



MINISTERSTWO EDUKACJI
i NAUKI



Anna Kordowicz-Sot
Jan Kowalczyk

Analizowanie działania układów analogowych i cyfrowych 311[50].O1.05

Poradnik dla ucznia

Wydawca

**Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy
Radom 2005**

Recenzenci:

dr inż. Stanisław Derlecki

mgr inż. Andrzej Rodak

Opracowanie redakcyjne:

mgr inż. Katarzyna Maćkowska

Konsultacje:

dr inż. Janusz Figurski

Korekta:

mgr Joanna Iwanowska

Poradnik stanowi obudowę dydaktyczną programu jednostki modułowej 311[50].O1.05
Analizowanie działania układów analogowych i cyfrowych zawartego w modułowym programie
nauczania dla zawodu technik mechatronik.

Wydawca

Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom 2005.

„Projekt współfinansowany ze środków Funduszu Społecznego”

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	3
2. Wymagania wstępne	4
3. Cele kształcenia	5
4. Materiał nauczania	6
4.1. Podstawowe pojęcia elektroniki	6
4.1.1. Materiał nauczania	6
4.1.2. Pytania sprawdzające	9
4.1.3. Ćwiczenia	10
4.1.4. Sprawdzian postępów	10
4.2. Przyrządy półprzewodnikowe elektroniki	10
4.2.1. Materiał nauczania	10
4.2.2. Pytania sprawdzające	21
4.2.3. Ćwiczenia	22
4.2.4. Sprawdzian postępów	25
4.3. Prostowniki, stabilizatory	26
4.3.1. Materiał nauczania	26
4.3.2. Pytania sprawdzające	29
4.3.3. Ćwiczenia	29
4.3.4. Sprawdzian postępów	31
4.4. Wzmacniacze elektroniczne	31
4.4.1. Materiał nauczania	31
4.4.2. Pytania sprawdzające	36
4.4.3. Ćwiczenia	37
4.4.4. Sprawdzian postępów	38
4.5. Układy kombinacyjne	39
4.5.1. Materiał nauczania	39
4.5.2. Pytania sprawdzające	49
4.5.3. Ćwiczenia	50
4.5.4. Sprawdzian postępów	53
4.6. Układy sekwencyjne	54
4.6.1. Materiał nauczania	54
4.6.2. Pytania sprawdzające	62
4.6.3. Ćwiczenia	63
4.6.4. Sprawdzian postępów	66
5. Sprawdzian osiągnięć	67
6. Literatura	70

1. WPROWADZENIE

Poradnik będzie Ci pomocny w przyswajaniu wiedzy z zakresu działania układów analogowych i cyfrowych.

W poradniku zamieszczono:

- wymagania wstępne,
- wykaz umiejętności, jakie ukształtujesz podczas pracy z poradnikiem,
- materiał nauczania niezbędny do opanowania treści jednostki modułowej,
- zestaw pytań przydatny do sprawdzenia, czy już opanowałeś podane treści,
- ćwiczenia pomogą Ci zweryfikować wiadomości teoretyczne oraz ukształtować umiejętności praktyczne,
- sprawdzian osiągnięć, przykładowy zestaw zadań i pytań. Pozytywny wynik sprawdzianu potwierdzi, że dobrze pracowałeś podczas lekcji i że nabrałeś wiedzy i umiejętności z zakresu tej jednostki modułowej,
- literaturę uzupełniającą.

W razie wątpliwości zwróć się o pomoc do nauczyciela.

2. WYMAGANIA WSTĘPNE

Przystępując do realizacji programu jednostki modułowej powinien umieć:

- określać jednostki układu SI,
- przeliczać wielokrotności i podwielokrotności jednostek wielkości fizycznych,
- odczytywać i rysować wykresy funkcji,
- rozwiązywać równania matematyczne, przekształcać wzory,
- czytać proste rysunki techniczne,
- posługiwać się podstawowymi pojęciami z chemii i fizyki w zakresie budowy materii, zjawisk związanych z elektrycznością,
- posługiwać się pojęciami: wielkości wektorowe, skalarne,
- interpretować prawa i zjawiska zachodzące w prostych obwodach elektrycznych,
- wykonywać proste obliczenia związane z obwodami elektrycznymi prądu stałego i przemiennego,
- stosować zasady bhp obowiązujące przy obsłudze układów elektrycznych,
- korzystać z literatury fachowej dotyczącej elektrotechniki i elektroniki.

3. CELE KSZTAŁCENIA

W wyniku realizacji programu jednostki modułowej powinien umieć:

- przyporządkować symbole graficzne podstawowych przyrządów półprzewodnikowych,
- narysować charakterystyki przyrządów półprzewodnikowych: diod, tyrystorów, fotoelementów oraz tranzystora bipolarnego,
- przeanalizować działanie podstawowych przyrządów półprzewodnikowych na podstawie pomiarów i charakterystyk,
- ustalić polaryzację elektrod tranzystora w zależności od jego typu i zakresu pracy,
- określić warunki załączania i wyłączania tyrystorów,
- podać przykłady zastosowań podstawowych przyrządów półprzewodnikowych,
- rozróżnić podstawowe funkcje logiczne,
- przeanalizować działanie prostych układów kombinacyjnych,
- zaprojektować proste układy kombinacyjne,
- porównać układy cyfrowe wykonane w różnych technologiach,
- przeanalizować działanie prostych układów sekwencyjnych,
- zbudować proste układy sekwencyjne, takie jak licznik i rejestr.

4. MATERIAŁ NAUCZANIA

4.1. Podstawowe pojęcia elektroniki

4.1.1. Materiał nauczania

Elektronika to dziedziny wiedzy i techniki zajmujące się wykorzystaniem zjawisk związanych ze sterowanym przepływem nośników ładunku elektrycznych w próżni, w gazach i w ciałach stałych. Elektronika obejmuje teorię działania, właściwości, konstrukcje, technologię i zastosowania elementów i podzespołów elektronicznych w układach i w urządzeniach.

Obecnie najczęściej spotykamy się z elektroniką półprzewodnikową, która zajmuje się elementami i układami scalonymi budowanymi na bazie ciał stałych, jakimi są materiały półprzewodnikowe.

Element elektroniczny to samodzielna, nierozdzielna konstrukcyjnie część składowa układu elektronicznego. Wśród elementów elektronicznych wymienia się:

- **elementy bierne (pasywne)**, do których zaliczane są rezystory, kondensatory, elementy indukcyjne (cewki, dławiki indukcyjne)¹; role tych elementów są różne, zależnie od układu, w którym pracują,
- **elementy czynne (aktywne)** to takie, które umożliwiają podwyższanie poziomu przetwarzanego sygnału elektrycznego (np. tranzystory) lub będące źródłem energii elektrycznej (np. fotoogniwa),
- **elementy przełączające** przewidziane są do pracy dwustanowej w stanach blokowania przewodzenia prądu (stan wyłączenia) oraz przewodzenia (stan włączenia).

Układ elektroniczny to zbiór odpowiednio połączonych elementów lub podzespołów elektronicznych, które spełniają określone funkcje użytkowe, np. zasilacza, wzmacniacza. Układy elektroniczne najogólniej dzieli się na:

- **układy analogowe**; są to układy, które przetwarzają napięcia i prądy (sygnały) o dowolnych wartościach - sygnały ciągłe - z określonego przedziału wartości,
- **układy cyfrowe** zwane też **układami logicznymi** służą do przetwarzania sygnałów dwustanowych zwanych sygnałami cyfrowymi; sygnały te przyjmują tylko dwa poziomy, tzw. 0 i 1.

We współczesnej elektronice w budowie układów elektronicznych dominujące znaczenie posiadają **układy scalone**. **Układ scalony** to zwykle zminiaturyzowana struktura układu elektronicznego, w którym wszystkie lub część elementów elektronicznych jest wbudowana na podłożu lub związana z podłożem, którym może być materiał półprzewodnikowy lub izolacyjny. Niemożliwą jest zmiana układu połączeń wewnętrznych układów ani ich naprawianie.

Układy scalone ze względu na przetwarzane sygnały można podzielić na analogowe i cyfrowe. Ze względu na technologię produkcji można je podzielić na:

- **monolityczne układy scalone** - to układy, w których wszystkie zminiaturyzowane elementy elektronicznego są nierozłącznie wykonane w materiale (podłożu) półprzewodnikowym.
- **hybrydowe układy scalone** - to układy, które mogą być budowane z elementów dyskretnych i z użyciem układów monolitycznych rozmieszczonych i połączonych nierozdzielnie na podłożu izolacyjnym, np. szklanym lub ceramicznym.

¹ W elektrotechnice do elementów czynnych zaliczane są rezystory-ze względu na pobór mocy czynnej, do biernych zaliczane są elementy pojemnościowe i indukcyjne- ze względu na pobór mocy biernej.

Urządzenie elektroniczne to wyrób o określonej złożoności i przeznaczeniu, składający się głównie z układów elektronicznych.

Półprzewodnik, domieszkowanie półprzewodników, półprzewodnik typu n i typu p.

Materiały ze względu na własności przewodzące możemy podzielić na trzy grupy: przewodniki, izolatory i półprzewodniki.

Półprzewodniki to materiały o właściwościach elektrycznych pośrednich między izolatorami i przewodnikami, które w pewnych warunkach zewnętrznych, takich jak: temperatura, promieniowanie elektromagnetyczne oraz pod wpływem napięcia elektrycznego mogą przewodzić prąd. Rezystywność półprzewodników może zawierać się w granicach $(10^{-7} \div 10^{-3})\Omega\cdot m$, przewodników: $(10^{-8} \div 10^{-7})\Omega\cdot m$. Wzrost temperatury zwykle zwiększa przewodność półprzewodników gdyż wzrasta liczba elektronów walencyjnych, które uwalniają się z wiązań atomowych i stają się elektronami swobodnymi.

Grupa materiałów o właściwościach półprzewodnikowych obejmuje takie substancje, jak: pierwiastki chemiczne (krzem, german) oraz związki chemiczne (selen, fosfor, arsenu, galu, telluru oraz pewną grupę tlenków i siarczków).

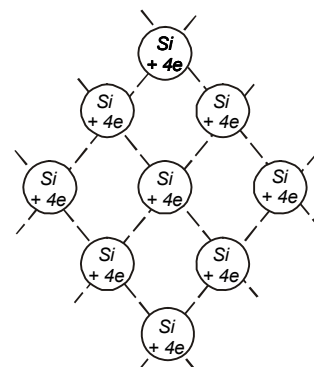
Krzem to pierwiastek chemiczny, czterowartościowy, o strukturze krystalicznej. Struktura krystaliczna materiału oznacza uporządkowane przestrzennie rozmieszczenie jego atomów. w regularne, powtarzające się układy przestrzenne. Budowa polikrystaliczna ciała oznacza uporządkowane rozmieszczenie atomów w stosunkowo niewielkich obszarach objętości. Budowa monokrystaliczna ciała oznacza jednorodne uporządkowanie atomów w sieci krystalicznej w całej jego objętości. Materiały półprzewodnikowe zwykle są monokryształami.

Półprzewodnikami samoistnymi nazywa się materiały chemicznie czyste, o doskonałej sieci monokrystalicznej i o jednakowej liczbie swobodnych nośników ładunku dodatniego (dziur) i ujemnego (elektronów) w jednostce objętości.

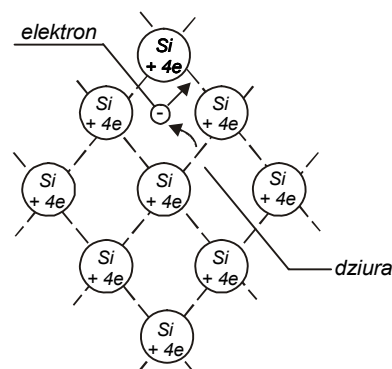
Koncentracją nośników (lub atomów) nazywamy liczbę nośników ładunku (atomów) w jednostce objętości materiału (ośrodku). W sieci krystalicznej czystego krzemu, której płaski model pokazany jest na rys. 4.1, każdy atom krzemu połączony jest z czterema sąsiadującymi atomami przez wiązania przy udziale elektronów walencyjnych.

Dziurą elektronową lub krótko dziurą nazywa się obszar, w którym wystąpił niedobór elektronu; dziura posiada ładunek elektryczny dodatni równy ładunkowi elektronu. Ilustruje to rys. 4.2. Powstała dziura może być zapełniona przez elektron z sąsiedniego wiązania, a elektron ten pozostawi po sobie kolejną dziurę, która ponownie może być zapełniona przez inny elektron. Przemieszczający się obszar dziury oznacza, że w półprzewodnikach możliwy jest przepływ prądu elektrycznego wywołanego ruchem dziur (ładunków dodatnich).

Półprzewodniki domieszkowane wytwarza się przez wprowadzenie do sieci krystalicznej krzemu określonej ilości atomów tzw. domieszki. Są to atomy pierwiastków trój- lub pięciowartościowych. W ten sposób wytwarza się półprzewodniki domieszkowane typu **P** lub **N**. **Półprzewodnik typu N** otrzymamy wprowadzając do sieci krzemu atomy pierwiastka pięciowartościowego – posiadającego pięć elektronów walencyjnych (np. arsenu, fosforu, antymonu). Przewodzenie prądu w półprzewodnikach typu **N** odbywa się głównie z udziałem elektronów, które są nośnikami większościowymi zaś dziur jest tam



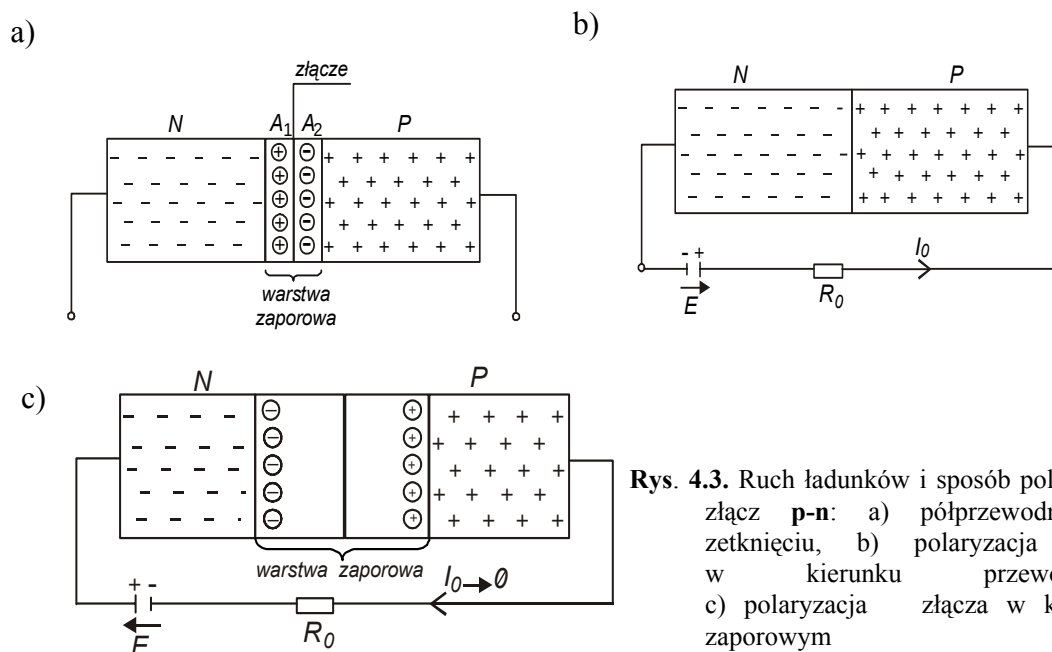
Rys. 4.1. Płaski model siatki krystalicznej krzemu



Rys. 4.2. Ilustracja powstawania dziury elektronowej

znacznie mniej i dlatego nazywa się je nośnikami mniejszościowymi. **Półprzewodnik typu P** otrzymamy po wprowadzeniu do sieci krystalicznej krzemu atomów pierwiastka trójwartościowego (np. boru, aluminium, galu, indu). Przewodzenie prądu w półprzewodnikach typu **P** odbywa się głównie z udziałem dziur, które są tu nośnikami większościowymi zaś elektronów jest tam znacznie mniej i dlatego też nazywa się je nośnikami mniejszościowymi.

Złącze p-n są to atomowo ściśle zespolone dwa obszary półprzewodników typu **N** z typu **P**. Złącze **p-n** ze względu na zdolność do jednokierunkowego przewodzenia prądu jest powszechnie wykorzystywane do budowy elementów i układów półprzewodnikowych.

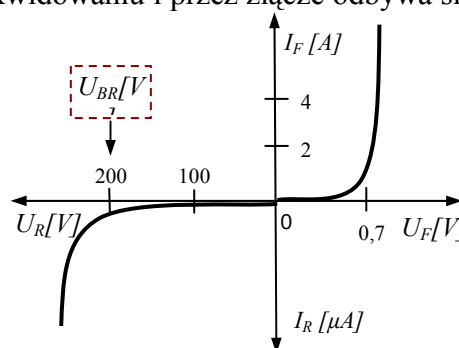


Rys. 4.3. Ruch ładunków i sposób polaryzacji złącza **p-n**: a) półprzewodnik po zetknięciu, b) polaryzacja złącza w kierunku przewodzenia, c) polaryzacja złącza w kierunku zaporowym

Rysunek 4.3 przedstawia trzy przypadki, w jakich możemy wyobrazić sobie złącze **p-n**. Rys. 4.3 a to złącze bez polaryzacji napięciem zewnętrznym, w którym na granicy obszarów odbywa się dyfuzyjny przepływ nośników ładunku. Elektrony przemieszczają się z obszaru typu **N** do **P**. Przepływ elektronów sprawia, że przy granicy obszaru **N** powstaje pewien obszar ładunku dodatniego. Oznacza to powstanie wewnętrznej różnicy potencjałów (bariery potencjałów) na granicy obszarów, która uniemożliwia dalszy ruch ładunków przez złącze. Dla jej skompensowania (zrównoważenia) należy przyłożyć napięcie z zewnątrz jak na rys. 4.3b, którego wartość dla krzemu wynosi ok. 0,7V. Złącze **p-n** jak na rys. 4.3b jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Wtedy możliwy jest przepływ prądu przez złącze. Bariera potencjałów na granicy obszarów zwana napięciem dyfuzyjnym ulega zlikwidowaniu i przez złącze odbywa się przepływ większościowych nośników ładunków, które tworzą prąd o wartości zależnej tylko od napięcia źródła i oporności w obwodzie, zaś ubytki ładunków w obszarach **P** oraz **N** są uzupełniane z zewnętrznego źródła zasilania.

Po zmianie kierunku napięcia zewnętrznego jak na rys. 4.3c, złącze **p-n** spolaryzowane jest zaporowo. W wyniku działania zewnętrznego źródła napięcia nastąpi odsunięcie ładunków większościowych od granicy obszarów i poszerzeniu ulega warstwa zaporowa. Przez złącze przepływa wtedy jedynie znikomy (pomijalny) prąd utworzony z nośników mniejszościowych, tj. z dziur z obszaru **N** oraz elektronów z obszaru **P**.

Oznacza to, że złącze p-n przewodzi prąd elektryczny tylko w jednym kierunku (przy odpowiedniej polaryzacji). Właściwości elektryczne złącza **p-n** jak i większości przyrządów



Rys. 4.4. Przykład charakterystyki $I(U)$ złącza PN

półprzewodnikowych przedstawia się graficznie w postaci charakterystyk prądowo-napięciowych $I(U)$. Na rys. 4.4. przedstawiono przykład charakterystyki $I(U)$ złącza. Wartości napięć i prądów, jakie zapisane są na osiach układu współrzędnych zależne są od wymiarów i technologii wykonania złącza. Należy tu zwrócić uwagę na prawidłowości, jakie występują na większości charakterystyk krzemowych złączy **p-n**:

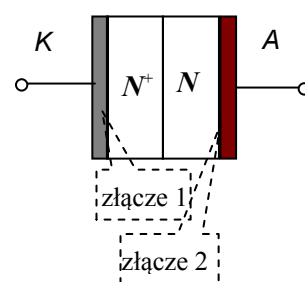
- dla złącz spolaryzowanych w kierunku przewodzenia prąd przewodzenia I_F zaczyna zdecydowanie narastać przy napięciu $U_F \approx 0,7V$,
- przy polaryzacji wstecznej (zaporowej) złącza płynie niewielki prąd wsteczny I_R , znikomy w stosunku do prądu przewodzenia I_F ; wartość prądu I_R pozostaje praktycznie niezmienna przy stosunkowo szerokim zakresie zmian napięcia wstecznego U_R ,
- przy napięciu wstecznym powyżej określonej wartości (na rys.4.4 ok. 200V) obserwuje się gwałtowne zwiększanie się prądu wstecznego I_R ; efekt ten nazywa się **przebicciem złącza p-n**, a wartość napięcia, przy którym pojawia się przebiccie złącza może wynosić od pojedynczych woltów do kilku kV, zależnie od technologii wykonania złącza.

Złącze metal-półprzewodnik (m-s).

