) określić wpływ wielkości sprzężenia zwrotnego na parametry wzmacniacza?	☐	☐
7) zinterpretować przebiegi sygnałów na wyjściu wzmacniaczy mocy różnych klas?	☐	☐
8) przedstawić układy praktyczne wzmacniaczy dwustopniowych dwutranzystorowych oraz podać ich właściwości?	☐	☐
9) zaprojektować wzmacniacz o podanych parametrach ?	☐	☐

4.6. Scalone układy analogowe

4.6.1. Materiał nauczania

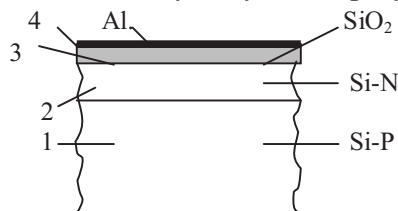
Układy scalone

Układem scalonym nazywa się mikrostrukturę spełniającą określoną funkcję, w której wszystkie lub część elementów są wykonane nierozłącznie w podłożu lub umieszczone na podłożu. Układ taki jest całością, którego nie można rozłączyć na części, zmienić połączeń między elementami ani naprawić. Stanowi on najmniejszy, niepodzielny element urządzenia elektronicznego, tak jak dioda, tranzystor czy rezystor w technice konwencjonalnej. Układy scalone są efektem prac związanych z miniaturyzacją sprzętu elektronicznego przy jednoczesnym zwiększeniu ich niezawodności. Ze względu na skalę integracji (stopień scalenia) układy scalone dzieli się na 5 grup:

- małej skali integracji SSI, zawierające do 100 elementów,
- średniej skali integracji MSI, zawierające od 100 do 1000 elementów,
- wielkiej skali integracji LSI, zawierające od 1000 do 100000 elementów,
- bardzo wielkiej skali integracji VLSI zawierające ponad 10^5 elementów,
- ultra wielkiej skali integracji ULSI lub VLSI zawierające ponad 10^8 elementów.

Do najważniejszych zalet układów scalonych, oprócz małych wymiarów i masy, zalicza się dobre parametry, niskie ceny, zwiększoną niezawodność, dużą szybkość działania i mały pobór mocy. Konkretny układ scalony jest mało uniwersalny, ponieważ może spełniać tylko funkcje określone przy projektowaniu, dlatego produkowana jest cała gama różnych typów układów scalonych. Układy scalone, ze względu na charakter przenoszonych sygnałów dzieli się na dwie grupy: układy cyfrowe i układy analogowe. Cechą charakterystyczną układów analogowych jest przetwarzanie sygnałów ciągłych w czasie. Budowa tych układów jest bardziej skomplikowana niż cyfrowych, ze względu na duże wymagania dotyczące stałości parametrów w szerokim zakresie zmian sygnałów, temperatury otoczenia, napięć zasilających oraz małe szумы. Obecnie produkuje się układy powszechnego zastosowania np. wzmacniacze operacyjne, generatory, stabilizatory napięcia i prądu oraz układy do urządzeń RTV. Wytwarzane są również układy stanowiące ogniwo pośrednie pomiędzy układami analogowymi a scalonymi np. komparatory, przetworniki A/C lub C/A. Oznaczenia polskich układów scalonych określa norma branżowa BN-73/3375-21 – „Mikroukłady scalone. System oznaczania typów”.

Układy scalone pod względem technologicznym dzieli się na układy monolityczne i hybrydowe. W układach monolitycznych wszystkie elementy aktywne i pasywne wytwarza się wewnątrz warstw układu.



Rys. 36. Przekrój podstawowej struktury monolitycznego układu scalonego [1,s.93]

W strukturze układu wyróżnia się cztery warstwy – Rys.36. Dolna warstwa, z krzemu, pełni rolę podłoża, druga, cienka warstwa monokrystalicznego krzemu typu N, osadzona jest na podłożu. Wszystkie elementy wykonywane są w tej warstwie, a jednocześnie pomiędzy tą warstwą a podłożem tworzy się złącze PN, które wykorzystuje się do izolacji elementów od podłoża.

Czasem stosuje się trudniejszą technologię, polegającą na odizolowaniu elementów od podłoża przez cienką warstwę dielektryka, najczęściej SiO_2 . Trzecią warstwę stanowi obszar SiO_2 , który ma duże znaczenie w technologii układów scalonych ze względu na pełnione funkcje. Warstwa ta jest wykorzystywana jako:

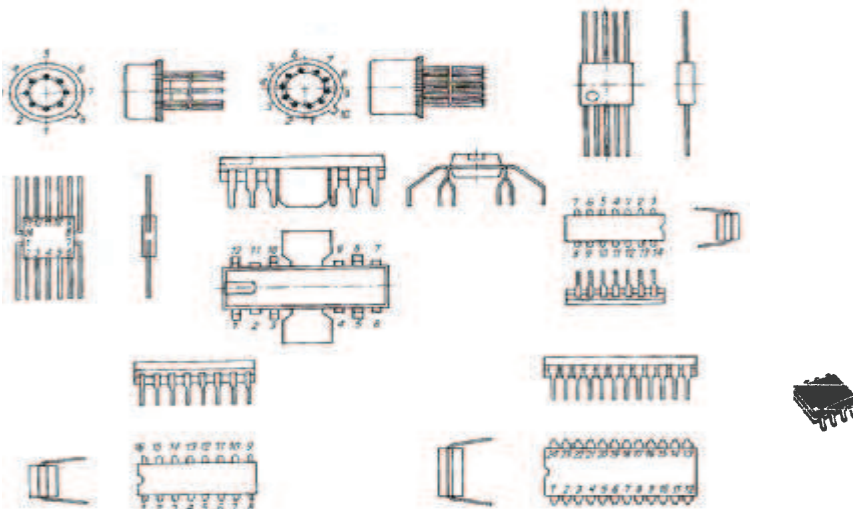
- warstwa maskująca, umożliwiająca dokonanie selektywnej dyfuzji domieszek do określonych obszarów płytki,
- warstwa zabezpieczająca przed wpływami zewnętrznymi,
- dielektryk w kondensatorach układu scalonego,
- warstwa izolacyjna na powierzchni układu scalonego, na którą naparowuje się ścieżek metalicznych łączących elementy układu (warstwa aluminiowa 4).

Poszczególne elementy układów monolitycznych wykonane są na tzw. wyspach, odizolowanych od siebie i od podłoża. Wszystkie elementy układu wytwarzane są w identycznych warunkach, w czasie jednego procesu technologicznego, co pozwala uzyskać np. tranzystory o bardzo zbliżonych parametrach. Tranzystory w układach monolitycznych mają budowę podobną do konwencjonalnych tranzystorów unipolarnych z izolowaną bramką lub bipolarnych wykonanych technologią epitaksjalno-planarną. Najczęściej – w układach bipolarnych, są to tranzystory NPN, ponieważ charakteryzują się lepszymi parametrami (wzmocnienie β , częstotliwość graniczna f_T) niż tranzystory PNP. Rezystory wykonywane są jako rezystory warstwowe z półprzewodnika typu P lub N^+ , a ich rezystancja zależy od powierzchni. Jako diody najczęściej stosuje się struktury tranzystorów, wykorzystując tylko jedno ze złącz. W układach monolitycznych wytwarza się dwa rodzaje kondensatorów: pierwszy wykorzystuje, zależną od napięcia, pojemność wstecznie spolaryzowanego złącza PN, a drugi to kondensator tlenkowy zbudowany z wdyfundowanej warstwy N^+ i warstwy Al stosowanej na połączenia, rolę dielektryka pełni warstwa SiO_2 . Pojemności kondensatorów złączowych są większe niż tlenkowych, a wymiary mniejsze. Cewki indukcyjne w tym typie układów scalonych wytwarzane są rzadko, przez naparowanie na warstwę SiO_2 spiralnej warstwy metalu. Pozwala to jednak uzyskać bardzo małe indukcyjności (rzędu ułamków mikrohenra), więc elementy indukcyjne dołącza się z zewnątrz lub wykorzystuje tzw. analogi indukcyjności. W układach monolitycznych unipolarnych wytwarzane są tranzystory MOSFET z kanałem indukowanym typu N (technologia NMOS), które mogą pełnić funkcje tranzystorów, rezystorów jak i kondensatorów. Nowsza technologia, CMOS, pozwala na wykonywanie jednocześnie tranzystorów z kanałem typu N i P kosztem dodatkowych procesów technologicznych, ale umożliwia uzyskanie układów scalonych wysokiej jakości i o małym poborze mocy (głównie układy cyfrowe).