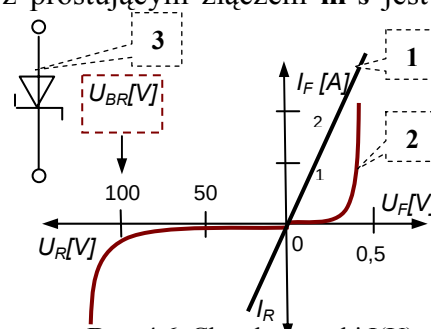
W wyniku pokrycia półprzewodnika warstwą metalu powstaje złącze metal-półprzewodnik (z ang. Metal-Semiconductor). W zależności od rodzaju metalu naniesionego na półprzewodnik można uzyskać złącza **m-s** o bardzo różnych właściwościach elektrycznych. Na rys. 4.5 pokazano przykład budowy podzespołu zwanego diodą Schottky'ego, w którym występują dwa złącza **m-s**. Ich charakterystyki prądowo-napięciowe pokazane są na rys. 4.6. Złącze (1) to zwyczajne złącze wykorzystywane na wyprowadzenia, zwane omowym. Jego charakterystyka $I(U)$ jest liniowa i niezależna od kierunku przyłożonego napięcia. Złącze (2) powstaje na styku odpowiednio dobranego metalu i półprzewodnika. Jego charakterystyka $I(U)$ jest nieliniowa i wykazuje zdolność do tylko jednokierunkowego przewodzenia prądu, podobnie jak złącze **p-n**. Przepływ prądu przewodzenia przez złącze **m-s** związany jest z ruchem elektronów z półprzewodnika do metalu. Natomiast przepływ ładunków mniejszościowych w przeciwnym kierunku jest znikomy. Dzięki temu złącza te szybciej reagują na zmiany napięcia niż złącza **p-n**. Szybkość działania diod z prostującym złączem **m-s** jest znacznie większa niż diod ze złączem **p-n** i dlatego diody te stosowane są głównie w obwodach wielkich częstotliwości.

Spadek napięcia na przewodzącym złączu **m-s** jest mniejszy niż na krzemowych złączach **p-n** i wynosi około 0,4V. Wadą tych diod jest stosunkowo niskie dopuszczalne napięcie wsteczne, którego wartości są rzędu 100V.

Właściwości kierunkowe złączy **p-n** oraz **m-s** wykorzystywane są między innymi w diodach stosowanych do prostowania prądu elektrycznego.



Rys. 4.5. Budowa diody Schottky'ego



Rys. 4.6. Charakterystyki $I(U)$ złączy **m-s**: 1) omowego, 2) prostującego, 3) symbol graficzny diody Schottky'ego

4.1.2. Pytania sprawdzające

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

1. Co to jest półprzewodnik, półprzewodnik samoistny?
2. Co to są elementy elektroniczne bierno i elementy czynne?
3. Co odróżnia układy elektroniczne analogowe i układy cyfrowe (logiczne)?
4. Jakie rodzaje ładunków występują w półprzewodnikach?
5. Co to jest półprzewodnik typu N i typu P? Co to jest złącze **p-n**?
6. Jakie właściwości posiada złącze **p-n** zależnie od kierunku przyłożonego napięcia?
7. Co to jest złącze m-s i jakie są jego właściwości?
8. Na czym polega i kiedy występuje przebicie złącza **p-n** lub **m-s**?

4.1.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Zbadaj własności diod przy pomocy multimetru cyfrowego i analogowego.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinien:

- 1) przy pomocy multimetru cyfrowego z funkcją test diod przeprowadzić badanie właściwości złącza diod sprawnej i uszkodzonej, zanotować wyniki obserwacji,
- 2) przy pomocy omomierza analogowego na jednym z jego zakresów pomiarowych przeprowadzić badanie złącza diod sprawnej i uszkodzonej i zanotować wyniki,
- 3) sprawdzić wpływ kierunku włączenia diody na przepływ prądu w obwodzie napięcia stałego złożonym z połączonych szeregowo: diody, źródła napięcia, opornika i miliamperomierza.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- multimetry cyfrowe z funkcją test diod, multimetry analogowe z omomierzem, zasilacz,
- sprawne i uszkodzone diody półprzewodnikowe różnych typów,.

4.1.4. Sprawdzian postępów

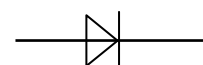
Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) wyjaśnić pojęcia: półprzewodnik, półprzewodnik samoistny?	☐	☐
2) wyjaśnić pojęcia: elementy elektroniczne bierno, elementy czynne?	☐	☐
3) wskazać różnice między układami analogowymi a cyfrowymi (logicznymi)?	☐	☐
4) wyjaśnić pojęcia: półprzewodnik typu N i typu P?	☐	☐
5) określić rodzaje ładunków występujących w półprzewodnikach?	☐	☐
6) określić własności złącza p-n w zależności od kierunku polaryzacji napięcia?	☐	☐
7) Wyjaśnić, na czym polega i kiedy występuje przebicie złącza p-n lub m-s?	☐	☐

4.2. Przyrządy półprzewodnikowe elektroniki

4.2.1. Materiał nauczania

Diody półprzewodnikowe to elementy dwukońcówkowe, w większości przypadków wykorzystujące właściwość jednokierunkowego przewodzenia prądu przez złącze **p-n**. Symbol



Rys. 4.7. Symbol graficzny diody półprzewodnikowej

graficzny diod pokazany jest na rys. 4.7. Stosowane są różne kryteria klasyfikacji diod. Tu ograniczymy się jedynie do omówienia kilku rodzajów diod, klasyfikując je ze względu na zastosowania.

Diody prostownicze to elementy do zastosowań w układach prostowniczych (służących do przetwarzania napięcia przemiennego na stałe). Termin ten może obejmować diody o różnym przeznaczeniu, różniące się budową oraz parametrami statycznymi i dynamicznymi.

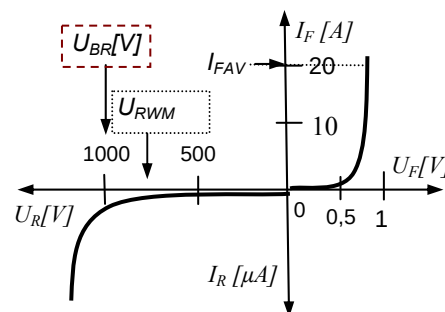
Podstawą budowy konwencjonalnej diody prostowniczej jest złącze **p-n**, którego właściwości omówiono powyżej. Właściwości elektryczne diody prostowniczej najlepiej przedstawia jej charakterystyka prądowo-napięciowa, której przykładowy przebieg pokazany jest na rys. 4.8. Z jej charakterystyki wynika, że prąd elektryczny I_F zaczyna wzrastać zdecydowanie po przekroczeniu napięcia $U_F \approx 0,7V$ – zwanego napięciem progowym. Wartość jego jest różna dla różnych półprzewodników, na bazie których wykonano diodę (dla germanu: 0,2V, krzemu: 0,7 V). Druga część charakterystyki – dla napięć U_R związana jest z kierunkiem zaporowym. Dioda prostownicza przy zwiększaniu napięcia wstecznego może ulec tzw. przebiciu, które objawia się gwałtownym wzrostem prądu wstecznego. Wartość napięcia przebicia złącza może wynosić od kilkudziesięciu woltów do kilku kilowoltów – zależnie od typu diody. Przebicie złącza nie musi oznaczać jego uszkodzenia, jeśli trwa ono odpowiednio krótko i przy małym prądzie wstecznym.

Na charakterystyce zaznaczono też położenie trzech ważniejszych parametrów charakteryzujących możliwości tego rodzaju diod:

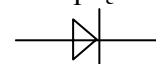
$U_{(BR)}$ – napięcie przebicia diody,

U_{RWM} – szczytowe, dopuszczalne wsteczne napięcie pracy,

I_{FAV} , U_F – dopuszczalna wartość średnia prądu przewodzenia i towarzyszące mu napięcie (U_F).



Rys. 4.8. Przykład charakterystyki $I(U)$ krzemowej diody prostowniczej o dopuszczalnym prądzie przewodzenia $I_{FAV}=20A$ i napięciu wstecznym $U_{RWM}=700V$

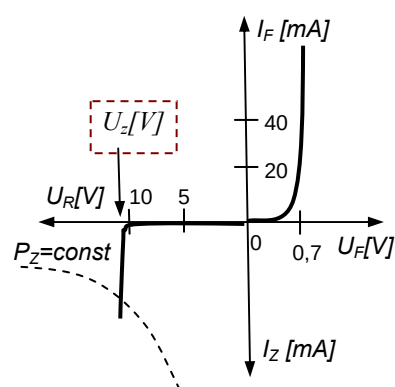


Rys. 4.9. Symbol graficzny diody Zenera

Diody Zenera (stabilizacyjne) to grupa diod do pracy w układach stabilizacji i ograniczania wartości napięć. Symbol graficzny diod Zenera pokazany jest na rys. 4.9, zaś przykładowa charakterystyka $I = f(U)$ na rys. 4.10. W układach stabilizacji diody te pracują przy polaryzacji zaporowej złącza i wykorzystane jest zjawisko przebicia złącza, objawiające się możliwością przepływu stosunkowo dużego prądu wstecznego, przy praktycznie stałym napięciu na diodzie. Wartość napięcia przebicia diody Zenera nazywa się napięciem Zenera i jest ono głównym parametrem tych diod. Wartość napięcia przebicia diod Zenera może wynosić od kilku do kilkuset woltów zależnie od typu diody.

Drugim ważnym parametrem diod Zenera jest dopuszczalna wartość mocy traconej w złączu $P_Z=U_Z \cdot I_Z$, której nie wolno przekraczać.

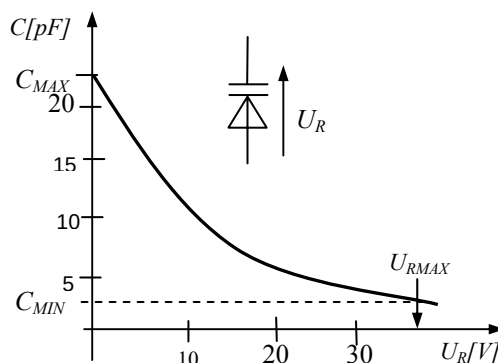
Zjawisku przebicia w diodzie Zenera towarzyszą duże zmiany prądu przy niemal stałej wartości napięcia na diodzie. Efekt ten jest wykorzystywany w układach utrzymujących stałą wartość napięcia (stabilizatory, wzorce napięcia).



Rys. 4.10. Przykładowa charakterystyka $I(U)$ diody Zenera

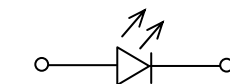
Diody pojemnościowe (warikapy) w układach elektronicznych pełną rolę kondensatorów o sterowanej pojemności (zmienianej za pomocą zmian zewnętrznego napięcia). Warikapy pracują przy polaryzacji wstecznej złącza. Wykorzystuje się w nich zjawisko zmiany pojemności elektrycznej złącza *P-N* pod wpływem zmian napięcia polaryzacji. Symbol graficzny oraz charakterystyką diody pojemnościowej podano na rys. 4.11. Warikapy można traktować jako kondensatory, których pojemność maleje w miarę wzrostu napięcia wstecznego – rys. 4.11.

Diody pojemnościowe stosowane są w obwodach rezonansowych, gdzie zastąpiły one tradycyjne kondensatory obrotowe, pozwalając na automatyczne przestrajanie obwodów (zmianę ich częstotliwości rezonansowej) przez zmianę wartości napięcia polaryzacji.



Rys. 4.11. Przykład charakterystyki $C=f(U_R)$ diody warikapowej

Diody elektroluminescencyjne (LED-Light Emitting Diode) – rys. 4.12 to podzespoły z grupy elementów optoelektronicznych, zaliczane do fotoemiterów. W wyniku przepływu prądu w kierunku przewodzenia emitują one promieniowanie elektromagnetyczne w postaci fal świetlnych. Wartości prądów przewodzenia wymaganych dla uzyskania optymalnej jasności świecenia mogą wynosić od kilku do kilkudziesięciu mA i są zależne od wymiarów struktury półprzewodnikowej oraz mocy promieniowania. Charakterystyki $I=f(U)$ diod LED mają przebieg podobny do innych diod, jednak spadek napięcia na przewodzącej diodzie LED jest dosyć duży w porównaniu z innymi diodami półprzewodnikowymi i może ono wynosić od 1,5 V do 2,5 V, w zależności od materiału złącza i związanej z tym barwy emitowanego światła. Diody te powszechnie wykorzystywane są jako wskaźniki stanu pracy urządzeń, w wyświetlaczach, jako źródła światła (zwykle podczerwieni) w nadajnikach układów zdalnego sterowania.



Rys. 4.12. Symbol graficzny diody LED

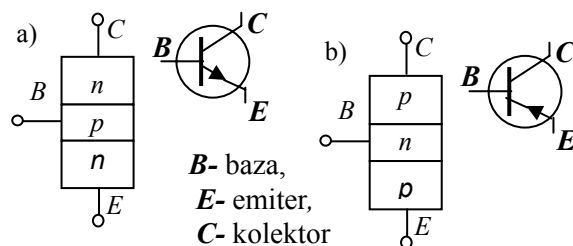
Tranzystory bipolarne – to grupa elementów półprzewodnikowych umożliwiających wzmacnianie sygnałów elektrycznych i sterowanie przepływem prądów. Produkowane są jako elementy dyskretne (indywidualne) oraz wchodzi w skład większości monolitycznych układów scalonych. Obecnie najogólniej dzieli się je na:

- tranzystory bipolarne - przewodzenie prądów odbywa się w nich z udziałem dwóch rodzajów nośników ładunku elektrycznego, dziur i elektronów, stąd bipolarne,
- tranzystory unipolarne (polowe) – przewodzenie prądów odbywa się w nich z udziałem jednego rodzaju nośników ładunku elektrycznego, dziur albo elektronów oraz sterowanie przepływem prądu odbywa się za pomocą pola elektrycznego, stąd nazwa polowe.

Wszystkie tranzystory bipolarne to zwykle elementy trójelektrodowe, zawierające trzy warstwy półprzewodnika i dwa złącza *p-n* (rys. 4.13). Elektrody tranzystora bipolarnego nazywane są: emiter- E, baza- B, kolektor (C, K). Zależnie od układu warstw półprzewodnika tworzących tranzystory, rozróżniamy dwa rodzaje tranzystorów bipolarnych:

- 1) tranzystor *NPN*- rys 4.13a,
- 2) tranzystor *PNP*- rys.4.13b.

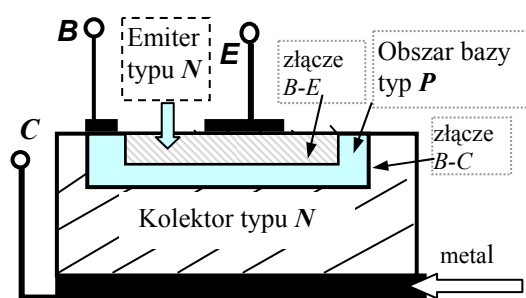
Technologia produkcji wymusza nieco bardziej złożone konstrukcje budowy wewnętrznej, której przykład pokazany jest w dużym powiększeniu na rys. 4.14.



Rys. 4.13. Układy warstw półprzewodnika, symbole graficzne i nazwy elektrod tranzystorów bipolarnych: a) NPN, b) PNP

Zasada działania tranzystora bipolarnego

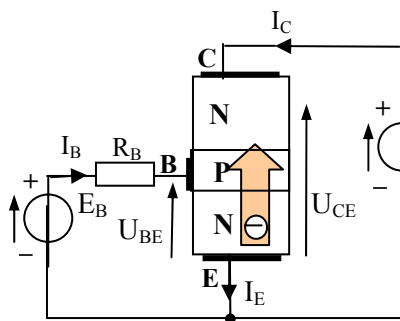
Tranzystory bipolarne zalicza się do elementów aktywnych, gdyż pozwalają na wzmacnianie prądów oraz sterowanie prądem w obwodzie sterowanym (wyjściowym) za pomocą prądu w obwodzie sterującym (wejściowym). Ponieważ tranzystor posiada trzy elektrody – E, B, C to jedna z nich zawsze jest wspólna dla obwodów wejścia i wyjścia. Zależnie od tego, która z elektrod jest wspólna to mamy układy: wspólnej bazy (ozn. WB lub OB), wspólnego emitera (WE, OE), wspólnego kolektora (WK, OK). Ze względu na zalety stosunkowo najczęściej spotykanym jest układ WE, którym tu głównie będziemy się zajmować.



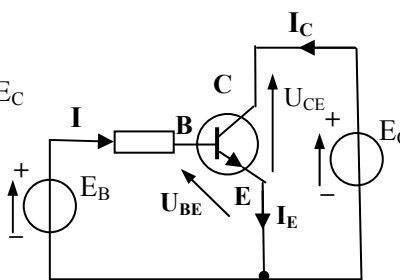
Rys. 4.14. Przekrój budowy tranzystora NPN o strukturze płaskiej (planarnej)

Dla uzyskania wzmacniającego działania tranzystora bipolarnego NPN lub PNP konieczna jest odpowiednia polaryzacja jego elektrod i złącz za pomocą napięć zewnętrznych.

Złącze B–E należy polaryzować w kierunku przewodzenia, zaś złącze C–E zaporowo. Zasady polaryzacji tranzystora PNP są identyczne, lecz kierunki napięć między elektrodami muszą być odwrotne. Zasadę działania tranzystora wyjaśnimy na przykładzie tranzystora NPN w układzie WE – rys. 4.15, 4.16. Zgodnie z wymaganym sposobem polaryzacji złączy tranzystora, napięcia źródeł E_B i E_C muszą być tak dobrane, aby spełniały warunek: $U_{CE} \gg U_{BE}$. Wtedy przez złącze B–E przepływa prąd przewodzenia o wartości zależnej od napięcia źródła oraz oporu w obwodzie dołączonym do elektrod B–E (obwód sterujący).



Rys. 4.15. Polaryzacja złącz tranzystora bipolarnego NPN w układzie WE.



Rys. 4.16. Tranzystor bipolarny NPN w układzie WE.

Gdy złącze B–E jest w stanie przewodzenia, to elektrony z emitera przepływają do bazy. Dalej przez cienką bazę na zasadzie dyfuzji podążają one w kierunku kolektora. Ponieważ potencjał kolektora jest wyższy niż bazy, elektrony te na złączu B–C wychwytywane są do obszaru kolektora. Dzięki temu złącze B–C zaczyna przewodzić prąd pomimo polaryzacji zaporowej. Większość elektronów wysyłanych z emitera bazy dociera do kolektora przez cienki obszar bazy. Tylko niewielka ich część tworzy prąd w obwodzie B–E.

Zależność między prądem bazy i kolektora ujmuje parametr tranzystora oznaczany jako β_0 lub h_{21e} , i nazywamy małosygnałowym współczynnikiem wzmocnienia prądowego tranzystora.

Małosygnałowy współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora w układzie WE jest to iloraz zmiany wartości prądu kolektora ΔI_C i zmiany prądu bazy ΔI_B wywołującej zmianę prądu kolektora.

$$h_{21e} = \beta_0 = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Wartość współczynnika β_0 może wynosić od kilkudziesięciu do kilkuset. Efekt wzmacniający tranzystora oznacza tu duże zmiany prądu kolektora (prądu sterowanego) wywoływane β -krotnie mniejszymi zmianami prądu bazy (prądu sterującego). Oprócz współczynnika $\beta_0 = h_{21e}$

w opisie własności tranzystorów bipolarnych stosuje się **wielkosygnalowy współczynnik wzmocnienia** prądowego, dla układu WE definiowany jako:

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

Prądy płynące w tranzystorze możemy opisać równaniem:

$$I_E = I_C + I_B,$$

gdzie: I_E – prąd emitera, I_B – prąd bazy, I_C – prąd kolektora.

Ponieważ prąd bazy jest $h_{21E} = \beta$ - krotnie mniejszy w stosunku do prądu kolektora to w przybliżonych rozważaniach możliwe jest przyjęcie założenia:

$$I_E \cong I_C.$$

Charakterystyki statyczne tranzystorów

Charakterystyki statyczne zawierają informacje o parametrach elektrycznych a zatem i o możliwościach wykorzystania tranzystora w określonych układach elektronicznych. Najczęściej podaje się:

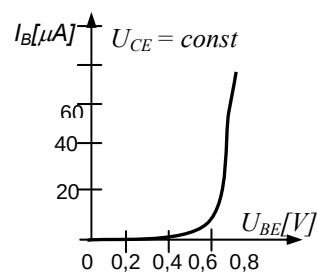
- charakterystyki wejściowe $I_B(U_{BE})$ rys. 4.18 – zależność prądu bazy I_B przy zmianie napięcia baza – emiter U_{BE} oraz stałej wartości napięcia kolektor – emiter (U_{CE}). Krzywa ta jest charakterystyką diody półprzewodnikowej utworzonej w oparciu o złącze baza – emiter spolaryzowane w kierunku przewodzenia;
- charakterystyki wyjściowe – $I_C(U_{CE})$ – rys. 4.19- przedstawiają one wpływ prądu bazy na zależności prądu kolektora od napięcia U_{CE} . Prąd kolektora nieznacznie zależy od napięcia U_{CE} ; (tranzystor pracuje tu w stanie aktywnym). Prąd kolektora w stanie aktywnym jest zależny głównie od prądu bazy i można przyjmować: $I_C = \beta \cdot I_B$. Ważnym jest fakt, że przy prądzie bazy $I_B = 0$ prąd kolektora posiada niewielką wartość, większą od zera. Prąd ten, zwany prądem zerowym kolektora, powstaje z nośników mniejszościowych bazy i kolektora i można go pomijać.