Układy hybrydowe stanowią połączenie elementów pasywnych, produkowanych technologią warstwową, z diodami i tranzystorami dyskretnymi lub diodami i tranzystorami wykonanymi technologią monolityczną. Układy te stosowane są przede wszystkim gdy wymagana jest duża dokładność elementów pasywnych, w zakresie częstotliwości mikrofalowych, przy dużych mocach oraz przy niewielkiej produkcji. Układy hybrydowe realizuje się techniką cienkowarstwową (grubość nałożonych warstw nie przekracza $1\mu\text{m}$) lub grubowarstwową (grubość nałożonych warstw wynosi od 1 do $100\mu\text{m}$). W technologii cienkowarstwowej na podłożu dielektrycznym, będąc jednocześnie podłożem konstrukcyjnym, naparowuje się w próżni lub rozpyla katodowo materiały przewodzące, rezystancyjne i dielektryczne. Odpowiednio ukształtowane warstwy uzyskuje się przez użycie masek lub stosując technikę fotolitograficznego, selektywnego trawienia. W specjalnych układach wytwarza się również elementy indukcyjne cienkowarstwowe w postaci miedzianej lub złotej spirali. Do układów cienkowarstwowych można dołączać produkowane seryjnie diody i tranzystory.

W technologii grubowarstwowej na podłoże ceramiczne metodą sitodruku nakłada się specjalne pasty przewodzące, rezystancyjne i dielektryczne. Pasty przewodzące to materiały palladowo-złote i palladowo-srebrne, pasty rezystancyjne to materiały palladowe, tlenkowo-palladowe lub srebrne, a materiały dielektryczne są zawieszoną ceramiką i niskotopliwych szklów. Odpowiednie kształty elementów uzyskuje się przez utlenienie i odparowanie rozpuszczalników podczas wypalania w piecu. Układy grubowarstwowe stosuje się w hybrydowych połączeniach z monolitycznymi układami półprzewodnikowymi oraz jako dzielniki rezystancyjne, podzespoły przetworników A/C, wzmacniaczy, mikrofalowych układów scalonych itp.

Ze względu na ściśle określoną funkcję, którą może spełniać dany układ, istnieje konieczność produkowania szeregu różnych typów układów scalonych zamkniętych w odpowiednich, dostosowanych obudowach – Rys.37.



Rys.37. Przykłady typowych obudów układów scalonych [1,s.91]

Wzmacniacze operacyjne

Wzmacniacze operacyjne (WO) stanowią największą grupę wśród układów analogowych realizowanych jako monolityczne układy scalone. Pojęcie WO odnosi się przede wszystkim do wzmacniaczy o sprzężeniu bezpośrednim, dużym wzmocnieniu i z reguły przeznaczonych do pracy z zewnętrznym sprzężeniem zwrotnym. O właściwościach układu ze sprzężeniem decyduje najczęściej zewnętrzny obwód sprzężenia zwrotnego, co pozwala na realizowanie różnorodnych funkcji. Daje to możliwość stosowania ich w różnych układach i urządzeniach elektronicznych. Podstawowy wzmacniacz operacyjny – Rys. 38a, posiada wejście różnicowe (symetryczne) i wyjście niesymetryczne. Wejście $We1$, oznaczane „-”, jest wejściem odwracającym, wejście $We2$, oznaczone „+” – wejściem nieodwracającym. Przy wykorzystaniu wejścia odwracającego uzyskuje się przesunięcie fazowe sygnału wyjściowego równe 180° , a przy podawaniu sygnału na wejście nieodwracające - 0° . Uproszczony schemat zastępczy wzmacniacza operacyjnego przedstawia Rys.38b.



Rys. 38. Wzmacniacz operacyjny: a) symbol; b) uproszczony schemat zastępczy [1,s.197]

Idealny wzmacniacz operacyjny z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego charakteryzuje się:

- nieskończenie dużym wzmocnieniem napięciowym,
- nieskończenie dużą impedancją wejściową,
- zerową impedancją wyjściową,
- nieskończenie szerokim pasmem przenoszonych częstotliwości,
- nieskończenie dużym zakresem dynamicznym sygnału.

Parametry rzeczywistego wzmacniacza znacznie różnią się od idealnego:

- wzmocnienie napięciowe sygnału różnicowego	$k_{ur} = 10^4 - 10^6 \text{ V/V}$
- wzmocnienie napięciowe sygnału wspólnego	$k_{us} \ll k_{ur}$
- współczynnik tłumienia sygnału wspólnego	$CMRR(H) = 60-100\text{dB}$
- rezystancja (impedancja) wejściowa różnicowa	$r_{we r} = 50\text{k}\Omega - 50\text{M}\Omega$
- rezystancja (impedancja) wejściowa sumacyjna	$r_{we s} = 50\text{k}\Omega - 50\text{M}\Omega$
- rezystancja wyjściowa	$r_{wy} = 50-300\Omega$
- wejściowe napięcie niezrównoważenia	$U_0 = 0,2 - 10\text{mV}$ (max 50mV)
- wejściowy prąd polaryzacji	$I_{WE 0} = 5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3} \text{ nA}$
- częstotliwość graniczna	$f_T = 1 - 100\text{MHz}$
- szybkość zmian napięcia wyjściowego	$S_{wy} = 0,3 - 100\text{V}/\mu\text{s}$
- pobór mocy	$P = 0,1 - 200\text{mW}$

Dodatkowo podaje się parametry graniczne WO: maksymalne napięcie wejściowe, maksymalne różnicowe napięcie wejściowe, maksymalne napięcie wyjściowe, maksymalny prąd wyjściowy oraz inne np. napięcie zasilania, dryfty – temperaturowy i czasowy wejściowego napięcia i prądu niezrównoważenia i czasem odpowiedź na skok jednostkowy.

Ze względu na przeznaczenie wyróżnia się wzmacniacze operacyjne:

- ogólnego przeznaczenia,
- do zastosowań specjalnych np. w technice biomedycznej lub kosmicznej.

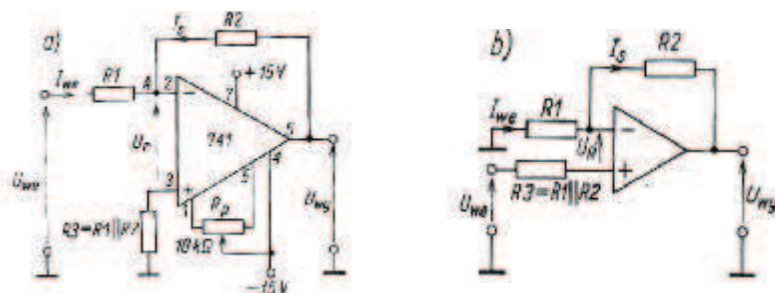
Wzmacniacze operacyjne stosowane są głównie w:

- układach analogowych, gdzie wykonują operacje arytmetyczne (dodawanie, odejmowanie, mnożenie, dzielenie, całkowanie, różniczkowanie, logarytmowanie, potęgowanie) – Rys.40, Rys.44,
- przetwornikach prąd-napięcie i napięcie-prąd – Rys.41,
- generatorach sygnałów prostokątnych, trójkątnych i sinusoidalnych,
- filtrach,
- prostownikach czynnych – Rys.42,
- detektorach liniowych i detektorach wartości szczytowej,
- układach próbkujących z pamięcią.

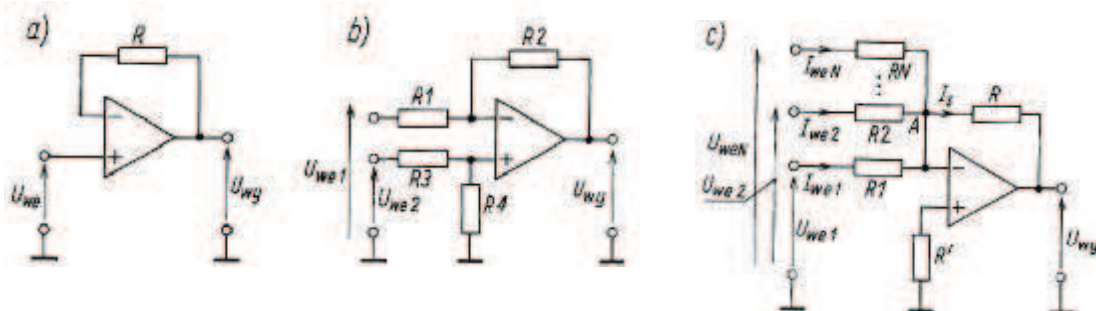
Najczęściej stosowane układy pracy wzmacniacza operacyjnego to układ odwracający – Rys.39a i nieodwracający – Rys.39b, w których wzmocnienie zależy tylko od stosunku zewnętrznych rezystorów:

$$k_{ur} = -\frac{R_2}{R_1} \quad \text{dla układu odwracającego,}$$

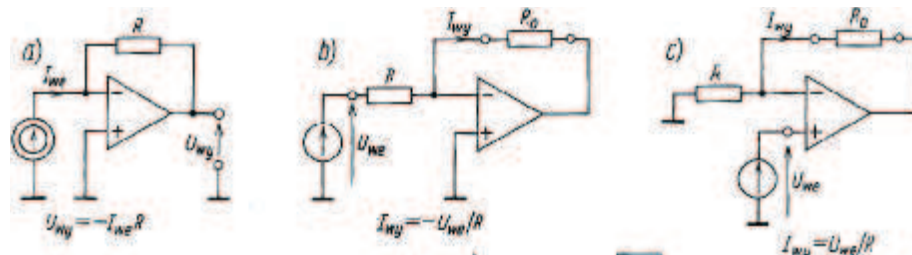
$$\text{i } k_{ur} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad \text{dla układu nieodwracającego.}$$



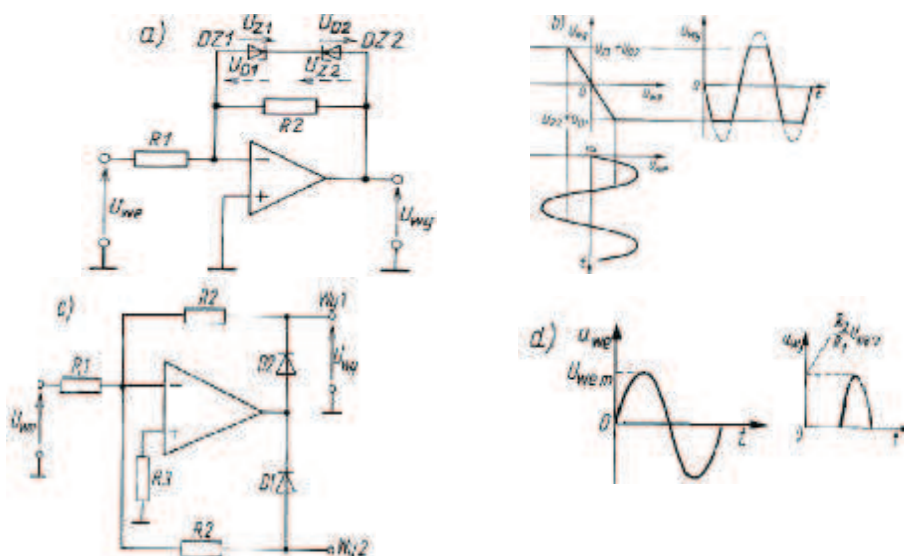
Rys.39. Schematy układów wzmacniacza operacyjnego: a) w konfiguracji odwracającej; b) w konfiguracji nieodwracającej [1,s.204,206]



Rys.40. Schematy układów ze wzmacniaczem operacyjnym: a) wtórnik; b) wzmacniacz różnicowy; c) sumator [1,s.206]

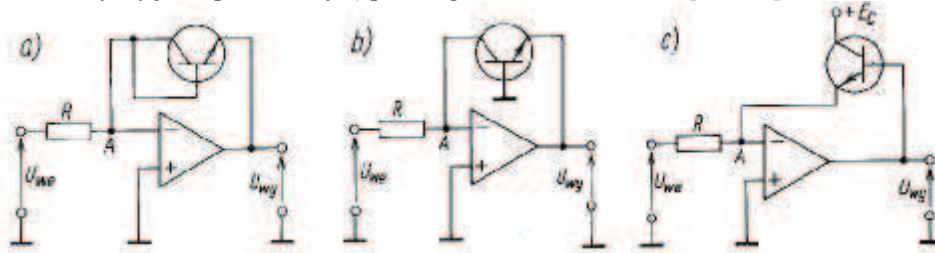


Rys.41. Schematy przetworników ze wzmacniaczem operacyjnym: a) prądu na napięcie; b), c) napięcia na prąd [1,s.206]



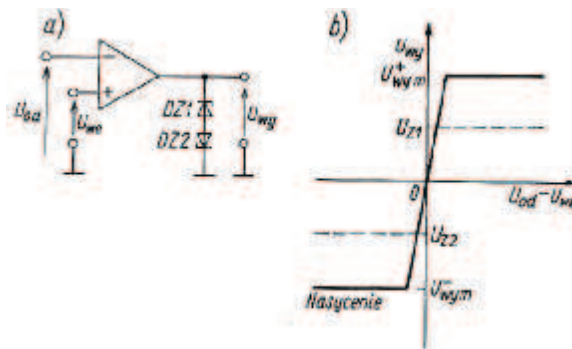
Rys. 42. Schematy układów ze wzmacniaczem operacyjnym: a) ogranicznik; b) przebiegi czasowe w układzie; c) przebiegi czasowe w układzie;

c) prostownik czynny jednopółkowy d) przebiegi czasowe w układzie [1,s.213]



Rys.43. Schematy układów logarytmujących z tranzystorem bipolarnym

Jednym z niewielu układów, w których wzmacniacz operacyjny pracuje bez sprzężenia zwrotnego jest komparator – Rys.44.