Praca tranzystora przy prądzie $I_B = 0$ nazywa się **stanem odcięcia tranzystora**. Na charakterystykach wyjściowych – rys. 4.18 linią przerywaną zaznaczono tzw. obszar bezpiecznej pracy tranzystora, który wyznaczają niżej podane i zamieszczone w katalogach dopuszczalne wartości wielkości:

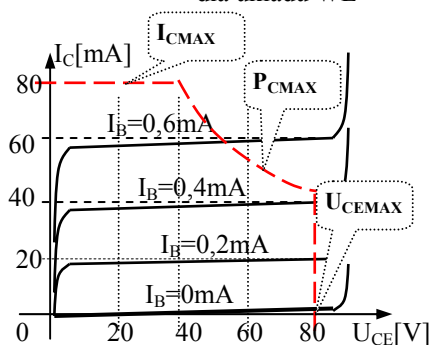
- $I_{C\text{MAX}}$ - dopuszczalna wartość prądu kolektora,
- $U_{CE\text{MAX}}$ - dopuszczalna wartość napięcia kolektor-emiter, jej przekroczenie prowadzi do przebicia w obwodzie kolektor-emiter,
- $P_{C\text{MAX}} = (U_{CE} \cdot I_C)_{\text{MAX}}$ - ograniczona hiperbolą, dopuszczalna wartość mocy wydzielanej w obwodzie kolektora; jej przekraczanie grozi uszkodzeniem struktury tranzystora wskutek przegrzewania.

Z charakterystyk wyjściowych tranzystorów można wykreślić charakterystykę przejściową – rys. 4.19, która podaje zależność pomiędzy prądem kolektora I_C a prądem bazy I_B przy stałej wartości U_{CE} . Wynika z niej, iż zależność $I_C = f(I_B)$ jest liniowa i można przyjmować, że **prąd kolektora jest proporcjonalny do prądu bazy**.

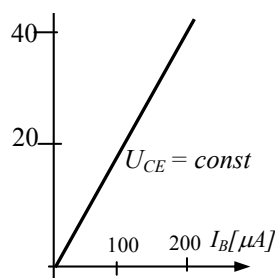
Temperatura silnie wpływa na przebieg charakterystyk i parametry tranzystora. Jej wzrost powoduje wykładniczy wzrost prądu zerowego I_{CE0} w obwodzie kolektora. Podwaja się on przy wzroście temperatury o 10°K. Zachodzi też prawie liniowe zmniejszanie się spadku napięcia na złączu B-E; zmiana ta wynosi ok. (-2,3mV/K). Dopuszczalna temperatura pracy tranzystorów krzemowych może dochodzić do 420°K (150°C).



Rys. 4.17. Charakterystyka wejściowa tranzystora dla układu WE



Rys. 4.18. Charakterystyki wyjściowe tranzystora dla układu WE



Rys. 4.19. Charakterystyka przejściowa $I_C = f(I_B)$,

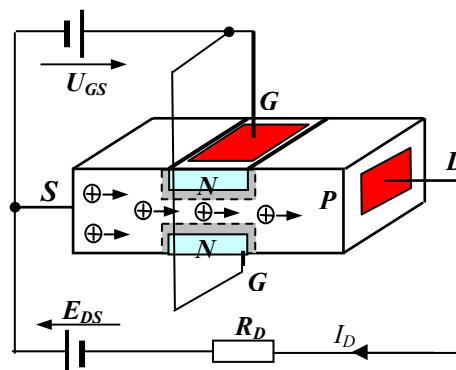
Tranzystory polowe (unipolarne) oznaczane skrótem **FET** – z ang. Field- Effect Transistor, to grupa elementów półprzewodnikowych, w których sterowanie przepływem prądu odbywa się za pomocą pola elektrycznego. Słowo – unipolarne – oznacza, że przewodzenie prądów odbywa się w nich z udziałem jednego rodzaju nośników ładunku elektrycznego, dziur albo elektronów. W zależności od budowy struktury wyróżnia się dwa rodzaje tranzystorów polowych:

- tranzystory złączowe – **JFET**,
- tranzystory z izolowaną elektrodą sterującą (z izolowaną bramką) – **FET, MOSFET**.

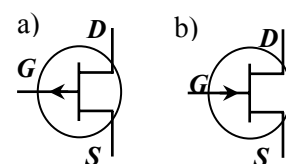
Budowa i zasada działania tranzystora polowego złączowego (JFET)

Wyróżnia się tranzystory polowe JFET z kanałem typu **N** lub **P**. Budowę i działanie tranzystora z kanałem typu **P** wyjaśnia rys. 4.20. Elektrody tranzystorów polowych oznacza się jako: **G** – bramka, **D** – dren, **S** – źródło. Napięcie sterujące doprowadza się pomiędzy elektrody **G-S** tak, aby złącze **p-n** zawarte pomiędzy nimi spolaryzować zaporowo. Obwód sterowany dołączony jest do elektrod **D-S**, pomiędzy którymi znajduje się tzw. kanał tranzystora (typu **P** lub **N**). Gdy w rozważanym tranzystorze z kanałem typu **P** do elektrody **S** doprowadzimy dodatni, a do elektrody **D** ujemny biegun źródła E_{DS} , to dziury znajdujące się w kanale typu **P** popłyną w kierunku elektrody **D**, tworząc prąd drenu I_D . Po doprowadzeniu dodatniego napięcia U_{GS} pomiędzy elektrody **G** i **S** na złączu **p-n** powstaje warstwa zaporowa (obszar nieprzewodzący bez nośników swobodnych, objęty linią przerywaną). Zwiększanie napięcia wstecznego zwiększa grubość warstwy zaporowej i zwęża kanał, przez który przepływa prąd drenu I_D . Napięcie U_{GS} , zwężając kanał, utrudnia przepływ dziur, a więc zmniejsza prąd drenu I_D . Oznacza to, że w tranzystorach polowych wartość prądu drenu I_D zmienia się wraz ze zmianami napięcia sterującego U_{GS} . Sterowanie to jest praktycznie bezprądowe ($I_G \approx 0$) i dlatego tranzystory polowe zaliczane są do elementów sterowanych napięciowo. Złącze **GS** spolaryzowane zaporowo posiada bardzo dużą rezystancję wejściową (od 10^6 do $10^{11} \Omega$).

Symbole graficzne tranzystorów polowych złączowych stosowane na schematach pokazane są na rys. 4.21. Sposób polaryzacji ich elektrod na rys. 4.22. Własności tranzystora polowego również przedstawiane są graficznie na charakterystykach, np. wyjściowych, których przykład dla tranzystora z kanałem typu **P** przedstawia rys. 4.23. Z tych charakterystyk można odczytać, że największy prąd drenu I_D przepływa przy napięciu $U_{GS} = 0V$. Wzrost napięcia U_{GS} , które polaryzuje wstecznie złącze **G-S** prowadzi do wzrostu oporności kanału, a zatem do zmniejszania prądu drenu aż do

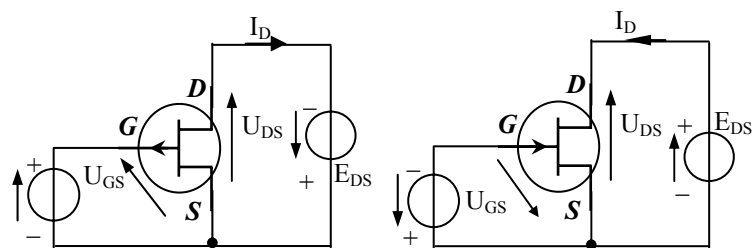


Rys. 4.20. zasada budowy tranzystora JFET z kanałem typu **P**

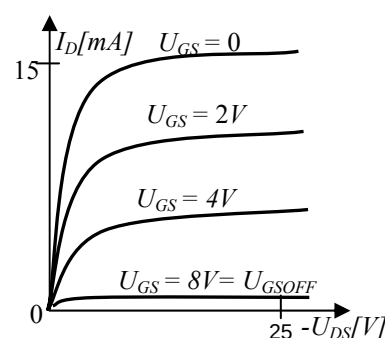


Rys. 4.21. Symbole graficzne tranzystorów polowych złączowych:

- a) z kanałem typu **P**,
- b) z kanałem typu **N**



Rys. 4.22. Układy polaryzacji elektrod tranzystora polowego JFET: a) z kanałem typu **P**, b) z kanałem typu **N**



Rys. 4.23. Charakterystyki wyjściowe tranzystora polowego z kanałem typu **P**

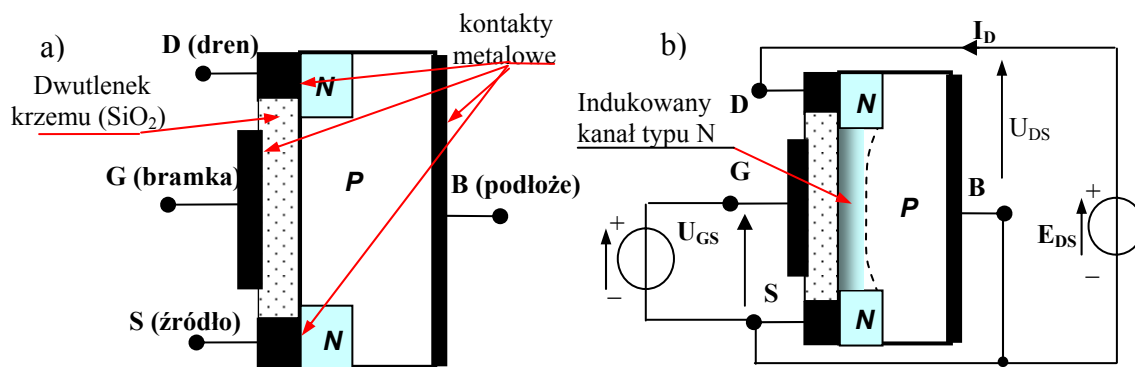
praktycznie całkowitego wyłączenia go przy napięciu $U_{GS} = U_{GSOFF}$, zwanym **napięciem odcięcia bramka – źródło**. Przy napięciu $U_{GS} = U_{GSOFF}$ prąd drenu osiąga wartości rzędu μA i można go pomijać w stosunku do prądu płynącego przy „drożnym” kanale. Wartości napięcia U_{GSOFF} należą do jednego z parametrów podawanych w katalogach i są różne dla różnych typów tranzystorów.

Najważniejsze **parametry graniczne**, których nie należy przekraczać to:

- I_{Dmax} – maksymalny prąd drenu,
- U_{DSmax} – maksymalne napięcie dren-źródło,
- U_{GSmax} – maksymalne napięcie bramka-źródło,
- $P_{Dmax} = (I_D \cdot U_{DS})_{max}$ – maksymalne straty mocy w obwodzie drenu (w kanale).

Tranzystory polowe MOSFET (FET) z izolowaną elektrodą sterującą-bramką, które określa się skrótowo jako **MOSFET** (z ang. Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) lub krócej **MOS**, to elementy coraz powszechniej wykorzystywane i o bardzo szerokim zakresie mocy i napięć dopuszczalnych. Wśród tranzystorów MOSFET można wymienić cztery odmiany konstrukcji, które różnią się technologią wykonania, sposobem sterowania i możliwościami.

Ich wspólną cechą jest elektroda sterująca- bramka **G**, oddzielona od całej struktury cienką warstwą izolacyjną, utworzoną przez tlenek krzemu SiO_2 . Budowę i zasadę działania tranzystora MOSFET wyjaśnimy na przykładzie struktury elementu z kanałem indukowanym typu N, przedstawionym na rys. 4.24. Wewnątrz podłoża krzemowego (kryształ typu *P*) wytworzono podczas procesu technologicznego dwa obszary półprzewodników typu *N*, z których jeden nazwano drenem - (**D**), drugi zaś źródłem - (**S**). Elektroda sterująca **G** (bramka) wraz z warstwą izolującą SiO_2 oraz podłożem **B** (Base) tworzą pewnego rodzaju kondensator. W obwodzie sterującym (wejściowym) pracuje źródło U_{GS} , zaś w obwodzie sterowanym włączono źródło E_{DS} . Gdy napięcie $U_{GS}=0V$ to obszary *N* drenu i źródła są rozdzielone dwoma złączami **p-n**, z których jedno zawsze jest spolaryzowane zaporowo i niezależnie od kierunku napięcia źródła E_{DS} prąd w obwodzie sterowanym $I_D=0$. Dopiero włączenie napięcia $U_{GS} \geq U_{GSon} > 0$ powoduje napływ pod bramkę elektronów - nośników mniejszościowych – z obszaru *P*, które zmieniają charakter półprzewodnika z typu *P* na *N*- rys. 4.25b.



Rys. 4.24. Tranzystor polowy z izolowaną bramką (MOSFET) z kanałem indukowanym typu n:
a) budowa, b) sposób włączania napięcie

Pod bramką powstaje tzw. inwersyjna warstwa półprzewodnika typu *N*, która łączy obszary *N* i umożliwia przepływ prądu drenu I_D . Tworzy się kanał indukowany typu *N* umożliwiający przepływ prądu drenu I_D . Ze wzrostem napięcia U_{GS} wzrastają powierzchnia przekroju kanału i jego przewodność zaś kanał staje się coraz bogatszy w nośniki ładunku i dlatego tranzystory z kanałem indukowanym określa się również jako tranzystory z kanałem wzbogacanym.

Tranzystor tego typu, zwany jest też normalnie wyłączonym, tzn. nieprzewodzącym prądu drenu przy zaniku napięcia U_{GS} .

Na rys. 4.25a pokazano symbol graficzny a na rys. 4.25b uproszczoną (odcinkowo liniową) charakterystykę przejściową tranzystora z rys. 4.24. Podłoże oznaczone strzałką do kanału informuje o typie P półprzewodnika, z którym styka się jego metalowa elektroda B. Z charakterystyki rys. 4.25b można odczytać minimalną wartość napięcia U_{GS} oznaczoną jako U_{GSON} , przy której pojawia się indukowany kanał typu N. Gdy $U_{GS} < U_{GSON}$ tranzystor pozostaje w **stanie odcięcia**; prąd drenu $I_D=0$.

Istnieją też tranzystory **normalnie załączone**, w których wbudowany kanał typu N albo P łączy elektrody D i S. Gdy napięcie sterujące $U_G = 0V$ może przepływać w nich prąd drenu ograniczany napięciem i opornością w obwodzie D-S.

Na rys. 4.26 pokazane są symbole graficzne pozostałych możliwych konstrukcji tranzystorów MOSFET, jakie można spotkać w praktyce.

Tranzystory MOSFET mają największą rezystancję wejściową w porównaniu z innymi odmianami tranzystorów, która sięga $10^{16}\Omega$, dzięki czemu często pracują jako elementy obwodów wejściowych, gdyż praktycznie nie pobierają prądów ze źródła sygnału.

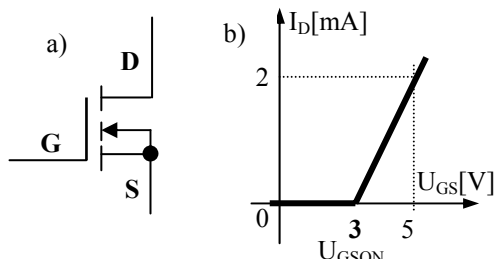
Najważniejsze parametry graniczne tranzystorów MOSFET są identyczne jak podane wyżej dla tranzystorów JFET.

Tranzystory mocy VMOS, VDMOS

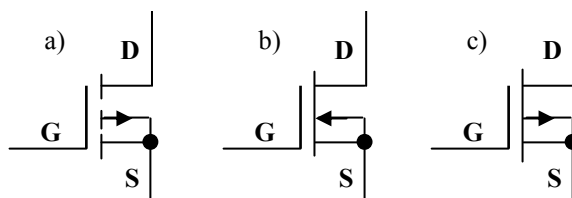
Tranzystory VMOS lub VDMOS to tranzystory MOS projektowane do pracy w obwodach dużej mocy, do przełączania prądów rzędu dziesiątków amperów i przy stosunkowo wysokich napięciach U_{DS} , rzędu kilkuset V. Skróty oznaczeń pochodzą od ukształtowania struktur krzemowych w procesach technologicznych. Struktury VDMOS mają konstrukcje optymalizowane pod kątem zastosowań w dyskretnych (oddzielnych) elementach, aby zapewniały:

- małą rezystancję przejścia R_{DS} (małe straty mocy),
- dużą rezystancję wejściową,
- dużą moc dopuszczalną,
- dużą szybkość przełączenia.

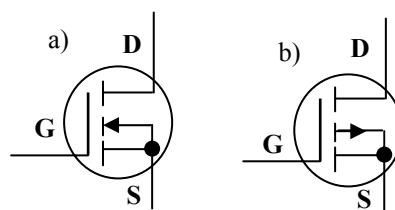
Największą popularność zdobyły tranzystory z kanałem indukowanym (rys. 4.27), których pary z kanałem N i P zwane parami komplementarnymi stosowane są w nowoczesnych stopniach mocy wzmacniaczy akustycznych. W energoelektronice tranzystory z kanałem indukowanym typu N stosowane są jako łączniki bezstykowe w układach falownikowych



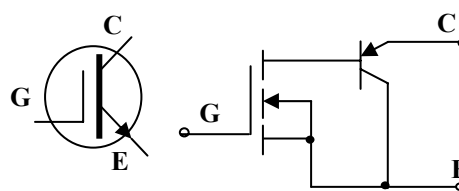
Rys. 4.25. Symbol graficzny (a) i charakterystyka przejściowa tranzystora MOS z kanałem indukowanym (wzbogaconym) typu N



Rys. 4.26. Symbole graficzne tranzystorów MOS:
a) z kanałem indukowanym (wzbogaconym) typu P,
b) z kanałem wbudowanym (zubożonym) typu N,
c) z kanałem wbudowanym (zubożonym) typu P



Rys. 4.27. Symbole graficzne tranzystorów VDMOS :
a) z kanałem indukowanym (wzbogaconym) typu N,
b) z kanałem indukowanym (wzbogaconym) typu P



Rys. 4.28. Symbol graficzny i uproszczony schemat zastępczy tranzystora IGBT

i w zasilaczach impulsowych.

Parametry tranzystorów V-MOS:

P_{TOT} (300÷400W) – maksymalna moc tracona

w tranzystorze U_{DS} (do 1000V) – dopuszczalne napięcie dren – źródło,

$R_{DS(ON)}$ (0,02÷kilku Ω) rezystancja dren – źródło w stanie włączenia, $U_{G(ON)}$ (12V; 2,1÷4V dla standardu TTL) – napięcie sterujące bramka – źródło.

Tranzystory IGBT lub **IGT**-rys.4.28- to grupa energoelektronicznych przyrządów mocy, których budowa jest połączeniem korzystnych właściwości tranzystora polowego - sterowanie napięciowe oraz tranzystora bipolarnego - duży prąd kolektora i mały spadek napięcia U_{CEW} stanie nasycenia. Jest to tranzystor bipolarny z izolowaną bramką (**IGBT** -Insulated Gate Bipolar Transistor, **IGT**- Insulated Gate Transistor).

Stosowane są one w układach dużych mocy, w przekształtnikach energii, takich jak: falowniki, w układach sterowania silnikami z regulacją impulsową, w układach zasilania awaryjnego (w UPS-ach).

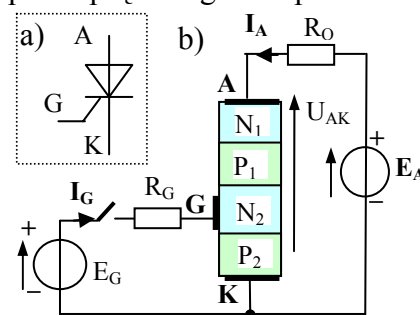
Tyrystor SRC, zwany także diodą sterowaną, jest elementem półprzewodnikowymo strukturze czterowarstwowej (rys. 4.29), trójelektrodowy, w którym obwód sterujący przyłączany do elektrod G-K służy tylko do załączania (wyzwalania) prądu w obwodzie anodowym A-K.

Element ten bez doprowadzenia do bramki sterującego impulsu prądowego nie przewodzi prądu głównego I_A mimo polaryzacji w kierunku przewodzenia. Z punktu widzenia odbiorcy tyrystor jest łącznikiem zamykającym się za pomocą impulsu prądu bramkowego. Bramka jest tu elektrodą inicjującą przepływ prądu anodowego I_A , lecz nie ma ona wpływu na wartość tego prądu.

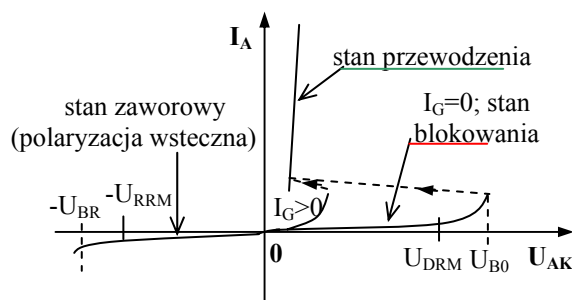
Na rys. 4.30 pokazane są uproszczone charakterystyki prądowo-napięciowe $I_A=f(U_{AK})$ tyrystora SCR. Na charakterystykach zaznaczono trzy charakterystyczne stany jego pracy. Gdy napięcie $U_{AK} < 0$ tyrystor jest spolaryzowany wstecznie i jego charakterystyki są identyczne jak konwencjonalnej diody krzemowej. Po spolaryzowaniu anody napięciem dodatnim względem katody tyrystor zostaje spolaryzowany w kierunku przewodzenia ale pozostaje on w stanie blokowania (nieprzewodzenia), gdy napięcie U_{AK} nie przekroczy wartości napięcia przełączenia U_{B0} .

Z chwilą, gdy napięcie U_{AK} osiągnie wartość U_{B0} tyrystor przechodzi w stan przewodzenia, nawet bez udziału prądu bramki. Na przewodzącym tyrystorze napięcie U_{AK} spada do około 1V –jak na diodzie, zaś prąd anodowy zależy tylko od napięcia źródła E_A i rezystancji zewnętrznej R_0 .

Załączanie tyrystora przy napięciu U_{B0} bez udziału prądu bramki nie powinno mieć miejsca w poprawnie działających układach. Wprowadzanie tyrystorów w stan przewodzenia musi odbywać się z udziałem prądu bramki; wtedy można wybierać chwile, w których wprowadzamy tyrystor w stan przewodzenia. Na wartość napięcia U_{AK} , przy którym tyrystor wchodzi w stan przewodzenia w znacznym stopniu wpływa wartość prądu bramki I_G . Większym



Rys. 4.29. a) symbol tyrystora SCR, b) uproszczona budowa i polaryzacja elektrod



Rys. 4.30. Charakterystyki anodowe tyrystora SCR

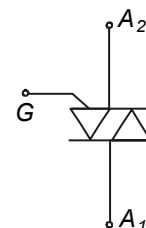
prądom bramki odpowiadają mniejsze napięcia przełączenia U_{AK} . Inne, możliwe sposoby i przyczyny załączania (wyzwalania) tyrystora to:

- 1) załączanie (wyzwalanie) energią świetlną doprowadzoną do złącza **p-n** (fototyrystory),
- 2) załączanie po przekroczeniu pewnej szybkości narastania napięcia U_{AK} ,
- 3) załączanie pod wpływem przekroczenia granicznej temperatury struktury.

Wyłączanie tyrystora SCR

W obwodach prądu przemiennego, wyłączenie prądu anodowego odbywa się w sposób naturalny po zmianie polaryzacji napięcia anodowego z dodatniej na ujemną. W przypadku pracy tyrystora w obwodach prądu stałego konieczne są specjalne elementy lub obwody do wyłączania prądu anodowego.

Tyrystory symetryczne (triaki) – są to elementy sterowane, trójelektrodowe, które mogą przewodzić prąd w obydwu kierunkach. Symbol graficzny triaka pokazany jest na rys. 4.31. Jego elektrody to: A_1, A_2 – anody, G – bramka.



Rys. 4.31. Symbol graficzny triaka

Załączanie triaka w czasie trwania dodatniego napięcia między anodami U_{A1A2} odbywa się dodatnimi impulsami prądu bramki I_G (wpływającymi do bramki), zaś w czasie trwania ujemnego napięcia U_{A1A2} – ujemnymi impulsami I_G (wypływającymi z bramki). Stosowane są w regulatorach natężenia oświetlenia oraz łącznikach i regulatorach mocy prądu przemiennego.

Elementy optoelektroniczne to takie, w których działanie związane jest z oddziaływaniem promieniowania świetlnego na ich właściwości elektryczne lub przetwarzają energię elektryczną na światło.

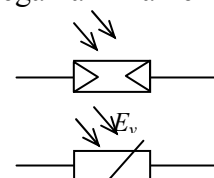
Ogólnie dzieli się je na:

- **fotodetektory (odbiorniki, czujniki promieniowania)** – ich działanie polega na zmianie ich właściwości elektrycznych pod wpływem promieniowania świetlnego,
- **fotoemitery (źródła promieniowania)** – zachodzi w nich przetwarzanie energii elektrycznej w energię promieniowania świetlnego.

Fotodetektory

Informacje o fotodetektorach nie obejmują tu zagadnień odnoszących się do właściwości widma promieniowania świetlnego i jego wpływu na zachowanie się poszczególnych elementów.

Fotorezystory to elementy półprzewodnikowe, których rezystancja maleje ze wzrostem natężenia oświetlenia. Symbole graficzne fotorezystorów przedstawiono na rys. 4.32. Robocza część fotorezystora to cienka warstwa materiału półprzewodnikowego, naniesiona na podłoże izolacyjne



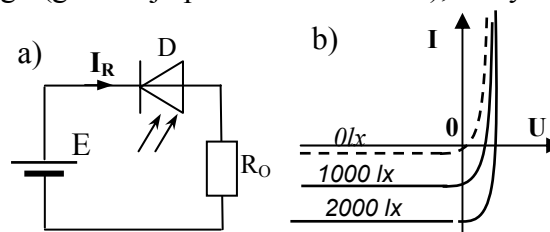
Rys. 4.32. Symbole fotorezystorów

z wyprowadzeniami i zakryta przezroczystą osłoną szklaną lub z tworzywa sztucznego. Zmiany rezystancji powodowane są występowaniem zjawiska fotoelektrycznego wewnętrznego, które polega na uwalnianiu wewnątrz materiału swobodnych nośników ładunku elektrycznego (generacja par elektron-dziura), których obecność zwiększa konduktancję (zmniejsza rezystancję) materiału.

Fotodiody to diody półprzewodnikowe, w których wykorzystuje się wzrost prądu wstecznego pod wpływem oświetlania struktury złącza **p-n** przez przezroczystą dla światła obudowę. Symbol graficzny fotodiody przedstawiono na rys. 4.33. Sposób polaryzacji fotodiody pokazany jest na



Rys. 4.33. Symbol fotodiody



Rys. 4.34. a) układ polaryzacji fotodiody, b) charakterystyki $I(U)$ fotodiody i fotoogniwa

rys. 4.34a zaś charakterystyki $I(U)$ dla trzech poziomów oświetlenia przedstawia na rys. 4.34b. Charakterystyki fotodiody spolaryzowanej wstecznie zawarte są w III ćwiartce układu. Linia przerywaną narysowano charakterystykę diody nieoświetlonej. Płynie przez nią tylko niewielki prąd wsteczny, zwany prądem ciemnym (bo dioda w ciemności). Wartość prądu fotoelektrycznego zależy tylko od natężenia oświetlenia, nie zależy od przyłożonego napięcia.

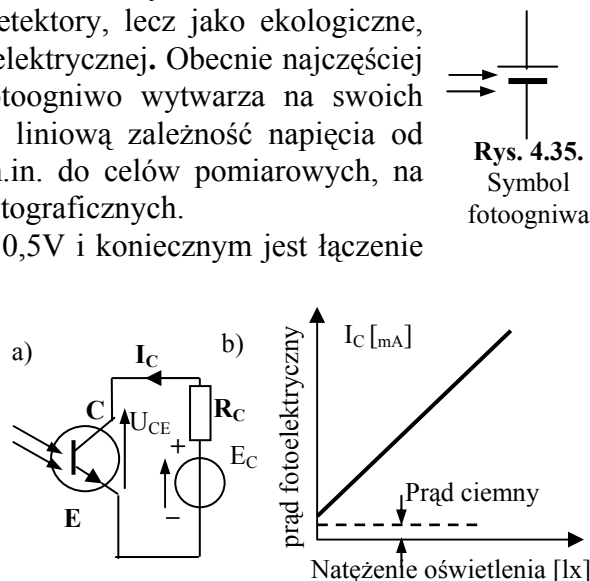
Fotodioda bez doprowadzonego napięcia zewnętrznego w wyniku oświetlenia potrafi wytworzyć różnicę potencjałów na swoich zaciskach stając się **fotoogniwem**. W IV ćwiartce układu współrzędnych $I(U)$ – rys. 4.34b zamieszczone są charakterystyki złącza pracującego jako fotoogniwo. Punkty przecięcia charakterystyk z dodatnią osią napięcia to wartości SEM fotoogniwa, zaś punkty przecięcia z ujemną osią prądu oznaczają wartości ich prądu zwarcia.

Fotoogniwa, których symbol graficzny przedstawia rys. 4.35, należą do coraz szerzej stosowanych podzespołów nie tylko jako fotodetektory, lecz jako ekologiczne, niezastąpione w wielu sytuacjach źródła energii elektrycznej. Obecnie najczęściej wykonuje się je z krzemu. Po oświetleniu fotoogniwo wytwarza na swoich zaciskach napięcie elektryczne. Ze względu na liniową zależność napięcia od natężenia oświetlenia, fotoogniwa stosuje się m.in. do celów pomiarowych, na przykład w obwodach światłomierzy aparatów fotograficznych.

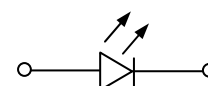
Wartość SEM pojedynczego ogniwa wynosi ok. 0,5V i koniecznym jest łączenie ich w baterie.

Fototranzystor (rys. 4.36a) przy nieoświetlonej bazie płynie w nim nieznaczny prąd kolektora, zwany prądem ciemnym. Po oświetleniu struktury krzemowej fototranzystora obserwuje się wzrost prądu kolektora I_C proporcjonalny do natężenia światła, co ilustruje rys. 4.36b.

Fototranzystory charakteryzują się znacznie większą czułością na zmiany natężenia oświetlenia w porównaniu z fotodiodami, gdyż ich prąd fotoelektryczny jest wzmacniany w wyniku procesów zachodzących w strukturze fototranzystora.



Rys. 4.36. Fototranzystor: a) symbol i układ polaryzacji, b) zależność prądu kolektora od natężenia światła

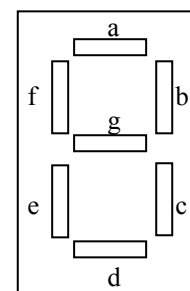


Rys. 4.37. Symbol graficzny diody LED

Fotoemitery

Dioda elektroluminescencyjna (LED) – rys. 4.37 - to element, który w wyniku przepływu prądu w kierunku przewodzenia emituje światło (promieniowanie elektromagnetyczne). Dioda LED opisana została przy omawianiu diod. Diody te powszechnie wykorzystywane są jako wskaźniki stanu pracy urządzeń. Napięcie przewodzenia diody LED jest dosyć duże (w stosunku do innych diod półprzewodnikowych) i może ono wynosić od 1,5 V do 2,5 V, zależnie od typu. Dla użytkowników diod LED przydatną jest umiejętność doboru rezystorów ustalających prąd w obwodzie diody dla jej poprawnej eksploatacji. Ilustruje to przykład w ćwiczeniach.

Wskaźniki LED są to podzespoły służące do wyświetlenia cyfr, liter lub innych znaków. Najprostsze i najczęściej spotykane są wskaźniki siedmiosegmentowe (rys. 4.38). Jak sama nazwa wskazuje składają się one z siedmiu segmentów (każdy segment może zawierać jedną lub kilka diod LED). Dla zmniejszenia liczby wyprowadzeń łączy się razem anody albo katody diod wszystkich segmentów. Zależnie od tego, które z elektrod diod LED są razem połączone mamy wskaźniki ze wspólną anodą –WA lub ze wspólną katodą –WK. Poszczególne cyfry od 0 do 9



Rys. 4.38. Oznaczanie segmentów wskaźnika siedmiosegmentowego

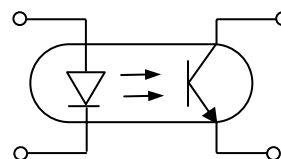
wyświetla się dzięki zasileniu konkretnych segmentów przy użyciu specjalnych układów scalonych, zwanych dekoderni (np. układ UCY 7447).

Do wyświetlania znaków alfabetu lub innych stosujemy bardziej złożone wskaźniki alfanumeryczne.

Transoptory są to podzespoły optoelektroniczne zawierające diodę LED (fotoemiter) i fotodetektor, najczęściej fototranzystor - rys. 4.39.

Po doprowadzeniu prądu do diody LED emituje ona promieniowanie światłne, którego natężenie jest proporcjonalne do płynącego przez nią prądu. Promienie, najczęściej podczerwone przez przezroczysty ośrodek padają na spolaryzowany napięciem zewnętrznym fototranzystor. Jego prąd kolektora jest wówczas proporcjonalny do prądu płynącego przez diodę.

Transoptory to ważne podzespoły w wielu układach sterowania, gdzie służą do galwanicznego oddzielenia dwóch obwodów elektrycznych, sprzęgając je ze sobą za pomocą światła. W zależności od typu mogą one wytrzymywać napięcie probiercze (próby) pomiędzy wejściem (dioda LED) i wyjściem (fototranzystor), rzędu kilku kilowoltów, a przy specjalnym wykonaniu, nawet do 100 kV. Produkowane są transoptory scalone, szczelinowe, refleksyjne (odbiciowe).



Rys. 4.39. Symbol graficzny transoptora

4.2.2. Pytania sprawdzające

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

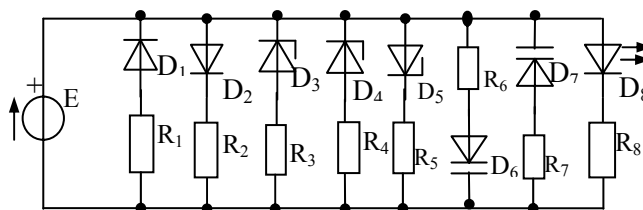
1. Jak zbudowana jest dioda półprzewodnikowa i jak przebiega jej charakterystyka $I(U)$?
2. Jakie jest przeznaczenie i jakie parametry opisują właściwości diod prostowniczych?
3. Jaki jest symbol, przeznaczenie i charakterystyka $I(U)$ diod Zenera?
4. Co to są i do czego służą diody pojemnościowe (warikapki)?
5. Jakie są właściwości i przeznaczenie diod LED?
6. Jaka jest budowa tranzystorów bipolarnych NPN i PNP?
7. Jakie są możliwe układy pracy tranzystora bipolarnego?
8. Jak należy polaryzować tranzystor bipolarny dla sterowania i wzmacniania prądu?
9. Na czym polega zasada działania tranzystora bipolarnego?
10. Narysuj i omów charakterystyki statyczne tranzystora bipolarnego.
11. Jak definiuje się współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora bipolarnego?
12. Jaki jest wpływ temperatury na pracę tranzystora?
13. Co to jest tranzystor polowy i tranzystor polowy złączowy JFET?
14. Jaka jest zasada działania i charakterystyki statyczne tranzystora JFET z kanałem typu N?
15. Co to jest tranzystor polowy MOSFET?
16. Jaka jest budowa i zasada pracy tranzystora MOSFET z kanałem indukowanym typu N?
17. Jak przebiega charakterystyka przejściowa tranzystora MOSFET z kanałem indukowanym typu N? Jakie właściwości elementu można z niej odczytać?
18. Co oznacza określenie „tranzystory VMOS i VDMOS” i gdzie są one stosowane?
19. Co to są i gdzie wykorzystywane są tranzystory IGBT?
20. Co to są tyrystory SCR i dlaczego nazywa się je sterowanymi diodami półprzewodnikowymi?
21. Co to są tyrystory symetryczne (triaki)?
22. Jakie elementy nazywamy optoelektronicznymi?
23. Jakie są symbole graficzne i właściwości fotorezystora, fotodiody, fotoogniwa, fototranzystora?
24. Jak jest zbudowany i jak działa transoptor?
25. Co to są wskaźniki LED?

4.2.3. Ćwiczenia

Ćwiczenia rachunkowe 1÷3 wykonuj zgodnie z poleceniami w treści zadania, korzystaj z informacji zamieszczonych w poradniku dla ucznia, w treści zadania i z pomocy nauczyciela.

Ćwiczenie 1

Określ rodzaje diod, kierunki polaryzacji i stany pracy diod w obwodzie, którego schemat przedstawiony jest na rys. 4.40. Przyjmując jako odcinkowo liniowe charakterystyki diod, oblicz przybliżone wartości prądów



Rys. 4.40. Schemat układu ćwiczeniowego z diodami

przeływających przez diody i moce wydzielane w diodach. Dane: $E=15V$, $U_F(D1÷D7)=0,7V$, $U_F(D8)=2,5V$, $U_Z(D3,D5)=7,5V$, $U_Z(D4)=18V$, $R=1k\Omega$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinienś:

- 1) rozpoznać symbole diod oraz kierunki ich polaryzacji,
- 2) każdą gałąź z rezystorem i diodą traktować jako oddzielny obwód zasilany ze źródła E,
- 3) przyjąć i narysować aproksymowane liniowo charakterystyki diod,
- 4) zapisać równania II prawa Kirchhoffa dla wyznaczenia prądów diod w gałęziach obwodów nierozgałęzionych zgodnie ze wskazówką w p.2,
- 5) przekształcać równania dla wyznaczenia prądów, obliczać wartości prądów i mocy.

Wyposażenie stanowiska pracy:

– literatura.

Ćwiczenie 2

Przeanalizuj charakterystyki wyjściowe tranzystora bipolarnego pokazane na rys. 4.41. Z ich przebiegu określ wartości: wielkosygnałowego i małosygnałowego współczynnika wzmocnienia prądowego oraz dopuszczalne wartości napięcia U_{CE} , prądu I_C , mocy P_{CMAX} tranzystora.

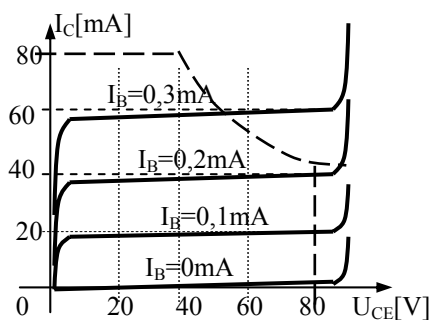
Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinienś:

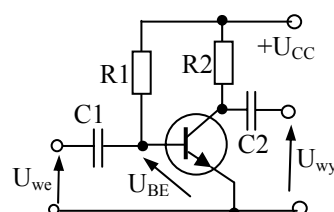
- 1) odczytać z charakterystyk wartości prądów kolektora i bazy,
- 2) skorzystać z wzorów definiujących współczynniki wzmocnienia prądowego, tranzystora bipolarnego,
- 3) wykorzystać podane w poradniku parametry graniczne tranzystora, odczytać ich wartości.

Wyposażenie stanowiska pracy:

– literatura.



Rys. 4.41. Rodzina charakterystyk wyjściowych tranzystora bipolarnego



Ćwiczenie 3

Przeanalizuj rozływ prądów polaryzacji wstępnej w układzie wzmacniacza przedstawionym na rys. 4.42. Wyznacz przybliżone wartości prądów bazy, kolektora oraz napięcia kolektor emiter tranzystora wiedząc, że $R_1=150k\Omega$, $R_2=1k\Omega$, $E_C=15V$, $h_{21E}=100$. Oblicz wartości mocy pobieranej ze źródła oraz traconej w tranzystorze. W jakim stanie pracuje tranzystor?

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinienś:

- 1) narysować schemat wzmacniacza z symbolem włączonego źródła zasilania oraz na schemacie zaznaczyć drogi przepływu prądów polaryzacji wstępnej bazy i kolektora, zaznaczyć oczka obwodów, w których płyną te prądy,
- 2) założyć odcinkowo liniową charakterystykę wejściową tranzystora (patrz rys. 4.17),
- 3) wykonać obliczenie prądu bazy korzystając z prawa Ohma i z II prawa Kirchhoffa,
- 4) z definicji współczynnika h_{21E} obliczyć prąd kolektora, z II prawa Kirchhoffa obliczyć napięcie U_{CE} , z wzoru na moc prądu stałego obliczyć moce tracone w tranzystorze i pobraną ze źródła zasilania.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

– literatura.

Ćwiczenie 4

Dobierz oporniki ustalające wartości prądów diod LED sygnalizujących obecność napięć $E_1=12V$, $E_2=5V$.

Sposób wykonania ćwiczenia:

Aby wykonać ćwiczenie powinienś:

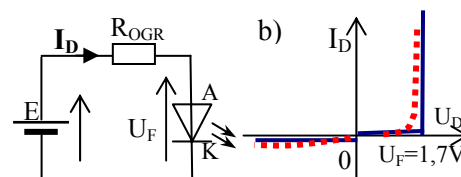
- 1) obliczyć rezystancje opornika ustalających prądy diod LED, które mają pełnić rolę wskaźników załączenia źródeł napięcia. Schemat układu z jedną diodą pokazany jest na rys. 4.43. Rozwiązanie przedstawimy dla napięcia E_1 ,
- 2) odczytać z danych katalogowych diod I_{Dmax} : na przykład $I_{Dmax} = 30 \text{ mA}$ (max prąd diody), spadek napięcia na diodzie $U_F = 1,7V$. Dla większej niezawodności i żywotności diody należy założyć prąd płynący przez diodę mniejszy od dopuszczalnego: $I_D = 20 \text{ mA} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ A}$,
- 3) zapisać zgodnie z II prawem Kirchhoffa: $E = I_D \cdot R_{ogr} + U_F$,
- 4) przekształcić równanie z p. 3 i obliczyć: $R_{ogr} = (E - U_F) / I_D = 515\Omega$,
- 5) wykonać obliczenia rezystancji opornika dla źródła $E_2 = 5V$,
- 6) połączyć układ, włączyć napięcie i zmierzyć wartości napięcia i prądu diody,
- 7) porównać wartości: założoną do obliczeń i uzyskaną z pomiarów.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

– multimetry cyfrowe lub analogowe, diody LED, zasilacz regulowany napięcia stałego, rezystory nastawne, np. dekadowe $0 \div 10k\Omega$.

Ćwiczenie 5

Zbadaj właściwości złączy i charakterystyki statyczne tranzystora bipolarnego.