Rys. 44. Wzmacniacz operacyjny jako komparator: a) schemat; b) charakterystyka przenoszenia [1,s.221]

We wzmacniaczach ogólnego przeznaczenia, na zasadzie kompromisu, dąży się do uzyskania możliwie najlepszych wszystkich istotnych parametrów. Równolegle produkuje się wzmacniacze, które mają bardzo dobre tylko wybrane parametry, przy znacznie gorszych pozostałych. Obecnie produkowane monolityczne wzmacniacze operacyjne należą do II i III generacji układów, w których znacznie zwiększono wzmocnienie I stopnia - różnicowego i zakres dopuszczalnych wartości sygnału wejściowego oraz zmniejszono pobór mocy i wejściowe prądy polaryzacji.

Przetworniki A/C i C/A

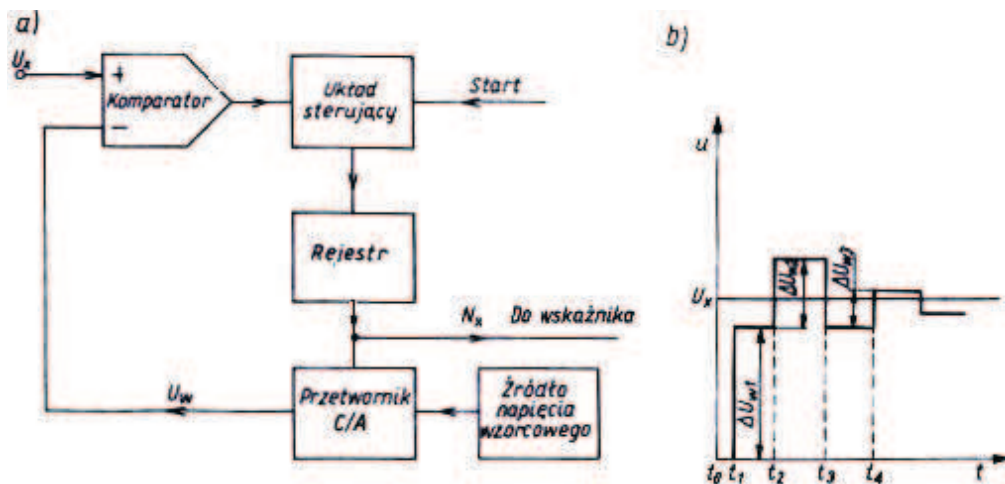
Przetwornik analogowo-cyfrowy przetwarza sygnał analogowy na odpowiadający mu dyskretny sygnał cyfrowy. Ze względu na zasadę przetwarzania przetworników A/C można je podzielić na:

- przetworniki bezpośrednie;
- przetworniki pośrednie.

Przetworniki mogą przetwarzać chwilową wartość sygnału analogowego lub uzyskiwać na wyjściu sygnał cyfrowy proporcjonalny do średniej wartości wielkości analogowej w czasie przetwarzania. Przetworniki bezpośrednie mogą pracować według metody kompensacyjnej lub bezpośredniego porównania. Każda z tych metod polega na porównaniu przetwarzanej wielkości analogowej z sygnałem wzorcowym sterowanym cyfrowo, w wyniku czego powstaje sygnał cyfrowy zawierający informacje o wielkości analogowej.

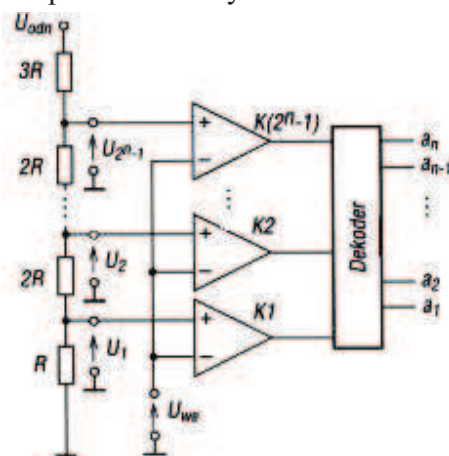
W przetworniku A/C z kompensacją wagową – Rys.45, następuje porównanie wejściowego sygnału analogowego z sygnałem z generatora sterowanego cyfrowo, który wytwarza napięcie

proporcjonalne do wag poszczególnych bitów w słowie dwójkowym, rozpoczynając od najstarszego bitu (tzn. od napięcia równego połowie maksymalnego napięcia wejściowego).



Rys. 45. Przetwornik A/C z kompensacją wagową: a) schemat funkcjonalny; b) przebiegi napięć mierzonego i wzorcowego [1,s.415]

Metoda bezpośrednia polega na porównaniu przetwarzanego sygnału analogowego z napięciami wzorcowymi uzyskanymi w dzielniku napięcia. Wynik jest ustalany w dekodерze, do którego wpływają sygnały z komparatorów – Rys. 46.



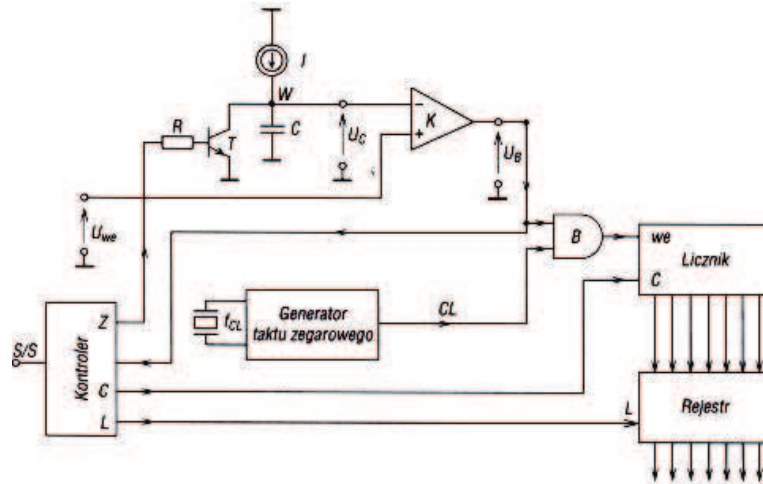
Rys.46. Przetwornik A/C przetwarzający sygnał metodą bezpośredniego porównania [2,s.333]

Przetworniki pośrednie przekształcają najpierw wielkość analogowa w inną wielkość fizyczną (najczęściej przedział czasu lub częstotliwość), która jest przetwarzana bezpośrednio w sygnał cyfrowy. Przetworniki te najczęściej uśredniają wielkość analogową w czasie przetwarzania. Typowym przetwornikiem integracyjnym jest układ przetwarzający sygnał wejściowy (przez jego całkowanie) na odcinek czasu proporcjonalny do tego napięcia, który następnie jest przetwarzany na liczbę impulsów zegarowych – Rys. 47.