Rys. 4.43. a) układ polaryzacji diody LED, b) charakterystyki $I(U)$, rzeczywista i aproksymowana liniowo

Sposób wykonania ćwiczenia

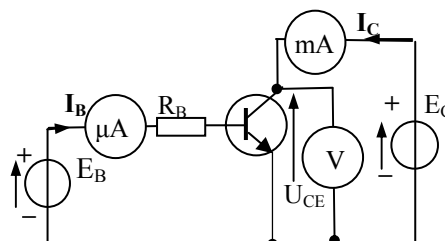
Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zanotować typ badanego tranzystora,
- 2) odczytać z katalogu i zanotować pełne nazwy i wartości jego podstawowych parametrów elektrycznych, aby nie przekraczać ich podczas badań,
- 3) naszkicować widok obudowy tranzystora i oznaczyć jego elektrody na wyprowadzeniach,
- 4) zbadać oporność przejść między parami elektrod tranzystora NPN omomierzem analogowym,
- 5) zbadać multimetrem cyfrowym z funkcją **test diod** spadki napięcia pomiędzy elektrodami badanych tranzystorów NPN, zanotować wyniki w tabeli.

Wynik badania złącza cyfrowym testerem diod oznacza spadek napięcia na złączu w [mV].

Badanie omomierzem analogowym								Badanie cyfrowym testerem diod							
Tranzystor sprawny				Tranzystor uszkodzony				Tranzystor sprawny				Tranzystor uszkodzony			
R(BE)		R(EB)		R(BE)		R(EB)		U_{BE}		U_{EB}		U_{BE}		U_{EB}	
R(BC)		R(EB)		R(BC)		R(EB)		U_{BC}		U_{CB}		U_{BC}		U_{CB}	
R(CE)		R(EB)		R(CE)		R(EB)		U_{CE}		U_{EC}		U_{CE}		U_{EC}	

- 6) narysować na podstawie badań tranzystora sprawnego schemat diodowy reprezentujący układ złącz P-N pomiędzy wyprowadzeniami tranzystorów NPN i PNP,
- 7) wyznaczyć przebieg charakterystyk wyjściowych $I_C = f(U_{CE})$ tranzystora dla 2 wartości prądu bazy, w układzie przedstawionym na rys. 4.44 oraz określić wartości wielkosygnałowego współczynnika wzmocnienia prądowego h_{21E} ; wyniki pomiarów wpisać do zaprojektowanej tabeli, wartość prądu bazy zmieniać poprzez zmianę R_B lub napięcia E_B ; powinieneś też wykreślić charakterystyki $I_C = f(U_{CE})$,
- 8) wyznaczyć wartości współczynnika wzmocnienia prądowego h_{21E} ,
- 9) narysować i skonsultować z nauczycielem schemat układu do badania charakterystyk i pomiaru współczynnika h_{21E} tranzystora PNP.



Rys. 4.44. Układ do badania tranzystora bipolarnego NPN

Wyposażenie stanowiska pracy:

- karty katalogowe elementów półprzewodnikowych,
- diody, tranzystory, inne elementy półprzewodnikowe,
- oporniki nastawne lub dekadowe $0 \div 100k\Omega$,
- dwa zasilacze regulowane napięcia stałego,
- mikroamperomierz, miliamperomierze, woltomierz napięcia stałego.

4.2.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

- 1) opisać budowę diody półprzewodnikowej i przebieg jej charakterystyki?
- 2) określić przeznaczenie i parametry opisujące diod prostowniczych?
- 3) określić symbol, przeznaczenie i charakterystyki I(U) diod Zenera?
- 4) określić do czego służą diody warikapowe?
- 5) określić właściwości i przeznaczenie diod LED?
- 6) określić możliwe układy pracy tranzystora bipolarnego?
- 7) spolaryzować tranzystor bipolarny dla wzmacniania prądu?
- 8) wyjaśnić zasady pracy i działanie tranzystora bipolarnego?
- 9) narysować i wyjaśnić charakterystyki statyczne tranzystora bipolarnego?
- 10) zmierzyć współczynnik h_{21E} tranzystora bipolarnego w układzie WE?
- 11) wyjaśnić pojęcia: tranzystor polowy, tranzystor polowy złączowy FET?
- 12) opisać budowę i zasadę pracy tranzystora MOSFET z kanałem typu N?
- 13) narysować charakterystykę przejściową tranzystora MOSFET?
- 14) wyjaśnić pojęcia „tranzystory VMOS i VDMOS”?
- 15) wyjaśnić pojęcie tranzystory IGBT?
- 16) wyjaśnić pojęcia: tyrystory SRC i tyrystory symetryczne?
- 17) Wyjaśnić, jakie elementy nazywamy optoelektronicznymi?
- 18) opisać właściwości i rozróżnić symbole graficzne fotodetektorów?
- 19) opisać budowę, działanie i zastosowanie transoptora?

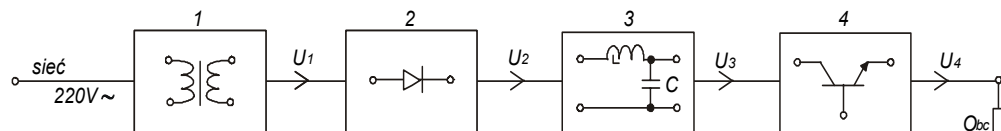
Tak Nie

☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐

4.3. Prostowniki i stabilizatory

4.3.1. Materiał nauczania

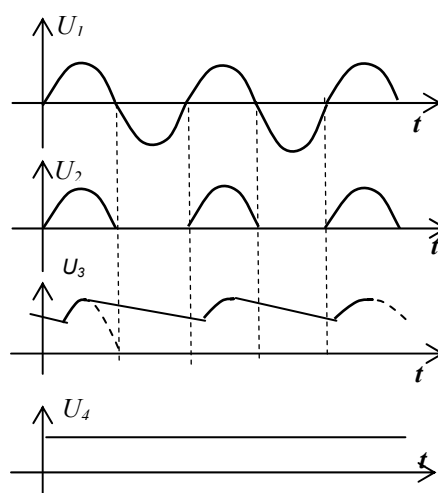
Większość urządzeń i układów elektronicznych wymaga zasilania napięciem stałym i w większości przypadków energię prądu stałego dostarczają zasilacze wykorzystujące energię sieci prądu przemiennego.



Rys. 4.45. Schemat blokowy zasilacza sieciowego: 1 – transformator, 2 – prostownik, 3 – filtr, 4 – stabilizator

Liczba rozwiązań układowych zasilaczy jest w zasadzie nieograniczona, lecz prawie we wszystkich okładach występują podobne etapy przetwarzania energii. Typowe bloki, jakie mogą wchodzić w skład zasilacza przedstawia rys. 4.45 a rys. 4.46 stanowi ilustrację kolejnych etapów przetwarzania napięcia w układzie zasilacza. Niżej wymieniono bloki zasilacza i ich funkcje.

1. Transformator – obniża lub (rzadziej podwyższa) napięcie sieciowe – przebieg U_1 rys. 4.46.
2. Prostownik – zamienia napięcie przemiennie na jednokierunkowy – przebieg U_2 rys. 4.46.
3. Filtr prostowniczy – wygładza (zmniejsza tętnienia) napięcie wyprostowane (wyjściowe) – U_3 .
4. Stabilizator napięcia – układ elektroniczny, którego zadaniem jest utrzymywanie stałej wartości napięcia na obciążeniu mimo wahań napięcia w sieci zasilającej oraz przy zmianach wartości prądu obciążenia zasilacza – przebieg U_4 rys. 4.46. Nie wszystkie zasilacze posiadają wbudowany stabilizator; wtedy są to zasilacze niestabilizowane. Zasilacze stabilizowane charakteryzują się lepszymi parametrami użytkowymi.



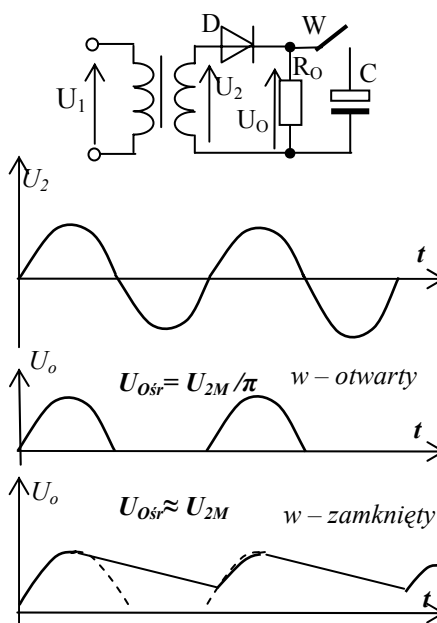
Rys. 4.46. Przykładowe przebiegi napięć w układzie zasilacza

Prostowniki jednofazowe to układy, których zadaniem jest zamiana jednofazowego napięcia przemiennego na jednokierunkowe zwane też napięciem stałym.

1. Prostownik jednopołówkowy (półfalowy)

Najprostszy układ prostownika jednofazowego, zwanego jednopołówkowym lub półfalowym, przedstawiono na rys. 4.47. Dzięki właściwościom diody prostowniczej prąd w obwodzie wtórnym transformatora płynie tylko w jednym kierunku. Na wyjściu układu prostownika uzyskujemy napięcie (U_o - W-otwarty) z dodatnich półfal napięcia wejściowego U_2 . Wartość średnia napięcia wyprostowanego półfalowo wynosi: $U_{Osr} = U_{2M} / \pi$.

Oznacza to, że stałe napięcie wyprostowane półfalowo ma wartość około 1/3 amplitudy napięcia prostowanego.



Rys. 4.47. Prostownik półfalowy; schemat i przebiegi czasowe napięć w układzie

Przebieg napięcia wyprostowanego U_O możemy modyfikować i bardziej upodobnić do napięcia stałego po włączeniu kondensatora o odpowiedniej pojemności C (W-zamknięty). Przebieg napięcia wyjściowego ulega wygładzeniu, tzn. napięcie wyjściowe U_O jest bardziej zbliżone do napięcia stałego. Kondensator, gromadzi tu energię podczas dodatnich połówek napięcia U_2 , a oddaje ją podczas ujemnych. Wprowadzony kondensator o właściwie dobranej pojemności poprawia parametry napięcia wyprostowanego gdyż:

- zwiększa się wartość średnia napięcia wyprostowanego do wartości bliskiej wartości maksymalnej napięcia zasilającego U_2 : $U_{Osr} \approx U_{2M}$,

- zmniejsza się amplituda tętnień (zmian wartości chwilowej) napięcia wyprostowanego.

Układ półfalowy bez kondensatora i z kondensatorem wygładzającym napięcie wyprostowane, mimo prostoty jest rzadko stosowany ze względu na swoje wady:

- nieuniknione tętnienia napięcia wyprostowanego o częstotliwość pulsacji wynoszącej 50 Hz,
- moc pozorna zastosowanego transformatora musi być trzy razy większa od mocy użytecznej,
- rdzeń transformatora jest podmagnesowywany przez przepływ prądu stałego w uzwojeniu wtórnym.

2. Prostownik pełnofalowy (całofalowy, dwupółfalkowy)

Od prostownika półfalowego różni się on tym, że wykorzystuje pełną falę napięcia zasilającego podczas prostowania. W układach jednofazowych najczęściej stosowanym jest układ mostkowy (Graetza), którego schemat pokazany jest na rys. 4.48.

Jego zasada działania jest następująca. W czasie każdej połowy okresu napięcia wejściowego U_2 na przemian prąd przewodzi jednocześnie para diod: D_2, D_4 dla półfali dodatniej oraz D_1, D_3 dla półfali ujemnej. W wyniku tego wartość średnia napięcia wyprostowanego jest tu dwa razy większa niż w układzie półfalowym:

$$U_{Osr} = 2U_{2M}/\pi.$$

Po włączeniu kondensatora filtrującego C o odpowiedniej pojemności uzyskamy napięcie o wartości zbliżonej do wartości maksymalnej napięcia prostowanego U_2 (przebieg, gdy W – zamknięty):

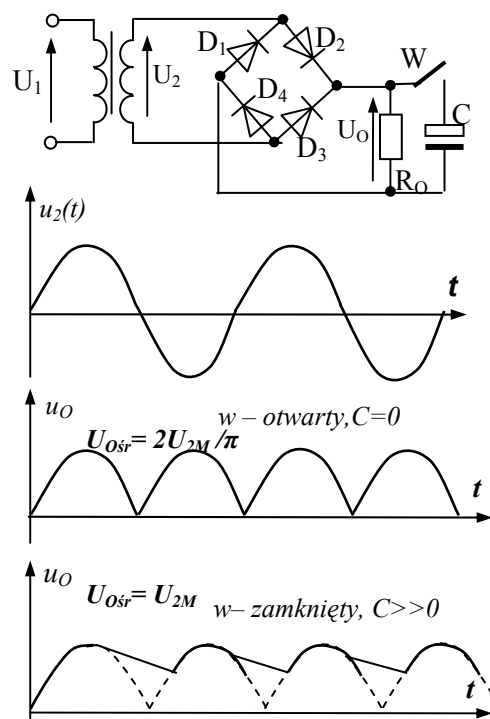
$$U_{Osr} \approx U_{2M}$$

Jest to prostownik o największej sprawności i obecnie najczęściej stosowany w jednofazowych układach zasilających. Wadą wspólną dla wszystkich prostowników z kondensatorem wygładzającym napięcie, są impulsy prądu doładowania kondensatora, o krótkim czasie trwania i dużej wartości maksymalnej. Impulsy te stanowią potencjalne źródło zakłóceń elektromagnetycznych dla zasilanej elektroniki.

Oprócz opisanych tu układów, obecnie rzadziej stosowany bywa prostownik pełnookresowy z wyprowadzonym środkiem uzwojenia wtórnego transformatora [1], [2].

Prostowniki trójfazowe [1] to układy stosowane do zasilania odbiorników o zwiększonym poborze mocy. Wykorzystują one energię z trzech faz napięcia zasilającego co zapobiega nadmiernej asymetrii obciążania sieci trójfazowej.

Prostowniki sterowane [1] to układy, w których dzięki zastosowaniu tyrystorów z układami sterującymi ich pracą, możliwa jest płynna regulacja wartości napięcia i prądu wyprostowanego. Możliwość regulacji wartości napięcia wyjściowego pozwala na włączanie ich



Rys. 4.48. Prostownik pełnofalowy w układzie mostka Graetza: schemat i przebiegi czasowe napięć w układzie

w układy regulacji automatycznej dla sterowania parametrami zasilania różnych obiektów. Stosowane są do zasilania silników prądu stałego, jako bloki zasilania dla przekształtników energoelektronicznych itp.

Filtry tętnień napięcia wyprostowanego to układy (czasem pojedyncze podzespoły, jak kondensator wygładzający) stosowane w celu zmniejszenia amplitudy tętnień napięcia na wyjściu prostownika. Budowane są z elementów R , L , C , które powinny przepuszczać składowe stałe prądu i napięcia przy jednoczesnym blokowaniu tętnień (składowych zmiennych) [1]. Skuteczność działania filtrów LC wzrasta przy zwiększeniu pojemności kondensatorów i indukcyjności dławików.

Stabilizatory elektroniczne to układy służące do utrzymywania teoretycznie stałej wartości napięcia lub prądu wyjściowego przy zmianach napięcia zasilającego bądź prądu obciążenia. Ze względu na rodzaj wielkości, której wartość stabilizują można podzielić je na:

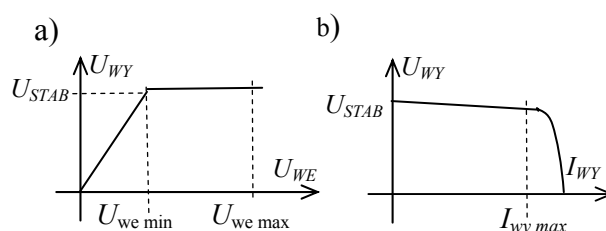
- stabilizatory napięcia,
- stabilizatory prądu,

Stabilizatory napięcia to układy o strukturze czwórnikowej, bo posiadają dwa zaciski wejściowe i dwa wyjściowe. Należą do najbardziej rozpowszechnionych układów gdyż większość układów elektronicznych wymaga zasilania napięciem o stałej wartości. Wśród rozwiązań układowych stabilizatorów napięcia można spotkać ogromną liczbę układów, o różnej zasadzie działania i technologii wykonania. Tymi szczegółami nie będziemy się tu zajmować. Z punktu widzenia zastosowań układów elektronicznych w urządzeniach mechatronicznych, warto znać podstawowe właściwości, jakie powinien posiadać sprawny stabilizator napięcia stałego. Stabilizator napięcia ma cechy zbliżone do idealnego źródła napięcia. Na rysunku 4.49 pokazane są dwie ważne charakterystyki, z których przebiegu można wnioskować o jakości i możliwościach stabilizatora napięcia. Rysunek 4.49a to charakterystyka przejściowa, z której możemy odczytać:

- ♦ wartość napięcia stabilizowanego (U_{STAB}) na wyjściu układu,
- ♦ zakres możliwych zmian napięcia wejściowego ($U_{we min}$, $U_{we max}$), przy których stabilizator pracuje poprawnie.

Rys. 4.49b to charakterystyka obciążenia (wyjściowa), z której możemy odczytać, w jakim zakresie zmian prądu obciążenia możemy wykorzystać stabilizator. Jeśli wytwórca układu nie załącza charakterystyk, to zwykle podawane są wartości napięć i prądów, oznaczone na podanych tu charakterystykach. Ważnymi parametrami stabilizatorów napięcia podawanymi w kartach katalogowych są:

- współczynnik stabilizacji napięcia: $S_U = \Delta U_{WY} / \Delta U_{WE}$ przy $I_{WY} = const.$, powinien być jak najmniejszy a jego wartość można określić z charakterystyki na rys. 4.49a,
- oporność wyjściowa stabilizatora (odpowiednik rezystancji wewnętrznej źródła napięcia): $R_{WY} = \Delta U_{WY} / \Delta I_{WY}$ przy $U_{WE} = const.$; powinna być jak najmniejsza; jej wartość, podobnie jak inne parametry można określić z dokładnie narysowanych charakterystyk rys. 4.49.
- rodzaje zabezpieczeń układu przed uszkodzeniem stabilizatora i układów zasilanych; więcej szczegółów o układach stabilizacji napięcia można znaleźć w literaturze, np. [1], [2].



Rys. 4.49. Przykładowe charakterystyki stabilizatorów napięcia:

- a) charakterystyka przejściowa,
- b) charakterystyka obciążenia (wyjściowa)

4.3.2. Pytania sprawdzające

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

1. Co to są prostowniki napięcia i gdzie są stosowane?
2. Jaki jest schemat i działanie prostownika półfalowego z obciążeniem rezystancyjnym?
3. Jaki jest schemat i działanie prostownika półfalowego z obciążeniem RC?
4. Jaki jest schemat i działanie prostownika pełnofalowego z obciążeniem rezystancyjnym?
5. Co to są i do czego służą stabilizatory napięcia stałego?
6. Jakie parametry i charakterystyki opisują właściwości stabilizatora napięcia?

4.3.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Określ przewidywane wartości maksymalną i średnią, napięcia na obciążeniu prostownika półfalowego zasilanego z sieci $U=230V$ przez transformator o liczbie zwojów $Z_1=1200$, $Z_2=120$, dla dwóch przypadków obciążenia: a) prostownik z obciążeniem $R=10\Omega$, b) prostownik z obciążeniem RC i z prawie doskonałą filtracją napięcia wyprostowanego.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinien:

- 1) narysować schematy prostowników, przebiegi czasowe napięcia wtórnego oraz napięcia wyprostowanego dla przypadku a oraz b,
- 2) obliczyć przekładnię zwojową i napięciową transformatora $U_1/U_2 = Z_1/Z_2 = \dots$, $U_1=U=230V$,
- 3) korzystając z przekładni obliczać wartość skuteczną napięcia wtórnego, następnie jego wartość maksymalną $U_{2m} \approx 1,4U_2 = \dots$,
- 4) skorzystać z wzorów zamieszczonych w Poradniku dla ucznia i obliczyć średnie napięcia wyprostowane.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

– literatura.

Ćwiczenie 2

Określ wartości maksymalną i średnią prądu obciążenia prostownika pełnofalowego w układzie Graetza, zasilanego z sieci jednofazowej $U=230V$ przez transformator o liczbie zwojów $Z_1=2300$, $Z_2=460$, dla dwóch przypadków obciążenia: a) prostownik z obciążeniem $R=20\Omega$, b) prostownik z obciążeniem RC, z doskonałą filtracją napięcia wyprostowanego, $R=20\Omega$:

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinien:

- 1) narysować schematy prostowników, przebiegi czasowe napięcia wtórnego oraz napięcia wyprostowanego dla przypadku a oraz b,
- 2) obliczyć przekładnię zwojową i napięciową transformatora,
- 3) obliczać skuteczną i maksymalną wartość napięcia wtórnego,
- 4) skorzystać z wzorów zamieszczonych w Poradniku dla ucznia, obliczyć średnie napięcia wyprostowane i z prawa Ohma obliczyć prądy.

- Wypożyczenie stanowiska pracy:
- literatura.