Przetworniki A/C charakteryzować można poprzez parametry:

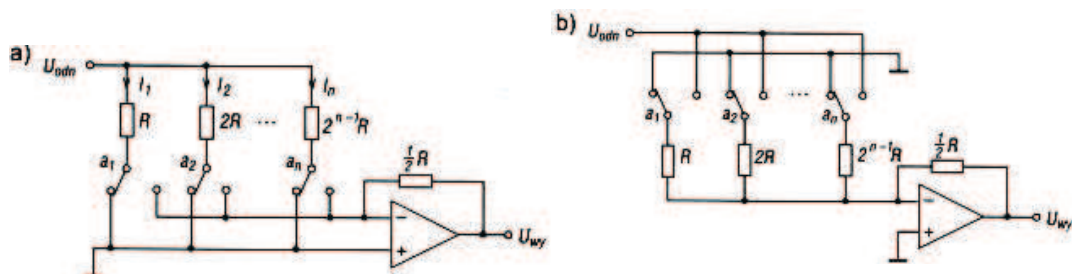
- czas konwersji (czas przetwarzania), jest to czas jako upływa między podaniem sygnału wejściowego rozpoczynającego przetwarzaniem, a pojawieniem się informacji na wyjściu,

- rozdzielczość – zmiana sygnału wejściowego powodująca zmianę wyniku cyfrowego o 1,
- błąd kwantyzacji – odchyłka rzeczywistej charakterystyki schodkowej od idealnej.



Rys.47. Przetwornik A/C przetwarzający sygnał metodą pojedynczego całkowania [2,s.337]

Przetwornik cyfrowo-analogowy to układ przetwarzający dyskretny sygnał cyfrowy na równoważny mu sygnał analogowy. Ilość wejść układu zależy od liczby bitów przetwarzanego słowa, natomiast informacja analogowa np. napięcie, pojawiająca się na jednym wyjściu jest proporcjonalna do wejściowego słowa zapisanego w postaci binarnej oraz do napięcia odniesienia. Najprostszy przetwornik C/A zbudowany jest na wzmacniaczu operacyjnym w układzie sumatora, a wartości rezystorów układu odpowiadają wagom poszczególnych bitów liczby – Rys.48.



Rys.48. Przetwornik C/A o przetwarzaniu: a) prądowym; b) napięciowym [2,s.331]

Najważniejszymi parametrami przetworników C/A są:

- rozdzielczość - najmniejsza zmiana sygnału wyjściowego $\Delta U = U_{odn} / 2^n$, gdzie n to ilość bitów słowa wejściowego,
- błąd bezwzględny – największa różnica między zmierzonym napięciem wyjściowym, a jego wartością teoretyczną obliczoną wg powyższego wzoru
- błąd względny – stosunek błędu bezwzględnego do wartości napięcia odniesienia.

4.6.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczenia.

1. Jak się klasyfikuje układy scalone?
2. Jakie elementy pasywne i aktywne są wykonywane w technologii monolitycznej?

3. Czym różni się hybrydowa technologia cienkowarstwowa od grubowarstwowej?
4. Jaki jest symbol oraz rodzaje wejść i wyjść wzmacniacza operacyjnego?
5. Czym różni się idealny wzmacniacz operacyjny z otwartą pętlą od rzeczywistego?
6. Od czego zależy wzmocnienie wzmacniacza operacyjnego w układzie odwracającym i nieodwracającym?
7. W jakich układach pracy mogą pracować wzmacniacze operacyjne?
8. Gdzie (w jakich układach) stosuje się wzmacniacze operacyjne?
9. Jaka jest idea przetwarzania cyfrowo-analogowego?
10. Czym różni się przetwarzanie A/C bezpośrednie od pośredniego?

4.6.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Obserwacja działania wzmacniaczy operacyjnych w różnych układach pracy.

Sposób wykonania ćwiczenia:

Ćwiczenie polega na obserwacji przebiegów na wyjściu wzmacniacza operacyjnego pracującego w wybranych układach pracy: w układzie odwracającym, w układzie nieodwracającym, sumatorze, w układzie różniczkującym i całkującym oraz określeniu wpływu elementów sprzężenia zwrotnego na parametry układu.

Uwaga: Przed włączeniem zasilania poproś nauczyciela o sprawdzenie układów pomiarowych!

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z parametrami i układami pracy wzmacniaczy operacyjnych;
- 2) zaproponować układy pomiarowe do obserwacji przebiegów na wyjściach wzmacniaczy operacyjnych w podstawowych układach pracy, dobrać wartości elementów w układzie;
- 3) zmontować układ pomiarowy na podstawie zaproponowanego schematu dla wzmacniacza odwracającego, na wejście układu podłączyć generator napięcia sinusoidalnego, do wyjścia podłączyć oscyloskop;
- 4) dokonać obserwacji przebiegów wyjściowych, przerysować oscylogramy, określić wzmocnienie i przesunięcie fazowe sygnału;
- 5) zmontować układy pomiarowe na podstawie zaproponowanych schematów wzmacniaczy w pozostałych układach pracy, dokonać obserwacji przebiegów wyjściowych, przerysować oscylogramy oraz określić wzmocnienie i stałą czasową ;
- 6) ocenić poprawność wykonania ćwiczenia;
- 7) sformułować wnioski dotyczące działania wzmacniaczy operacyjnych w różnych konfiguracjach.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- makiety (trenażery) ze wzmacniaczami operacyjnymi, rezystory, kondensatory o różnych wartościach do zbudowania różnych układów pracy wzmacniacza,
- sprzęt pomiarowy i laboratoryjny: oscyloskop, zasilacze laboratoryjne stabilizowane, generator regulowany napięcia sinusoidalnego,
- katalogi elementów i układów elektronicznych,
- literatura z rozdziału 6.

4.6.4. Sprawdzian postępów

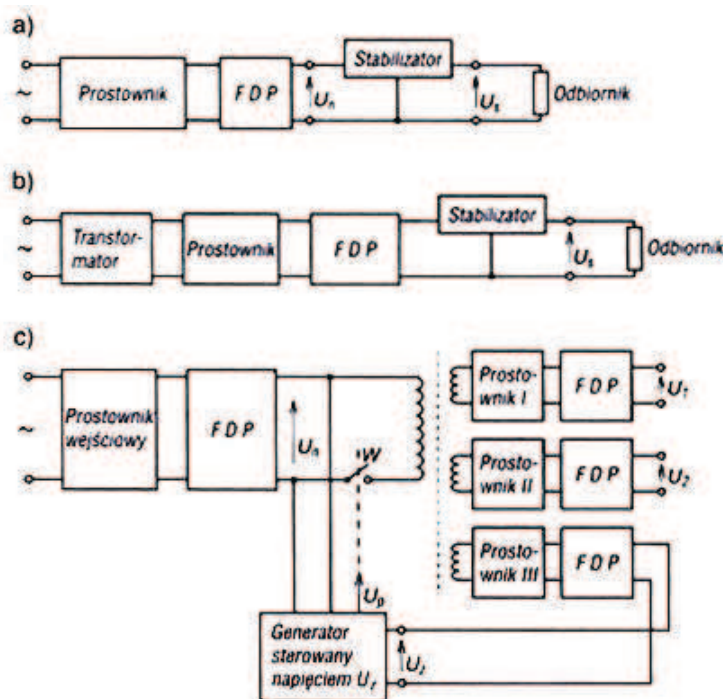
Czy potrafisz:		Tak	Nie
1)	rozpoznać układ scalony na podstawie oznaczenia?	☐	☐
2)	przedstawić parametry charakterystyczne układu scalonego na podstawie danych katalogowych?	☐	☐
3)	rozpoznać układ pracy wzmacniacza operacyjnego na podstawie schematu ideowego?	☐	☐
4)	dobrać wartości elementów zewnętrznych wzmacniacza do układu o założonych parametrach?	☐	☐
5)	podać praktyczne przykłady zastosowania wzmacniacza operacyjnego pracującego w różnych konfiguracjach?	☐	☐
6)	zaproponować konfigurację wzmacniacza i wartości elementów dla uzyskania układu przetwornika C/A?	☐	☐

4.7. Układy zasilające

4.7.1 Materiał nauczania

Wszystkie urządzenia elektryczne muszą być zasilane, najlepiej bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej. Czasem konieczna jest zmiana wartości napięcia za pomocą transformatora, jednak znaczna część urządzeń wymaga zasilania napięciem stałym. Typowy zasilacz składa się z kilku podstawowych bloków – Rys.49:

- transformatora,
- prostownika,
- filtru dolnoprzepustowego FDP,
- stabilizatora napięcia wyjściowego.

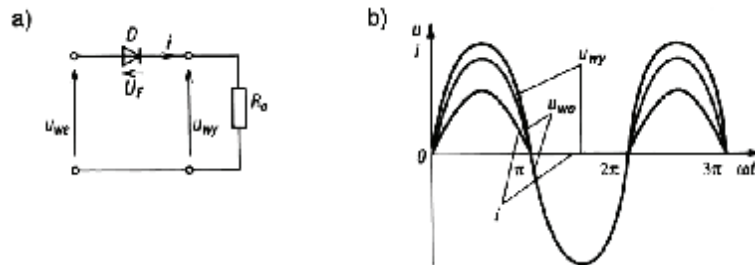


Rys.49. Schematy funkcjonalne zasilaczy: a) prostego; b) z transformatorem; c) impulsowego [3,s.239]

Prostownik zamienia prąd zmienny na prąd jednokierunkowy. W zależności od struktury i liczby faz napięcia zasilającego rozróżniamy układy jedno i wielo fazowe (np. trójfazowe). Jeżeli napięcie podlega prostowaniu tylko w czasie jednego półokresu każdej z faz, to prostownik nazywamy jednopołówkowym (półfalowym), jeżeli w czasie obu - to dwupołówkowym (całofalowym). Najważniejsze parametry charakteryzujące prostowniki to:

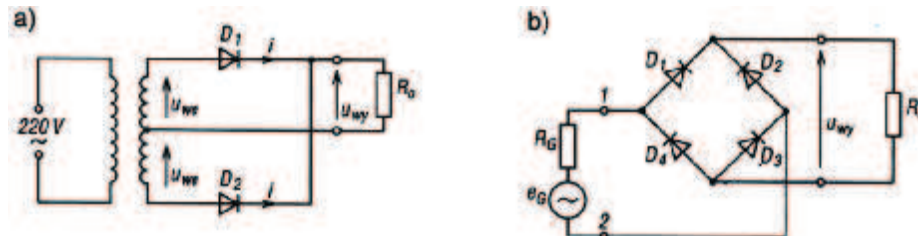
- napięcie zasilania,
- wartość skuteczna napięcia wyjściowego,
- składowe stałe napięcia wyjściowego i prądu wyjściowego,
- sprawność energetyczna η_P ,
- współczynnik tętnień kt ,
- sprawność napięciowa η_u ,
- maksymalna wartość napięcia wstecznego, które występuje na elemencie prostowniczym.

Ze względu na użyte elementy prostownicze prostowniki dzielimy na niesterowane lub sterowane, stosowane przede wszystkim w układach dużej mocy. W pierwszych stosuje się diody prostownicze, w drugich np. tyrystory. Schemat najprostszego prostownika półfalowego jednofazowego z obciążeniem rezystancyjnym przedstawia Rys.50.



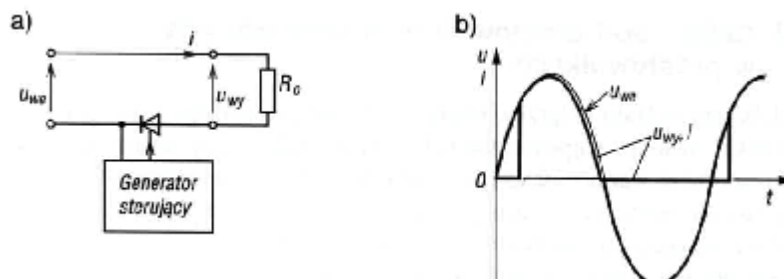
Rys. 50. Prostownik jednopółkowy: a) schemat; b) przebiegi napięć i prądu w układzie [3,s.240]

Lepszymi parametrami charakteryzują się prostowniki dwupółkowe, w których prąd płynie przez obciążenie przez cały okres napięcia wejściowego w jednym kierunku. Realizowane są one w układzie z odczepem środkowym transformatora lub z mostkiem Graetza – Rys. 51.



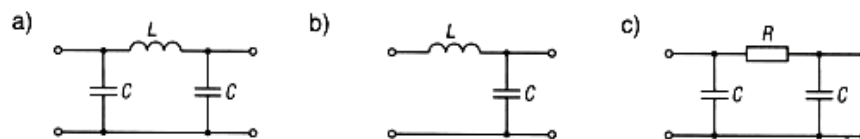
Rys. 51. Prostownik dwupółkowy: a) układ z transformatorem; b) układ Graetza [3,s.241]

Prostowniki tyrystorowe umożliwiają sterowanie czasem przepływu prądu przez obciążenie poprzez zmianę momentu załączenia tyrystora impulsem podanym na bramkę -Rys. 52.



Rys.52. Prostownik tyrystorowy: a) schemat; b) przebiegi napięć i prądu w układzie [3,s.244]

Ponieważ na wyjściu każdego prostownika otrzymuje się oprócz składowej stałej napięcie tętniące, pomiędzy wyjście prostownika a obciążenie włącza się filtr dolnoprzepustowy. Najprostszym filtrem jest kondensator o dużej pojemności, ale stosowane są też układy bardziej rozbudowane – Rys.53.

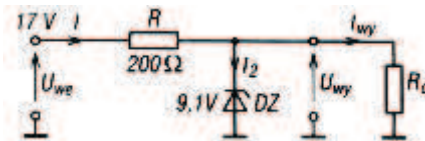


Rys. 53. Schematy układów do filtrowania napięć zasilających [3,s.244]

Stabilizatory napięcia lub prądu to układy, których zadaniem jest utrzymywanie niezmienniej wartości napięcia lub prądu na wyjściu, przy określonych granicach zmian napięcia zasilającego, wartości napięcia lub prądu na wyjściu, przy określonych granicach zmian napięcia zasilającego, obciążenia, temperatury itp. Podstawowe parametry układów stabilizacji (stabilizatorów) to:

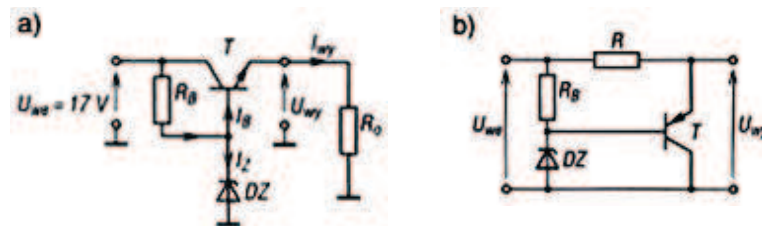
- znamionowe napięcie(prąd) wyjściowe,
- zakres regulacji napięcia (prądu) wyjściowego,
- zakres zmian napięcia wejściowego odpowiadający poprawnej pracy stabilizatora,
- współczynnik stabilizacji S ,
- współczynnik tętnień ηU (ηI).