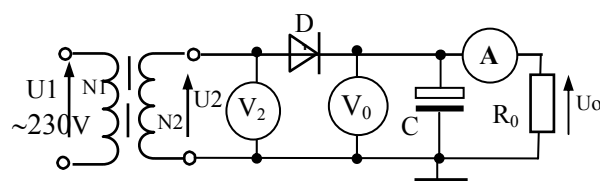
Ćwiczenie 3

Przeanalizuj działanie układów prostowniczych jednofazowych. Wykonaj pomiary miernikami i za pomocą oscyloskopu, zinterpretuj wyniki pomiarów.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinienś:

- 1) przypomnieć sobie właściwości diody prostowniczej i jej charakterystykę $I=f(U)$,
 - 2) zanotować oznaczenia, definicje i wartości najważniejszych parametrów katalogowych charakteryzujących właściwości diod prostowniczych w badanych układach: I_{Fmax} ; U_F ; U_{RMAX} ;
 - 3) zbadać prostownik półfalowy z obciążeniem rezystancyjnym zgodnie z zaleceniami:
 - zestawić układ pomiarowy do badania prostownika przedstawiony na rys. 4.50. bez kondensatora oraz zmierzyć i zanotować wartości: napięcia skutecznego $U_2 = \dots\dots\dots$, prąd odbiornika: $I_{0sr} = \dots\dots\dots$, napięcie wyprostowane: $U_{0sr} = \dots\dots\dots$,
 - zarejestrować oscylogramy napięć $u_2(t)$, $u_0(t)$, $u_d(t)$, $i_0(t)$ (z prawa Ohma), zanotować na oscylogramach wartości amplitud napięć i prądów oraz okres przebiegów, wartości czasów przewodzenia diody i pracy zaporowej diody,
 - z oscylogramów określić wartość skuteczną napięcia na stronie wtórnej: $U_2 = \dots\dots\dots$, średnie napięcie U_{0sr} i prąd I_{0sr} odbiornika: $U_{0sr} = \frac{U_{2max}}{\pi} = \dots\dots\dots$ $I_{0sr} = \frac{U_{0max}}{\pi \cdot R} = \frac{U_{0sr}}{R} = \dots\dots\dots$,
 - 4) zbadać prostownik półfalowy z obciążeniem RC:
 - narysować i zestawić układ pomiarowy przedstawiony na rys. 4.50 z włączonym kondensatorem filtrującym napięcie, zanotować parametry obciążenia: $R_0 = \dots\dots\dots$ $C = \dots\dots\dots$,
 - za pomocą mierników wykonać pomiary i zanotować wartości napięć i prądu w układzie: $U_2 = \dots\dots\dots$ $U_0 = \dots\dots\dots$ $I_0 = \dots\dots\dots$
 - zarejestrować oscylogramy napięć i prądów w układzie: $u_2(t)$; $u_0(t)$; $u_d(t)$, na oscylogramach opisać wartości amplitud przebiegów, czasy ich trwania,
 - z oscylogramów określić przybliżone wartości napięcia średniego U_0 i amplitudy tętnień napięcia na odbiorniku: $U_0 = \dots\dots\dots$; $\Delta U_0 = U_{0max} - U_{0min} = \dots\dots\dots$
 - 5) zbadać prostownik mostkowy Graetza z obciążeniem R (przedstawiony na rys. 4.48):
 - zestawić układ pomiarowy prostownika,
 - wykonać pomiary za pomocą mierników i zanotować wartości napięć i prądu w układzie: $U_2 = \dots\dots\dots$ $U_0 = \dots\dots\dots$ $I_0 = \dots\dots\dots$,
 - zachowując współbieżność czasową zanotować oscylogramy: $u_2(t)$; $u_0(t)$; zanotować wartości amplitudy napięć oraz wartości czasów przewodzenia poszczególnych diod.
- Na podstawie oscylogramów określić wartości maksymalną i średnią napięcia i prądu odbiornika: $U_{0osc} = \dots\dots\dots$ $I_{0osc} = U_{0osc} / R_0 = \dots\dots\dots$, porównać wartości uzyskane z oscylogramów z wartościami zmierzonymi, zinterpretować zaobserwowane różnice.



Rys. 4.50. Prostownik półfalowy

Wyposażenie stanowiska pracy:

- transformator sieciowy 230V/12V lub 24V, moc ok. 30VA,
- diody i mostek Graetza zamontowane dla łączenia przewodami,
- mierniki AC, DC, oscyloskop 2-kanalowy, przewody połączeniowe.

4.3.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

- 1) wyjaśnić pojęcia: prostownik, filtr prostowniczy, stabilizator napięcia?
- 2) narysować przebiegi czasowe napięcia wyprostowanego w prostowniku półfalowym i pełnofalowym, przy obciążeniu rezystancyjnym i RC?
- 3) określić funkcję transformatora, diody, kondensatora, obciążenia w układach prostownikowych?
- 4) określić znaczenie wartości pojemności kondensatora filtrującego dla przebiegu prądu wyprostowanego w układzie prostownika?

Tak Nie

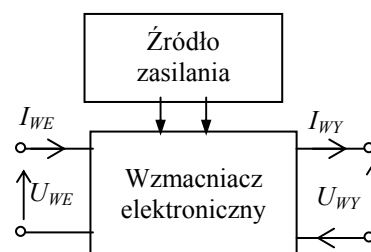
☐ ☐
☐ ☐
☐ ☐
☐ ☐

4.4. Wzmacniacze elektroniczne

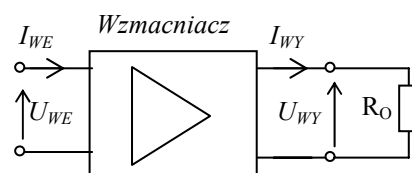
4.4.1. Materiał nauczania

Wzmacniacz – to urządzenie elektroniczne lub układ, który kosztem energii źródła zasilającego zwiększa poziom sygnału elektrycznego przy zachowaniu niezmiennego kształtu przebiegu czasowego sygnału. Schemat blokowy wzmacniacza pokazany jest na rys. 4.51. Wśród układów wzmacniaczy, które możemy spotkać w różnych zastosowaniach występują najróżniejsze ich wykonania. Można je podzielić na wiele grup obejmujących określone cechy wspólne, co przedstawiono poniżej.

1. Ze względu na rodzaj wzmacnianego sygnału:
 - wzmacniacze prądu stałego (wzmacniają tylko sygnały prądu stałego lub wolno zmieniające się),
 - wzmacniacze prądu przemiennego.
2. Ze względu na szerokość przedziału częstotliwości sygnałów wzmacnianych (pasmo częstotliwości):
 - wzmacniacze wąskopasmowe, zwane selektywnymi,
 - wzmacniacze szerokopasmowe.
3. Ze względu na położenie przedziału częstotliwości (pasma) sygnałów wzmacnianych:
 - wzmacniacze dolnoprzepustowe,
 - wzmacniacze pasmowo-przepustowe,
 - wzmacniacze górno-przepustowe.
4. Ze względu na rodzaj wielkości, która podlega wzmocnieniu:
 - wzmacniacze napięciowe,
 - wzmacniacze prądowe,
 - wzmacniacze mocy.



Rys. 4.51. Schemat blokowy wzmacniacza



Rys. 4.52. Symbol bloku wzmacniacza i wielkości z nim związane

5. Ze względu na technologię budowy:
- wzmacniacze scalone monolityczne,
 - wzmacniacze hybrydowe,
 - wzmacniacze z elementów dyskretnych.

Parametry wzmacniaczy

1. Współczynnik wzmocnienia – wzmocnienie. Można wyróżnić wzmocnienie napięciowe, prądowe oraz mocy. Każdy z tych parametrów definiowany jest jako stosunek wartości wielkości sygnału wyjściowego do wejściowego, które pokazane są na rys. 4.51 i 4.52.

Wzmocnienie napięciowe jest to iloraz napięcia wyjściowego do napięcia wejściowego:

$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}} \text{ lub w mierze decybelowej: } k_u[dB] = 20 \log \frac{U_{wy}}{U_{we}}.$$

Wzmocnienie prądowe to stosunek prądu na wyjściu do prądu wejściowego wzmacniacza:

$$k_i = \frac{I_{wy}}{I_{we}} \text{ lub w mierze decybelowej: } k_i[dB] = 20 \log \frac{I_{wy}}{I_{we}}.$$

Wzmocnienie mocy to stosunek mocy, która wydzieli się w obciążeniu wzmacniacza do mocy dostarczonej przez źródło sygnału do wejścia wzmacniacza:

$$k_p = P_{wy} / P_{we} = U_{wy} \cdot I_{wy} / U_{we} \cdot I_{we} = k_u \cdot k_i$$

$$k_p = k_u \cdot k_i$$

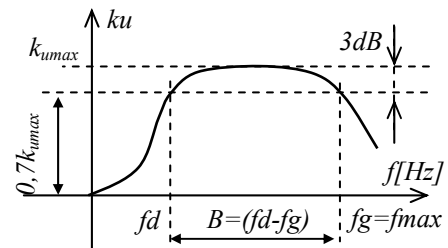
2. Oporność wejściowa – to stosunek napięcia wejściowego do prądu wejściowego

$$R_{we} = U_{we} / I_{we}$$

3. Oporność wyjściowa – to stosunek zmiany napięcia wyjściowego do zmiany prądu wyjściowego wywołanej zmianą obciążenia wzmacniacza: $R_{wy} = \Delta U_{wy} / \Delta I_{wy}$

Oporność wejściowa i wyjściowa to parametry, mające duży wpływ na współpracę wzmacniacza ze źródłem sygnału i odbiornikiem sygnału.

4. Pasma przenoszenia wzmacniacza to szerokość przedziału wartości częstotliwości sygnałów, które są poprawnie wzmacniane przez dany wzmacniacz. Parametr ten mówi, że dany wzmacniacz elektroniczny nie wzmacnia w taki sam sposób sygnałów o różnych częstotliwościach. Określenie pasma jest możliwe na podstawie częstotliwościowej charakterystyk amplitudowej $k_u = F(f)$ – rys. 4.53. Zaznaczono tam częstotliwości graniczne, dolną f_d i górną f_g , w zakresie których wzmacniacz poprawnie wzmacnia sygnały.



Rys. 4.53. Przykład charakterystyki amplitudowej wzmacniacza i sposób wyznaczania jego pasma

Częstotliwości graniczne górną i dolną wyznaczamy jako punkty przecięcia charakterystyki częstotliwościowej z prostą narysowaną na poziomie $1/\sqrt{2} k_{umax} = 0,7 k_{umax}$ (wzmocnienia maksymalnego). Odpowiada to zmniejszeniu się wzmocnienia o około 3 dB (w skali decybelowej). Poniżej f_d i powyżej f_g wzmocnienie napięciowe spada do poziomu niższego niż $0,7 k_{umax}$ i przyjmuje się, że wzmacniacz nie spełnia tu swojej roli.

Szerokość pasma przenoszenia to różnica częstotliwości górnej (f_g) i dolnej (f_d) napięć przenoszonych z wejścia do wyjścia wzmacniacza: $B = f_g - f_d$.

5. Zniekształcenia nieliniowe. Przyczyną zniekształceń nieliniowych są nieliniowe charakterystyki prądowo-napięciowe elementów (diod, tranzystorów) wchodzących w skład układu wzmacniającego. Gdy do wejścia wzmacniacza doprowadzimy, np. wzorcowy sygnał sinusoidalny to po przetwarzaniu przez element nieliniowy ulega on zniekształceniu. Przez to na wyjściu, oprócz sinusoidy sygnału z wejścia pojawią się dodatkowe napięcia składowe sygnału o częstotliwościach, których uprzednio nie było. Te dodatkowe składowe napięcia sygnału o częstotliwościach będących wielokrotnością częstotliwości podstawowej, to są tzw. **wyższe**

harmoniczne. Im większe są amplitudy wyższych harmonicznych, tym większy jest poziom zniekształceń wprowadzanych przez wzmacniacz. W technice poziom zniekształceń nieliniowych wprowadzanych przez wzmacniacze wyrażany jest przez **współczynnik**

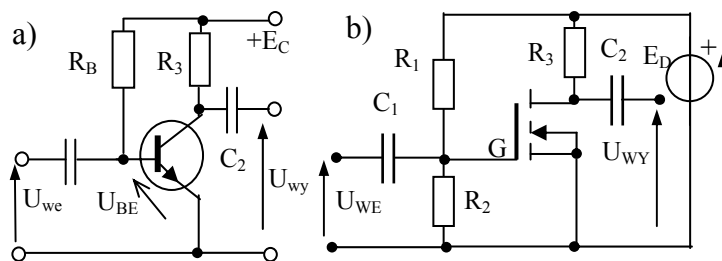
zawartości harmonicznych (z. ang. **THD**):
$$h = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2}} \cdot 100\%,$$

gdzie: U_1 – amplituda napięcia o częstotliwości podstawowej (pierwsza składowa harmoniczna),
 $U_2, U_3 \dots U_n$ – druga i trzecia, ..., n-ta harmoniczna harmoniczna sygnału.

Dobrej jakości wzmacniacze powinny charakteryzować się jak najmniejszym współczynnikiem zawartości harmonicznych.

Wzmacniacze małych sygnałów niskiej (małej) częstotliwości (m.cz.)

Są to układy, na których opiera się podstawy nauki o wzmacniaczach. Określenie „małych sygnałów” i „m.cz” oznacza, że są to wzmacniacze, w których sygnały wejściowe i wyjściowe mają amplitudy znacznie mniejsze od wartości napięć zasilających oraz przewidziane są do wzmacniania napięć o stosunkowo niskich częstotliwościach, np. z zakresu częstotliwości akustycznych, tj. do 20 kHz. Stosuje się je jako wzmacniacze mikrofonowe, w przyrządach pomiarowych, w sprzęcie AV. Elementami aktywnymi stosowanymi do budowy układów wzmacniaczy są tranzystory bipolarne lub polowe różnego rodzaju. Najprostsze przypadki schematów jednostopniowych wzmacniaczy napięć przemiennych pokazane są na rys. 4.54. Na rysunku 4.54a pokazany jest schemat najprostszego wzmacniacza na tranzystorze bipolarnym w układzie WE, zaś na rys. 4.54b pokazany jest schemat wzmacniacza na tranzystorze MOSFET z kanałem wzbogacanym typ N, pracującym w układzie wspólnego źródła (WS). Nie zamieszczono tu przykładu schematu wzmacniacza na tranzystorze JFET, o czym więcej można przeczytać w [1]. Dla poprawnej pracy prawie wszystkie wzmacniacze wymagają zasilania oraz wstępnej polaryzacji elektrod tranzystorów za pomocą napięć stałych zasilających układ (tu E_C i E_D). W



Rys. 4.54. Schematy jednostopniowych wzmacniaczy tranzystorowych m.cz.: a) na tranzystorze bipolarnym NPN w układzie WE, b) na tranzystorze MOSFET kanałem indukowanym typu N, w układzie wspólnego źródła (WS)

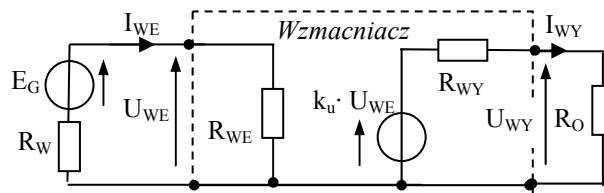
wyniku tego w tranzystorach, nawet przy braku sygnału płyną prądy stałe, zwane **prądami polaryzacji wstępnej**. Prądy i napięcia polaryzacji wstępnej oznaczają tzw. **punkt pracy tranzystora**. Sygnał wzmacniany nakłada się na prąd polaryzacji wstępnej i podlega wzmocnieniu. Bez prądów polaryzacji wstępnej nie jest możliwe wzmocnienie sygnałów, ze względu na nieliniowość charakterystyk prądowo-napięciowych tranzystorów. Właściwy dobór i stabilność punktu pracy tranzystora to jedno z ważniejszych zadań konstruktora wzmacniacza. W układach na rys. 4.54 za ustalanie punktów pracy tranzystorów odpowiadają rezystory R_B, R_1, R_2, R_3 oraz źródła zasilające E_C i E_D . Wartości rezystorów R_3 decydują również o wartości współczynników wzmocnienia napięciowego wzmacniaczy. Kondensatory C_1, C_2 są tu elementami sprzęgającymi dla przepływu prądów sygnałowych i blokującymi przepływ prądów stałych do źródła sygnału i z wyjść do odbiorników sygnału U_{wy} , których tu nie zamieszczono.

Z punktu widzenia użytkownika wzmacniaczy ważną jest umiejętność właściwej interpretacji i wykorzystania parametrów wzmacniacza. Do tego celu rzadko konieczna jest znajomość schematu ideowego wzmacniacza. Bardziej przydatnym jest schemat zastępczy, który opisuje wpływ podstawowych parametrów wzmacniacza na pracę w konkretnym zastosowaniu. W opisie właściwości tranzystorów i wzmacniaczy stosowane są różne modele i schematy [1], [2], [6]. Wszystkie jednak opisują **wzmacniacz jako obiekt zwany czwórnikiem**, tzn.

posiadający dwie pary zacisków: wejściowe i wyjściowe. Najprostszy schemat zastępczy wzmacniacza z dołączonym źródłem sygnału i odbiornikiem (obciążeniem) pokazany jest na rys. 4.55. Posługując się takim schematem możemy przewidywać skutki pracy wzmacniacza w obwodzie, gdy znamy parametry wzmacniacza i parametry obwodów współpracujących.

Na schematach zastępczych wzmacniaczy występuje sterowane źródła napięcia $k_u \cdot U_{we}$, które symbolizuje efekt wzmacniania sygnału wejściowego. Jego $SEM = k_u \cdot U_{we} = 0$ gdy $U_{we} = 0$.

Konstruktorzy wzmacniaczy napięcia dążą do uzyskania możliwie dużej oporności wejściowej i małej oporności wyjściowej. Gdy R_{WE} jest duża wzmacniacz nie obciąża źródła sygnału poborem prądu wejściowego. Taką cechę posiadają wzmacniacze na tranzystorach polowych. Gdy R_{WY} jest mała, wtedy wzmacniacz może dostarczać odpowiednio duży prąd do odbiornika, bez znaczącego zmniejszania się napięcia na wyjściu. Problemy te warto przeanalizować przez wykonanie ćwiczeń w p. 4.4.3.



Rys. 4.55. Schemat zastępczy wzmacniacza sterowanego z rzeczywistego źródła sygnału E_G oraz obciążonego rezystancją R_O

Wymienione tu dwa układy wzmacniaczy to tylko przykłady licznych wzmacniaczy o bardzo zróżnicowanych możliwościach i zastosowaniach ([1], [2], [6]).

Sprzężenie zwrotne w układach elektronicznych

Sprzężenie zwrotne w ogólności to oddziaływanie skutku na przyczynę. W elektronice sprzężenie zwrotne polega na oddziaływaniu wyjścia na wejście układu.

Jego znaczenie techniczne jest ogromne. Bez sprzężenia zwrotnego niemożliwe jest działanie najprostszych układów regulacji automatycznej. W konstrukcjach wzmacniaczy i innych układów elektronicznych jest wykorzystywane dla osiągnięcia pożądanych właściwości układu. Sprzężenie zwrotne jest jednym ze środków stosowanych dla zmniejszenia czułości układów wzmacniaczy na zmiany temperatury oraz na wahania napięcia zasilającego. Szerzej zagadnienia te opisane są w [1], [2], [6]. Tu krótko zatrzymamy się nad wpływem sprzężenia zwrotnego na właściwości wzmacniacza. Ilustrację dla tego problemu stanowi rys. 4.56.

Wzmocnienie napięciowe wzmacniacza bez sprzężenia zwrotnego k_u (rys. 4.56), zwane wzmocnieniem przy otwartej pętli jest równe stosunkowi napięcia wyjściowego U_{wy} do napięcia wejściowego U_I : $k_u = U_{wy} / U_I$

Po dołączeniu pętli sprzężenia zwrotnego napięcie wejściowe członu wzmacniacza jest równe sumie sygnału wejściowego U_{we} i składowej ze sprzężenia zwrotnego:

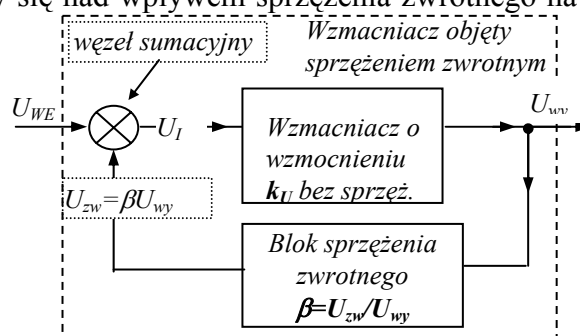
$$U_I = U_{WE} + U_{zw} = U_{WE} + \beta \cdot U_{wy}.$$

Współczynnik sprzężenia zwrotnego β zależy od konstrukcji bloku sprzężenia zwrotnego oraz od sposobu pobierania sygnału zwrotnego z wyjścia wzmacniacza.

Niezbyt skomplikowanymi, pominiętymi tu przekształceniami można dowieść, że wzmacniacz objęty sprzężeniem zwrotnym charakteryzuje wzmocnieniem napięciowym o wartości:

$$k_s = \frac{k_u}{1 - k_u \cdot \beta}.$$

Równanie to opisuje właściwości wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym i można z niego wyprowadzić trzy charakterystyczne przypadki sprzężenia zwrotnego.