Najprostszym stabilizatorem, którego parametry zależą głównie od właściwości elementu stabilizującego, jest stabilizator parametryczny zbudowany na diodzie Zenera – Rys.54.



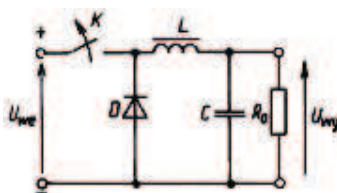
Rys. 54. Stabilizator z diodą Zenera [3,s.246]

Znacznie lepsze parametry posiadają stabilizatory kompensacyjne o działaniu ciągłym. Występujące w nich sprzężenie zwrotne pozwala na porównanie napięcia wyjściowego z napięciem odniesienia i, w przypadku różnicy, sterowanie elementu stabilizującego przez sygnał błędny. Układ regulacyjny budowany jest na tranzystorach – Rys. 55 - lub wykonany w postaci układu analogowego.



Rys.55. Stabilizatory tranzystorowe: a) schemat układu szeregowego; b) schemat układu równoległego [3,s.250]

Podstawową wadą stabilizatorów o pracy ciągłej jest duża moc wydzielana na elemencie wykonawczym, czyli niewielka sprawność energetyczna. Wady tej nie mają stabilizatory impulsowe – Rys. 56, w których element regulacyjny pracuje jako przełącznik elektroniczny.



Rys.56. Stabilizator impulsowy napięcia – zasada działania [1,s.302]

4.7.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania sprawdzisz czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczenia.

1. Czym różni się zasilacz ciągły od impulsowych?
2. Jaką funkcję pełnią poszczególne z bloki zasilacza?
3. Jakie znasz rodzaje prostowników?

4. Z czego wynikają różnice wartości parametrów prostowników jedno i dwupołkowych?
5. W jakim celu stosuje się FDP?
6. Czym różnią się stabilizatory parametryczne od kompensacyjnych?

4.7.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Obserwacja działania prostowników, filtrów i stabilizatorów w typowych zasilaczach.

Sposób wykonania ćwiczenia

Ćwiczenie polega na obserwacji przebiegów na wyjściu zasilacza oraz na wyjściach kolejnych jego bloków w układach o różnej konfiguracji.

Uwaga: Przed włączeniem zasilania poproś nauczyciela o sprawdzenie układów pomiarowych!

Aby wykonać ćwiczenie powinien:

- 1) zapoznać się z rodzajami i parametrami zasilaczy różnych typów;
- 2) połączyć układ prostownika jednapółkowego i zaproponować układ pomiarowy do obserwacji i pomiarów jego właściwości,
- 3) zmontować układ pomiarowy włączając oscyloskop oraz mierniki napięcia na wyjścia kolejnych bloków zasilacza i na obciążenie, odczytać wartości napięć i narysować oscylogramy na papierze milimetrowym, wyniki zanotować na rysunkach,
- 4) dokonać identycznych pomiarów dla prostownika dwupołkowego z odczepem i mostka Graetza, oraz różnych stabilizatorów: z diodą Zenera i na tranzystorze szeregowym,
- 5) połączyć układ prostownika jednapółkowego z tyrystorem zamiast diody prostowniczej, na bramkę tyrystora włączyć generator sygnału prostokątnego o regulowanej częstotliwości i współczynniku wypełnienia impulsów oraz miernik napięcia skutecznego na wyjście układu,
- 6) dokonać obserwacji przebiegów czasowych napięcia na wyjściu prostownika sterowanego dla różnych częstotliwości- f i przy różnych współczynnikach wypełnienia impulsów- k sygnału z generatora, zmierzyć i zanotować wartość napięcia wyjściowego przy wybranych wartościach parametrów f i k ,
- 7) dokonać analizy porównawczej wszystkich układów zasilaczy i sformułować wnioski,
- 8) zaprezentować i omówić uzyskane przebiegi czasowe oraz właściwości różnych zasilaczy.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- makiety (trenażery) z prostownikami jedno i dwupołkowymi, filtry, stabilizatory do obserwacji przebiegów i pomiarów parametrów,
- sprzęt pomiarowy: oscyloskop, zasilacze laboratoryjne stabilizowane, generator regulowany napięcia sinusoidalnego,
- katalogi elementów i układów elektronicznych,
- literatura z rozdziału 6.

4.7.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:	Tak	Nie
1) omówić zasady działania prostowników niesterowanych	☐	☐
2) przedstawić parametry charakterystyczne poszczególnych bloków zasilacza?	☐	☐
3) przewidzieć kształt przebiegów czasowych na wyjściach poszczególnych bloków w zasilaczach jedno i dwupołówkowych?	☐	☐
4) omówić sposób regulacji wartości napięcia wyjściowego w zasilaczu z prostownikiem tyrystorowym?	☐	☐
5) podać praktyczne przykłady zastosowania zasilaczy ciągłych i impulsowych?	☐	☐

4.8. GENERATORY

4.8.1. Materiał nauczania

Rodzaje i zasada działania generatorów

Generatory są układami wytwarzającymi przebiegi elektryczne o określonym kształcie – Rys. 57. Ze względu na kształt przebiegu możemy je podzielić na :

- generatory przebiegów sinusoidalnych,
- generatory przebiegów niesinusoidalnych (np. prostokątnych, piłokształtnych).



Rys.57. Typowe przebiegi napięć generatorów: a) sinusoidalnych; b) prostokątnych; c) piłokształtnych. [1,s.250]

Typowe układy generacyjne są samowzbudne (astabilne), tzn. nie wymagają sterowania sygnałem zewnętrznym. Niektóre układy wytwarzające drgania potrzebują zewnętrznych sygnałów wyzwalających aby wykonać jeden lub kilka cykli drgań (układy monostabilne) lub przejść z jednego stanu stabilnego do drugiego (generatory bistabilne).

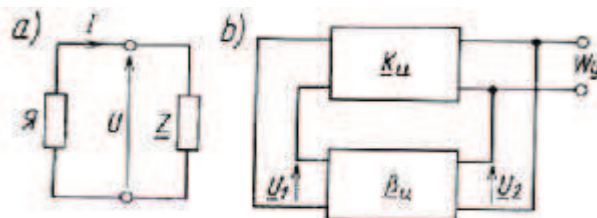
Wymagania w stosunku do generatorów zależą od ich zastosowania; np. dla generatorów mocy najważniejsze są - sprawność η układu oraz moc wyjściowa P_{wy} , dla generatorów wytwarzających drgania o jednej częstotliwości – stałość częstotliwości δf , a dla układów wytwarzających przebiegi w określonym zakresie częstotliwości – zakres przestrajania αf określony przez minimalną i maksymalną częstotliwość sygnału wyjściowego.

W generatorach przebiegów sinusoidalnych częstotliwość drgań jest określona parametrami układu biernego pobudzanego do drgań, którym może być:

- obwód rezonansowy LC,
- element wykonujący drgania mechaniczne np. element piezoelektryczny,
- filtr pasmowy RC.

Układy takie po jednorazowym pobudzeniu do drgań wytwarzają drgania gasnące.

Ze względu na tłumienność tych układów konieczne jest zastosowanie elementu lub układu, który sterując przepływem energii ze źródła zasilania, umożliwi podtrzymywanie drgań. Możliwe są dwa rozwiązania: układ zawierający element o ujemnej rezystancji – Rys.58a, lub układ ze sprzężeniem zwrotnym – Rys.58b.