Rys. 4.56. Schemat blokowy wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym

1. $|1 - k_u \cdot \beta| > 1$, czyli $k_s < k$. Oznacza to zmniejszenie wzmocnienia układu ze sprzężeniem w stosunku do wzmocnienia układu bez sprzężenia i ten rodzaj sprzężenia nazywany jest **ujemnym sprzężeniem zwrotnym**. W tym przypadku napięcie zwrotne doprowadzane z wyjścia do wejścia układu jest skierowane przeciwnie w stosunku do napięcia sygnału wejściowego.
2. $0 < |1 - k_u \cdot \beta| < 1$, czyli $k_s > k$. Oznacza to zwiększenie się wzmocnienia napięciowego układu ze sprzężeniem w stosunku do wzmocnienia wprowadzanego przez układ bez sprzężenia. Ten typ sprzężenia zwany jest **dodatnim sprzężeniem zwrotnym**. Napięcie zwrotne jest tu zgodne w fazie z napięciem sygnału wejściowego.
3. $|1 - k_u \cdot \beta| = 0$, czyli $k_s \rightarrow \infty$. Występuje tu krytyczny przypadek dodatniego sprzężenia zwrotnego. Układ wzmacniający zamienia się w generator i na wyjściu może wytwarzać napięcie przemiennie bez doprowadzania sygnału wejściowego ($U_{we} = 0$). Ten typ sprzężenia wykorzystywany jest w technice generacji drgań elektrycznych.

W układach wzmacniaczy największe znaczenie ma ujemne sprzężenie zwrotne, które wprawdzie zmniejsza wzmocnienie, lecz i poprawia wiele parametrów wzmacniacza.

Zastosowanie ujemnego sprzężenia zwrotnego poprawia następujące parametry:

- a) rozszerza pasmo przenoszenia, wpływa na impedancję wejściową i wyjściową wzmacniacza,
- b) zwiększa stabilność pracy (uniezależnia pracę wzmacniacza od wahań temperatury i napięcia, od zmiany i pogarszania się parametrów elementów wzmacniających),
- c) zmniejsza zniekształcenia nieliniowe sygnałów we wzmacniaczu.

Chcąc uzyskać większe wzmocnienie, stosujemy wielostopniowe układy wzmacniające łączone kaskadowo, tzn. wyjście pierwszego stopnia wzmacniacza łączymy z wejściem następnego itd.

Wtórnik napięciowe są to specyficzne wzmacniacze o współczynniku wzmocnienia napięciowego bliskim, ale mniejszym od jedności i o dużym wzmocnieniu prądowym. Wtórnik nie odwraca fazy sygnału wejściowego, charakteryzuje się dużą opornością wejściową (dzięki temu nie obciąża źródła sygnału) i małą opornością wyjściową dzięki czemu może być obciążany poborem prądu z wyjścia. Wtórnik napięciowe stosowane są jako układy dopasowujące impedancje w stopniach wejściowych wzmacniaczy (ze względu na dużą impedancję wejściową) oraz w stopniach wyjściowych, gdzie mogą dostarczać prąd do małej impedancji obciążenia.

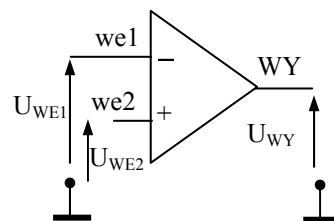
Wzmacniacze operacyjne

Są zaliczane do najbardziej rozpowszechnionych analogowych układów elektronicznych, produkowanych w postaci monolitycznych układów scalonych ([1], [2], [6]).

Początkowo nazwa **wzmacniacz operacyjny** dotyczyła układów wzmacniających stosowanych do wykonywania operacji matematycznych, np.: dodawania, odejmowania, mnożenia, całkowania i różniczkowania sygnałów analogowych (ciągłych) w elektronicznych maszynach analogowych. Po upowszechnieniu technologii cyfrowej, komputery analogowe zostały wyparte przez cyfrowe, ale wzmacniacze operacyjne zachowały swoje znaczenie ze względu na cenne właściwości i są one nadal szeroko stosowane.

Obecnie pojęcie **wzmacniacz operacyjny** odnosi się do wzmacniaczy o sprzężeniu bezpośrednim (stałoprądowym) pomiędzy stopniami, o dużym wzmocnieniu i z reguły przeznaczonych do pracy z zewnętrznym obwodem sprzężenia zwrotnego. Głównie zewnętrzny obwód sprzężenia zwrotnego decyduje o właściwościach całego układu, w którym stosowany jest wzmacniacz operacyjny. Wielka uniwersalność, przy bardzo dobrych parametrach użytkowych, daje możliwość stosowania ich w elektronicznym sprzęcie powszechnego użytku, w miernictwie, w automatyce. Wzmacniacze operacyjne wykorzystuje się do budowy układów wzmacniających o różnych właściwościach, komparatorów, prostowników liniowych, a także filtrów aktywnych itd.

Rys. 4.57. przedstawia symbol graficzny wzmacniacza operacyjnego. Posiada on dwa wejścia. Wejście $We1$, oznaczone minusem, jest nazywane inwersyjnym lub odwracającym, bo odwraca fazę sygnału wejściowego. Wejście $We2$, oznaczone plusem – jest wejściem nieodwracającym (nieinwersyjnym). Ważną właściwością wzmacniacza operacyjnego jest to, że gdy do obu jego wejść zostaną doprowadzone dwa identyczne sygnały, to sygnał na wyjściu powinien być równy zeru. Napięcie wyjściowe wzmacniacza operacyjnego jest wprost proporcjonalne do różnicy napięć na jego wejściach.



Rys. 4.57. Symbol graficzny wzmacniacza operacyjnego

Wzmocnienie napięciowe wzmacniacza operacyjnego z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego definiuje się jako stosunek napięcia wyjściowego do różnicy napięć na jego wejściach:

$$k_{Uo} = \frac{U_{wy}}{U_{we1} - U_{we2}}$$

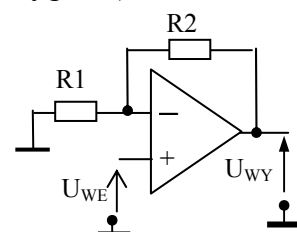
Idealny wzmacniacz operacyjny powinien charakteryzować się:

- nieskończenie dużym wzmocnieniem napięciowym,
- nieskończenie dużą rezystancją wejściową (nie pobiera prądu ze źródła sygnału),
- zerową rezystancją wyjściową (napięcie wyjściowe jest niezależne od prądu obciążenia).

Praktyczne rozwiązania wzmacniaczy operacyjnych posiadają parametry odbiegające od modelu wzmacniacza idealnego, co jednak nie przeszkadza traktować je jako idealne podczas uproszczonej analizy działania układów ze wzmacniaczami operacyjnymi.

W literaturze znajduje się wiele przykładów układów z zastosowaniem wzmacniaczy operacyjnych ([1], [2], [6]). Na rys. 4.58 mamy schemat wzmacniacza nieodwracającego fazy sygnału. Jego wzmocnienie napięciowe wynosi:

$k_u = (1 + R2 / R1)$. Oznacza to, że jest ono zależne tylko od rezystancji rezystorów tworzących obwód sprzężenia zwrotnego, a nie zależy od parametrów wzmacniacza. Ta właśnie cecha wzmacniaczy operacyjnych sprawia, że są one tak rozpowszechnione.



Rys. 4.58. Wzmacniacz nieodwracający

4.4.2. Pytania sprawdzające

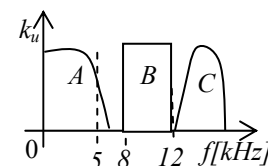
Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonywania ćwiczeń.

1. Co to jest wzmacniacz i jakie parametry opisują jego właściwości?
2. Co to są częstotliwości graniczne i pasmo przenoszenia wzmacniacza?
3. Co to są prądy polaryzacji wstępnej i punkt pracy tranzystora?
4. Co to jest czwórnik i schemat zastępczy wzmacniacza?
5. Co rozumiesz przez sprzężenie zwrotne w ogólności i sprzężenie zwrotne w elektronice?
6. Jakie spotykamy rodzaje sprzężenia zwrotnego i jak wpływają one na wzmacniacz?
7. Co to są wtórniki napięciowe?
8. Co to jest wzmacniacz operacyjny, jaki jest jego symbol graficzny i wymowa tego symbolu?
9. Jaki jest schemat i właściwości wzmacniacza nieodwracającego?

4.4.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Dla wzmocnienia i rozdzielenia na dwa tory sygnałów o częstotliwościach z zakresu (0–5) kHz oraz (8–12) kHz należy dobrać wzmacniacze o odpowiednich charakterystykach amplitudowych. Mając do wyboru wzmacniacze A, B, C o charakterystykach amplitudowych jak na rys. 4.59 wybierz właściwe.



Rys. 4.59. Charakterystyki amplitudowe czwórników

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinien:

- 1) korzystając z Poradnika dla ucznia (i ze wskazówek nauczyciela) narysować wymagane charakterystyki częstotliwościowe wzmacniaczy,
- 2) porównać narysowane charakterystyki z rys. 4.59 i świadomie wybrać odpowiednie układy,
- 3) zapisać uzasadnienie wyboru i odrzucenia układów.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- literatura,
- poradnik dla ucznia.

Ćwiczenie 2

Do wejścia wzmacniacza charakteryzującego się parametrami: $R_{we} = 1\text{k}\Omega$, $k_u = 10^3$, $R_{wy} = 100\Omega$, doprowadzono sygnał $U_{we} = 10\text{mV}$. Określ jakie napięcie uzyskamy na wyjściu gdy:

- a) wzmacniacz pracuje bez obciążenia,
- b) wzmacniacz obciążono kolejnym stopniem wzmacniacza o oporności wejściowej $R_{we} = 0,1\text{k}\Omega$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinien:

- 1) dla podpunktu a: narysować schematy zastępczy wzmacniacza nieobciążonego (rys. 4.55), obliczyć SEM źródła sterowanego jako równą napięciu na wyjściu,
- 2) dla podpunktu b: narysować schematy zastępczy wzmacniacza obciążonego, obliczyć SEM źródła sterowanego, zastosować II prawo Kirchhoffa oraz prawo Ohma w obwodzie wyjścia wzmacniacza i obliczyć napięcie na obciążeniu wzmacniacza.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- literatura,
- poradnik dla ucznia.

Ćwiczenie 3

Zapoznaj się parametrami wzmacniacza operacyjnego, zbuduj wzmacniacze odwracający i nieodwracający fazy sygnału, zbadaj pracę układów.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinien:

- 1) wynotować wartości parametrów znamionowych wzmacniacza i opisać ich znaczenie,
- 2) narysować schemat i połączyć układ wzmacniacza odwracającego fazę sygnału (rys 4.60),

3) opisać przeznaczenie poszczególnych elementów układu; zanotować wartości rezystancji R1, R2 i obliczyć wzmacnienie napięciowe $k_u = -R2/R1 = \dots$

4) zmierzyć wzmacnienie napięciowe układu po podaniu do wejścia sygnału sinusoidalnego; na ekranie oscyloskopu dwukanałowego należy obserwować przebiegi napięć wejściowego i wyjściowego (aby nie wystąpiły wyraźne, widoczne zniekształcenia kształtu sygnału wyjściowego), wykreślić oscylogramy napięć WE i WY, określić z nich wartość współczynnika wzmacnienia k_u ,

5) narysować oscylogramy napięć wejścia i wyjścia przy odłączonym oporniku R2, zapisać uzasadnienie dla zaobserwowanych przebiegów napięć,

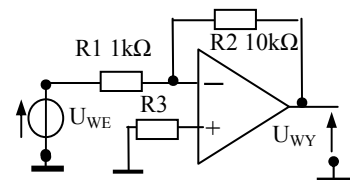
6) narysować schemat i połączyć układ wzmacniacza nieodwracającego fazy sygnału (rys 4.61),

7) obliczyć wzmacnienie napięciowe układu $k_u = 1 + R2/R1 = \dots$,

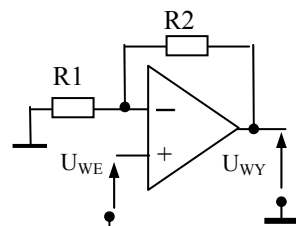
8) narysować oscylogramy napięć wejściowego i wyjściowego, określić z nich wzmacnienie napięciowe układu, porównać je z wartością obliczoną w p. 7,

9) sprawdzić pracę układu rys.4.61 przy odłączonym R2, narysować i zinterpretować zaobserwowane przebiegi,

10) sprawdzić pracę układu przy odłączonym R1, zinterpretować i opisać zaobserwowane przebiegi.



Rys. 4.60. Wzmacniacz odwracający



Rys. 4.61. Wzmacniacz nieodwracający

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- układy scalone wzmacniacze operacyjnych i ich karty katalogowe,
- Poradnik dla ucznia,
- moduł do badań wzmacniacza operacyjnego, np. serii 741,
- oscyloskop dwukanałowy,
- generator sygnałowy.

4.4.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

- 1) określić, co to jest wzmacniacz i jakie parametry opisują jego własności?
- 2) określić, co to są częstotliwości graniczne i pasmo przenoszenia wzmacniacza?
- 3) określić, co to są prądy polaryzacji wstępnej i punkt pracy tranzystora?
- 4) określić, co to jest czwórnik i schemat zastępczy wzmacniacza?
- 5) określić, na czym polega sprzężenie zwrotne w ogólności i w elektronice?
- 6) określić, rodzaje sprzężenia zwrotnego i ich wpływ na pracę wzmacniacza?
- 7) określić, co to są wtórniki napięciowe?
- 8) określić, co to jest wzmacniacz operacyjny, znam symbol graficzny?
- 9) wyjaśnić właściwości wzmacniacza nieodwracającego i odwracającego?
- 10) zmierzyć wzmacnienie napięciowe wzmacniacza?

Tak	Nie
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐

4.5. Układy kombinacyjne

4.5.1 Materiał nauczania

Systemy cyfrowe

Technika cyfrowa jest dziedziną techniki zajmującą się wykonywaniem operacji na liczbach i na wielkościach wyrażonych przez liczby. We współczesnych systemach cyfrowych stosowany jest system binarny. W systemie binarnym (dwójkowym) występują tylko dwie cyfry – „zero” i „jeden”.

Konwersja dziesiętno-dwójkowa oznacza zamianę liczby zapisanej w systemie dziesiętnym na zapis w systemie binarnym.

W zapisie dwójkowym, podstawa systemu wynosi 2, współczynniki mogą przyjmować wartość 1 lub 0.

$$L_2 = \sum_{i=-k}^{i=n} a_i \cdot 2^i, \quad \text{gdzie } a_i \in \{0,1\}.$$

Przykład: $121_{10} = 1111001_2 = 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$.

Poniżej pokazano sposób konwersji dziesiętno-dwójkowej liczby 121.

$121 : 2 = 60 + r$	1	r- reszta
$60 : 2 = 30 + r$	0	
$30 : 2 = 15 + r$	0	Wynik 1111001 – ta liczba w systemie dwójkowym wymaga 7 miejsc, czyli 7 bitów. Grupa ośmiu cyfr dwójkowych tworzy bajt. Bajt = 8 bitów.
$15 : 2 = 7 + r$	1	
$7 : 2 = 3 + r$	1	Konwersja dwójkowo-dziesiętna oznacza przejście z zapisu dwójkowego na zapis dziesiętny.
$3 : 2 = 1 + r$	1	
$1 : 2 = 0 + r$	1	

Liczby zapisane w systemie dwójkowym wymagają większej liczby pozycji niż w systemie dziesiętnym. Dlatego, aby skrócić czas zapisu i uniknąć pomyłek stosuje się czasem grupowanie trzech lub czterech cyfr dwójkowych (system ósemkowy lub szesnastkowy) i oznaczanie je jednym symbolem.

zapis w systemie ósemkowym

$$75_{10} = 1001011_2 = \underbrace{001}_1 \underbrace{001}_1 \underbrace{011}_3 = 113_8$$

W systemie szesnastkowym stosuje się 16 różnych znaków graficznych, przy czym liczby od 10 do 15 zapisywane są za pomocą kolejnych liter alfabetu. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w pozycji 5 spisu literatury.

Kodowanie jest to przypisywanie różnym informacjom pewnych symboli.

Kod jest to zestaw symboli przypisanych danej informacji.

Kody BCD (Binary Coded Decimel = system dziesiętny zakodowany dwójkowo)

W kodzie BCD 8421 każdej liczbie dziesiętnej przyporządkowana jest liczba binarna, w ten sposób, że koduje się każdą cyfrę zapisu dziesiętnego oddzielnie, np.:

$$412_{10} = 110011100_2 = \underbrace{0100}_4 \underbrace{0001}_1 \underbrace{0010}_2 \quad 2/10,$$

gdyż w kodzie 2/10

$$4 \Rightarrow 0100; 1 \Rightarrow 000; 2 \Rightarrow 0010.$$

W tabeli 1 przedstawiono różne rodzaje kodów BCD.

Tabela 1 Kody liczbowe BCD

Nazwa	8421	Aikena	1 z 10
Wagi	8 4 2 1	2 4 2 1	9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
1	0 0 0 1	0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
2	0 0 1 0	0 0 1 0	0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
3	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
4	0 1 0 0	0 1 0 0	0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
5	0 1 0 1	1 0 1 1	0 0 0 0 1 0 0 0 0 0
6	0 1 1 0	1 1 0 0	0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
7	0 1 1 1	1 1 0 1	0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
8	1 0 0 0	1 1 1 0	0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
9	1 0 0 1	1 1 1 1	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Funktory logiczne

Algebra Boole'a odnosi się do zmiennych mogących przyjmować tylko wartość „0” lub „1”. Występujące wówczas znaki „+” oraz „·” nie oznaczają dodawania i mnożenia w klasycznym sensie algebraicznym.

Aksjomaty algebry Boole'a

prawo przemienności $x_1 + x_2 = x_2 + x_1, \quad x_1 \cdot x_2 = x_2 \cdot x_1$
 prawo łączności $x_1 + (x_2 + x_3) = (x_1 + x_2) + x_3 = x_1 + x_2 + x_3$
 $x_1 \cdot (x_2 \cdot x_3) = (x_1 \cdot x_2) \cdot x_3 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$
 prawo rozdzielczości $x_1 \cdot (x_2 + x_3) = x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3$
 $x_1 + x_2 \cdot x_3 = (x_1 + x_2)(x_1 + x_3)$

Prawo de'Morgana

– dla dwóch liczb

$$\overline{x_1 + x_2} = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \quad x - \text{negacja } x \quad \text{np. } \overline{0} = 1$$

$$\overline{x_1 \cdot x_2} = \overline{x_1} + \overline{x_2} \quad \overline{1} = 0$$

– dla większej ilości liczb

$$\overline{x_1 + x_2 + x_3 + \dots} = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \dots$$

$$\overline{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \dots} = \overline{x_1} + \overline{x_2} + \overline{x_3} + \dots$$

Operacje wykonywane na stałych 0 i 1

$$0 + 0 = 0 \quad 0 \cdot 0 = 0$$

$$1 + 0 = 1 \quad 1 \cdot 0 = 0$$

$$1 + 1 = 1 \quad 1 \cdot 1 = 1$$

Operacje wykonywane na zmiennych

$$x + 0 = x \quad x + \overline{x} = 1 \quad x \cdot 0 = 0 \quad x \cdot \overline{x} = 0$$

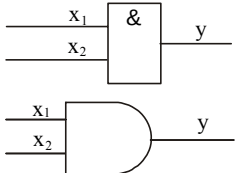
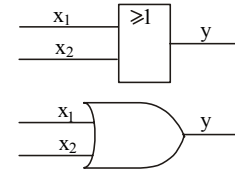
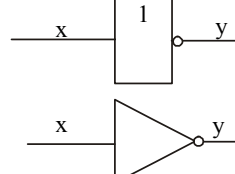
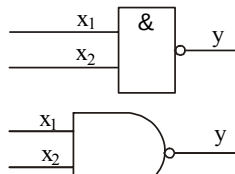
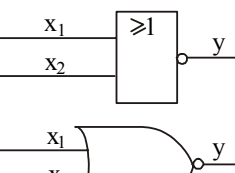
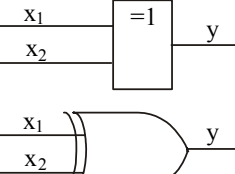
$$x + 1 = 1 \quad x + x = x \quad x \cdot 1 = x \quad x \cdot x = x$$

Prawo podwójnego zaprzeczenia

$$\overline{\overline{x}} = x$$

Funktor (bramka logiczna) – podstawowy układ realizujący funkcję logiczną. Podstawowe funktory, ich symbole graficzne, realizowane funkcje, tablice prawdy zamieszczono w tabeli 2

Tabela 2. Funktory logiczne

Nazwa funktora/ realizowanej funkcji	Symbol graficzny	Funkcja	Tablica prawdy															
AND koniunkcja		$y = x_1 \cdot x_2$	<table><tr><th>x₁</th><th>x₂</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	x ₁	x ₂	y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
x ₁	x ₂	y																
0	0	0																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																
OR alternatywa		$y = x_1 + x_2$	<table><tr><th>x₁</th><th>x₂</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	x ₁	x ₂	y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
x ₁	x ₂	y																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	1																
NOT negacja		$y = \overline{x}$	<table><tr><th>x₁</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	x ₁	y	0	1	1	0									
x ₁	y																	
0	1																	
1	0																	
NAND negacja iloczynu (funkcja Sheffera)		$y = \overline{x_1 \cdot x_2}$	<table><tr><th>x₁</th><th>x₂</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	x ₁	x ₂	y	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
x ₁	x ₂	y																
0	0	1																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																
NOR negacja alternatywy (funkcja Pierce'a)		$y = \overline{x_1 + x_2}$	<table><tr><th>x₁</th><th>x₂</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	x ₁	x ₂	y	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
x ₁	x ₂	y																
0	0	1																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	0																
EX – OR (wykluczające LUB)		$y = x_1 \cdot \overline{x_2} + \overline{x_1} \cdot x_2 =$ $= x_1 \oplus x_2$	<table><tr><th>x₁</th><th>x₂</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	x ₁	x ₂	y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
x ₁	x ₂	y																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																

Uwaga: w tabeli podano dwa symbole graficzne. Górny według norm międzynarodowych, u dołu według norm amerykańskich; oba rodzaje symboli są stosowane w Polsce.