Rys.58. Zasada działania generatorów elektronicznych: a) układ z ujemną rezystancją; b) układ ze sprzężeniem zwrotnym [1,S.252]

W pierwszym układzie element o ujemnej rezystancji ma za zadanie skompensować straty mocy w obwodzie o impedancji Z , tzn. w szeregowym lub równoległym obwodzie LC. Jako elementy o ujemnej rezystancji stosowane są np. diody tunelowe lub tranzystory jednozłączowe. Układy takie są rzadko stosowane ponieważ charakteryzują się mniejszą mocą, gorszą stałością częstotliwości oraz większymi zniekształceniami nieliniowymi niż układy ze sprzężeniem zwrotnym.

Drugi układ - generator ze sprzężeniem zwrotnym, zbudowany jest ze wzmacniacza o wzmocnieniu napięciowym K_u oraz czwórnika sprzężenia zwrotnego o transmitancji (współczynnika przenoszenia) β_u . Parametry te zależą od częstotliwości.

Aby możliwa była generacja drgań muszą być równocześnie spełnione 2 warunki: warunek amplitudy $K_u \beta_u = 1$ oraz warunek fazy $\varphi_u + \psi_u = 0^\circ + n \cdot 360^\circ$. Z warunku amplitudy wynika, że drgania w układzie mogą być generowane tylko wówczas, gdy wzmacniacz kompensuje tłumienie wprowadzane przez obwód sprzężenia zwrotnego, a z warunku fazy, że drgania mogą wystąpić tylko wtedy, gdy napięcie wyjściowe jest w fazie z napięciem wejściowym.

Podstawowe parametry generatorów sinusoidalnych to:

- częstotliwość generowanego przebiegu f_0 ,
- zakres i charakter przestrajania generatora,
- długo i krótkoterminowa stałość częstotliwości generowanego przebiegu,
- współczynnik zawartości harmoniczných.

Generatory przebiegów prostokątnych realizowane są w układach przerzutników zbudowanych na tranzystorach, scalonych układach liniowych lub bramkach cyfrowych. Mogą generować pojedynczy impuls, przebieg okresowy lub tylko zmieniać stan wyjścia na przeciwny. Podstawowe parametry generatorów sygnałów prostokątnych dotyczą parametrów impulsu, częstotliwości wytwarzanego przebiegu oraz współczynnika wypełnienia.

Generatory przebiegów piłokształtnych i trójkątnych wykorzystują ładowanie i rozładowanie kondensatora lub całkowanie stałego napięcia.

Obecnie można również wykorzystywać generatory uniwersalne - funkcyjne, które wytwarzają w jednym, rozbudowanym układzie przebiegi o różnych kształtach. Często umożliwiają również regulację częstotliwości i amplitudy, oraz pozwalają na zmianę parametrów generowanego przebiegu sygnałem zewnętrznym (modulację). Generatory charakteryzujące się możliwością przestrajania (liniowej zmiany częstotliwości) za pomocą wewnętrznego lub zewnętrznego sygnału piłokształtnego nazywają się wobulatorami lub generatorami wobulacyjnymi. Zjawisko wobulacji wykorzystywane jest do wizualizacji, pomiaru i rejestracji charakterystyk częstotliwościowych.

4.8.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczenia.

1. Według jakich kryteriów można klasyfikować generatory?
2. Jakie są warunki generacji drgań generatorów sprzężeniowych?
3. W jaki sposób kompensowane są straty mocy w generatorach z ujemną rezystancją?
4. Od czego zależy częstotliwość drgań generatorów sinusoidalnych?
5. W jakich układach generowane są okresowe przebiegi prostokątne?
6. W jakich układach wykorzystuje się, w przybliżeniu liniowe, ładowanie kondensatora?

7. Jakie parametry są najważniejsze dla generatorów mocy, a jakie dla generatorów wytwarzających drgania o stałej częstotliwości ?
8. Jakie możliwości mają generatory uniwersalne?

4.8.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Obserwacja przebiegów uzyskanych z generatora funkcyjnego oraz pomiary parametrów tych przebiegów.

Sposób wykonania ćwiczenia

Ćwiczenie polega na uzyskaniu przebiegów z wyjść generatora funkcyjnego, obserwacji ich kształtu i pomiarze wybranych parametrów (minimalna i maksymalna częstotliwość, zakres zmian amplitudy, zakres regulacji współczynnika wypełnienia sygnału prostokątnego) oraz prezentacji funkcji wobulacji sygnału generatora.

Uwaga: Przed włączeniem zasilania poproś nauczyciela o sprawdzenie układu pomiarowego.

Aby wykonać ćwiczenie powinien:

- 1) zapoznać się z zasadą działania, rodzajami i parametrami generatorów uniwersalnych;
- 2) zmontować układ pomiarowy włączając do zacisków wyjściowych generatora oscyloskop;
- 3) zaobserwować kształt przebiegów dla wybranego rodzaju przebiegu, określić zakres przestrajania generatora oraz zakres zmian amplitudy sygnału, zanotować wyniki ;
- 4) powtórzyć obserwacje dla pozostałych rodzajów generowanych sygnałów, zanotować wyniki i oscylogramy;
- 5) zmontować układ pomiarowy przyłączając do wyjścia generatora woltomierz napięcia przemiennego i częstościomierz, zachowując stałe warunki obciążenia, w celu dokładnego pomiaru częstotliwości i amplitudy generowanych sygnałów;
- 6) dokonać pomiarów dla skrajnych i kilku pośrednich wartości częstotliwości, wyniki zanotować;
- 7) włączyć na generatorze uniwersalnym tryb "wobulator", zaobserwować przebieg zmodulowany częstotliwościowo sygnałem liniowo narastającym;
- 8) dokonać oceny poprawności wykonanego ćwiczenia;
- 9) sformułować wnioski na podstawie uzyskanych wyników pomiarów.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- makiety (trenażery) z układami generatorów funkcyjnych lub generator funkcyjny z funkcją wobulacji do pomiaru ich parametrów,
- sprzęt pomiarowy: elektroniczne mierniki uniwersalne, częstościomierz, zasilacze laboratoryjne, oscyloskop z sondami pomiarowymi,
- katalogi elementów i układów elektronicznych, instrukcja do generatora uniwersalnego z funkcją wobulacji
- literatura z rozdziału 6.

4.8.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:	Tak	Nie
1) podać parametry charakteryzujące przebieg sinusoidalny i prostokątny?	☐	☐
2) określić parametry generowanych sygnałów o różnych kształtach?	☐	☐
3) wyjaśnić warunki generacji drgań w generatorach sprzężeniowych?	☐	☐
4) wyjaśnić sposób kompensacji strat mocy w generatorach z ujemną rezystancją?	☐	☐
5) wyjaśnić liniową zmianę częstotliwości generowanego sygnału w generatorze funkcyjnym w czasie wobulacji?	☐	☐

6. LITERATURA

1. Chwaleba A., Moeschke B., Płoszajski G.: Elektronika, WSiP, Warszawa 1999.
2. Głocki W. : Układy cyfrowe, WSiP, Warszawa 1998
3. Pióro B., Pióro M.: Podstawy elektroniki cz.2: WSiP, Warszawa 1997
4. Rusek A.: Podstawy elektroniki cz.2, WSiP, Warszawa 1986
5. Rusek A.: Pracownia elektroniczna , WSiP, Warszawa 1986
6. Tietze U., Schenk Ch.: Układy półprzewodnikowe, WNT, Warszawa 1996