System funkcjonalnie pełny jest to zbiór funktorów który pozwala zrealizować dowolną funkcję logiczną. Zbiory funkcjonalnie pełne złożone z funktorów:

- AND, OR, NOT,
- AND, NOT,
- OR, NOT,
- NAND } – zbiory minimalne
- NOR }

Realizacja techniczna

Podstawowe grupy układów logicznych:

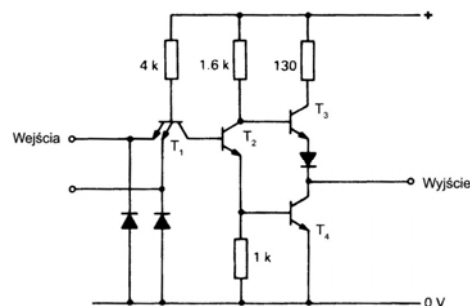
- układy TTL (Transistor-Transistor-Logic),
- układy CMOS (Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor).

Układy TTL zastąpiły układy DTL (Diode Transistor Logic). Budowa układów TTL oparta jest na tranzystorach bipolarnych. Na rys. 4.62 przedstawiono schemat bramki NAND TTL.

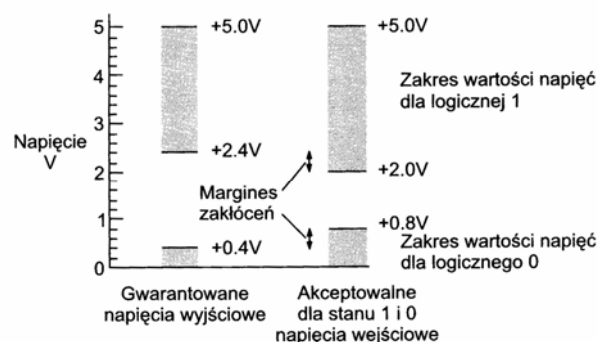
Tranzystor wejściowy ma dwa emitery. Gdy oba wejścia są w stanie 0, tranzystor T_2 jest w stanie odcięcia, tranzystor T_3 przewodzi (prąd bazy tranzystora T_3 dopływa poprzez rezystor $1,6\text{ k}\Omega$).

Baza tranzystora T_4 poprzez rezystor $1\text{ k}\Omega$ ma potencjał 0 V , tranzystor T_4 jest w stanie odcięcia. Na wyjściu układu napięcie ma wartość odpowiadającą stanowi logicznemu 1. Jeżeli na obu wejściach będzie stan logiczny 1, do bazy tranzystora T_2 będzie dopływał prąd tranzystor T_3 jest w stanie odcięcia. Potencjał na bazie tranzystora T_3 będzie równy 0 (poprzez tranzystor T_2 i złącze baza-emiter T_4). Tranzystor T_4 będzie przewodził.

W układach TTL: (rys.4.63) stanowi „1” odpowiada napięcie $3,4\text{ V}$ (nominalne) może być $+2,4\div+5\text{ V}$, zaś stanowi „0”- napięcie $0,2\text{ V}$ (nominalne) może być $0\text{ V}\div+0,4\text{ V}$.



Rys. 4.62. Bramka logiczna NAND TTL [15]



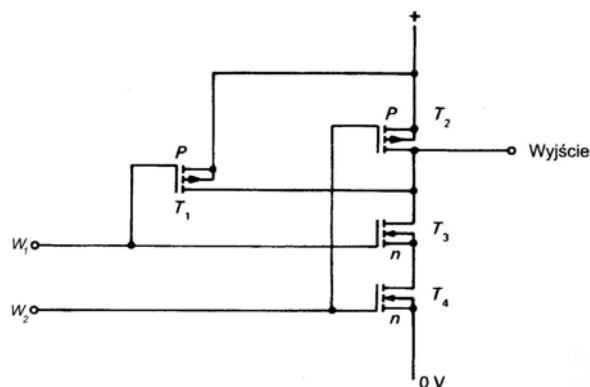
Rys. 4.63. Przedziały napięć wyjściowych i wejściowych dla układów TTL [16]

Układy logiczne CMOS – budowa oparta jest na zastosowaniu tranzystorów polowych (unipolarnych) z izolowaną bramką. Elementy CMOS są energooszczędne (izolowana bramka powoduje, że żaden prąd bramki nie płynie).

Na rys. 4.64 przedstawiono schemat dwuwejściowej bramki logicznej NAND CMOS.

Gdy wejścia są w stanie niskim (stan 0), tranzystory T_3 i T_4 są w stanie odcięcia, T_1 i T_2 przewodzą. Wyjście poprzez tranzystory T_1 i T_2 utrzymywane jest w stanie logicznym wysokim (stan 1). Jeżeli do wejścia W_1 doprowadzony zostanie stan logiczny 1, przewodzi tranzystor T_3 , T_1 jest w stanie odcięcia, ale na wyjściu utrzymywany jest stan 1, ponieważ tranzystor T_2 przewodzi T_3 jest w stanie odcięcia. Podobnie będzie, jeżeli tylko do wejścia W_2 doprowadzony zostanie stan wysoki. Dopiero, gdy do obu wejść doprowadzony zostanie stan 1, wówczas tranzystory T_1 i T_2 są w stanie odcięcia, tranzystory T_3 i T_4 przewodzą powodując stan 0 na wyjściu.

Bramki są wytwarzane w technologii stosowanej w produkcji półprzewodnikowych układów scalonych. Projektując układy cyfrowe należy dla konkretnego przypadku dokonać wyboru układów TTL lub CMOS analizując zalety i wady każdego z nich.

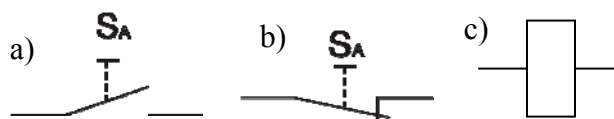


Rys. 4.64. Dwuwejściowa bramka logiczna NAND CMOS [15]

Tabela 3. Porównanie parametrów układów cyfrowych (logicznych) [15]

Tryb	Zasilanie	Typowy prąd zasilania na jedną bramkę	Typowa moc na jedną bramkę	Prąd wyjściowy		Maksymalna częstotliwość pracy	Obciążalność
				Logiczna 1	Logiczne 0		
TTL 74 ...	5V	40μA	10 mW	500μA	16 mA	35 MHz	10
74LS	5V	20 μA	2 mW	300 μA	8 mA	45 MHz	20
CMOS							
4000BE	3÷18V	10 pA	0,6 μW	1 mA	2,5 mA	5 MHz	50
74HC ...	2÷6V	10 pA	1 μW	4 mA	4 mA	40 MHz	>500
74HCT....	5V	10 pA	1 μW	4 mA	4 mA	45 MHz	>500
74AC	2÷6V	10 pA	1 μW	24 mA	24 mA	100 MHz	>500

Realizacja funkcji logicznych na przekaźnikach

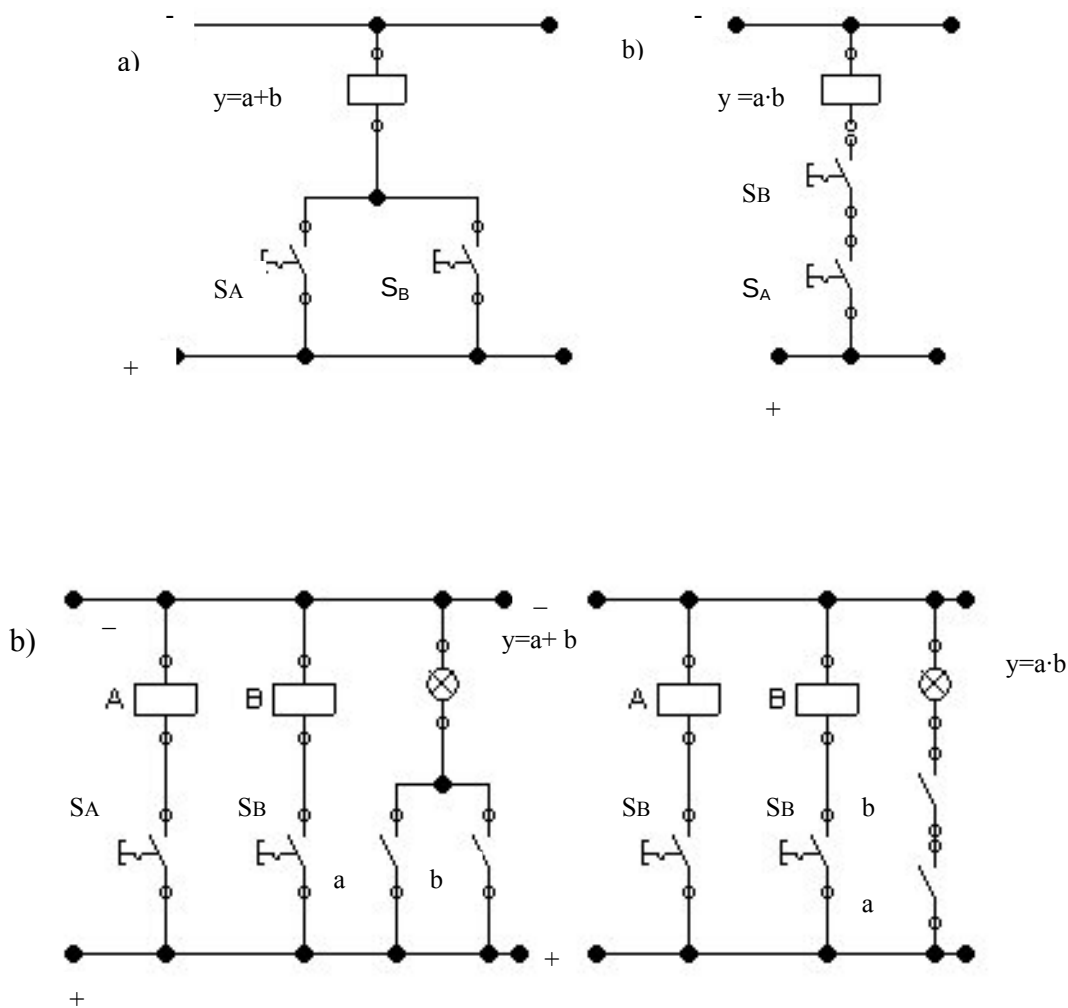


Rys. 4.65. Symbole elementów stykowych: a) zestyk zwierny, b) zestyk rozwierny, c) cewka przekaźnikowa

Jeżeli przez cewkę przekaźnika nie płynie prąd, wówczas zestyk zwierny (normalnie rozwarty) (rys. 4.66a) jest rozwarty, zestyk rozwierny – rys. 4.65b (normalnie zwarty) jest zwarty. Gdy przez cewkę popłynie prąd zestyk normalnie rozwarty zamyka się, zestyk zwarty – otwiera.

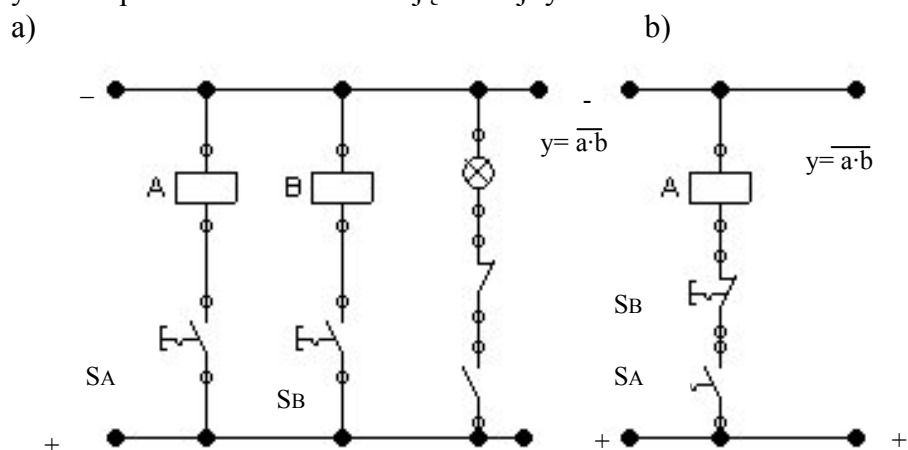
Przyjęto oznaczenia:

- A, B – oznaczenie cewki przekaźnika,
- a, b – oznaczenie zestyku zwiernego danego przekaźnika,
- $\bar{a}$, $\bar{b}$ – oznaczenie zestyku rozwiernego przekaźnika,
- SA, SB – przyciski (zestyki) zewnętrzne.



Rys. 4.66. Realizacja na elementach stykowych $y= a+ b$, $y= a \cdot b$:
a) na zestykach zewnętrznych, b) na zestykach przekaźnika

Na rys. 4.67 przedstawiono realizację funkcji $y = \overline{a \cdot b}$.



Rys. 4.67. Realizacja funkcji $y = \overline{a \cdot b}$: a) na zestykach przekaźnika, b) na zestykach (przyciskach) zewnętrznych.

Podział układów cyfrowych:

- układy kombinacyjne (rys. 4.68),
- układy sekwencyjne (pamięciowe).

W układzie kombinacyjnym wartości sygnałów wyjściowych (stan wyjść) zależą tylko od bieżących wartości sygnałów wejściowych (stanu wejść).

Działanie układu kombinacyjnego może być przedstawione w postaci:

- opisu słownego,
- tablicy prawdy (tablica wartości funkcji),
- kanonicznej.

Funkcję można zapisać w postaci kanonicznej alternatywnej lub koniunkcyjnej.

Kanoniczna postać alternatywna jest sumą składników jedności utworzonych dla stanów wejść, przy których stan wyjść (sygnał wyjściowy) równy jest jeden.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=0}^{2^n-1} f_i K_i \quad K_i - \text{składniki jedynek}$$

Kanoniczna postać koniunkcyjna jest iloczynem czynników zera utworzonych dla stanów wejść, przy których stan wyjść (sygnał wyjściowy) równy jest zero.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=0}^{2^n-1} (f_i + D_i) \quad D_i - \text{czynniki zera}$$

Zapisanie funkcji w postaci kanonicznej alternatywnej i koniunkcyjnej wyjaśniono na przykładzie funkcji przedstawionej w tabeli 4

Tabela 4. Tablice prawdy funkcji, składniki jedynek oraz czynniki zera funkcji

Nr stanu	x_1	x_2	x_3	y	składniki jedynek K_i	Czynniki zera D_i
0	0	0	0	0		$D_0 = x_1 + x_2 + x_3$
1	0	0	1	0		$D_1 = x_1 + x_2 + x_3$
2	0	1	0	1	$K_2 = \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$	
3	0	1	1	1	$K_3 = \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot x_3$	
4	1	0	0	0		$D_4 = \bar{x}_1 + x_2 + x_3$
5	1	0	1	1	$K_5 = x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3$	
6	1	1	0	1	$K_6 = x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$	
7	1	1	1	0		$D_7 = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3$
					Rozpisując składniki jedynek zapisujemy x dla 1 $\bar{x}$ dla 0	Rozpisując czynniki zera zapisujemy x dla 0 $\bar{x}$ dla 1

Kanoniczne postacie funkcji zdefiniowanej tabelą.

Kanoniczna postać alternatywna

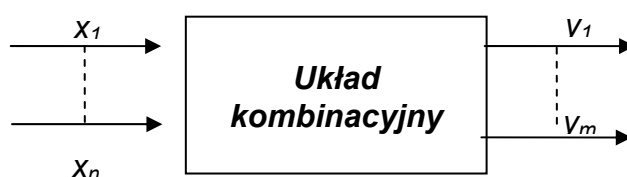
$$y = K_2 + K_3 + K_5 + K_6 = x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 = \sum (2, 3, 5, 6)$$

Kanoniczna postać koniunkcyjna

$$y = D_0 \cdot D_1 \cdot D_4 \cdot D_7 = (x_1 + x_2 + x_3) (x_1 + x_2 + \bar{x}_3) (\bar{x}_1 + x_2 + \bar{x}_3) (\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3) = \prod (0, 1, 4, 7)$$

Minimalizację funkcji przeprowadza się w celu uproszczenia zapisu funkcji. W wyniku minimalizacji do realizacji fizycznej funkcji zostanie użyta mniejsza liczba funkatorów.

Minimalizacja funkcji metodą tablic Karnaugh. Minimalizację przeprowadza się przy zastosowaniu reguł sklejania.



$x_1, \dots, x_n$ – sygnały wejściowe

$y_1, \dots, y_m$ – sygnały wyjściowe

Rys. 4.68. Ogólny schemat układu kombinacyjnego

$$Ax + \overline{A}x = A$$

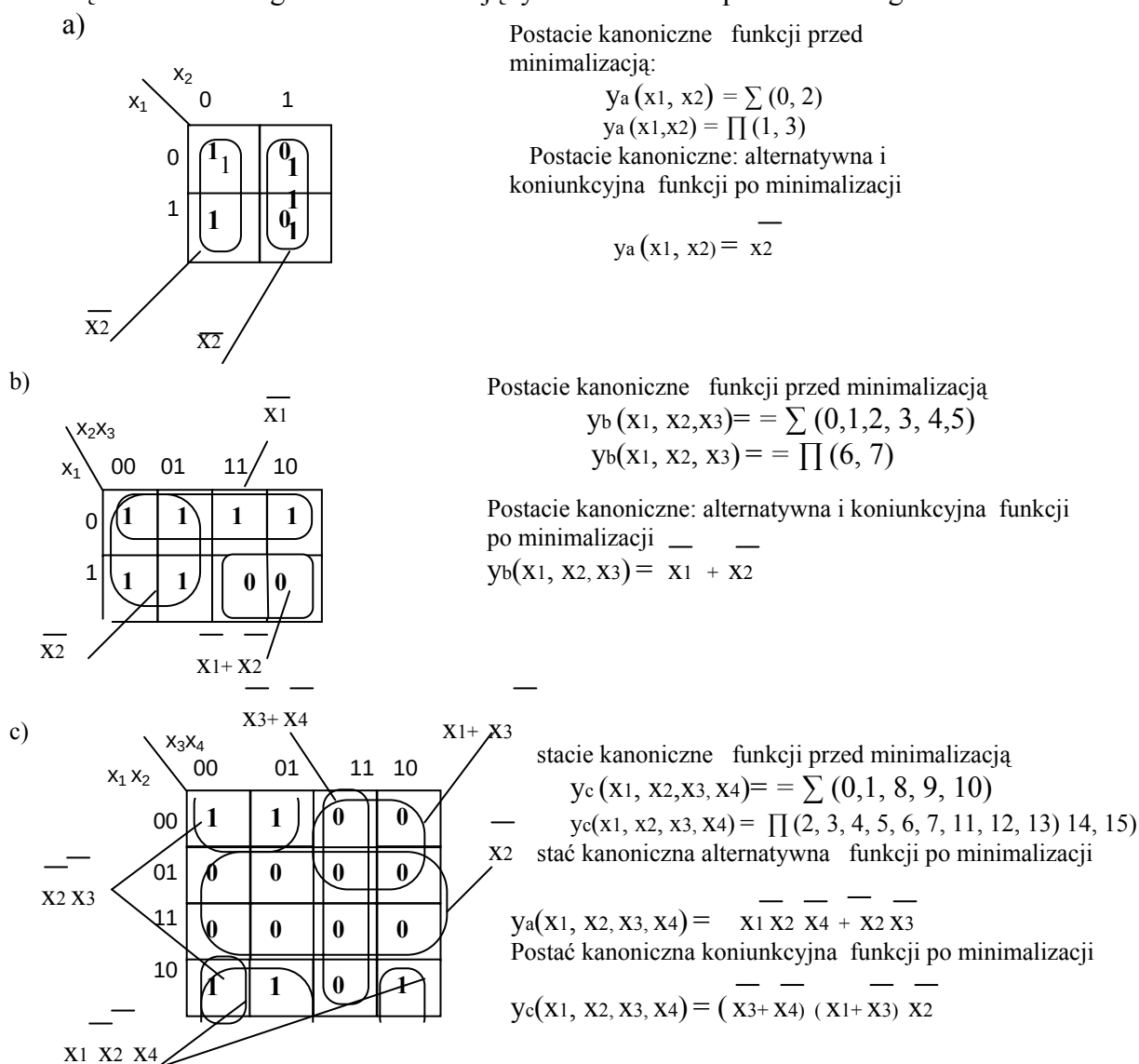
$$(A + x)(A + \overline{x}) = A,$$

gdzie:

x – zmienna, A – zmienna lub funkcja logiczna.

Tablice Karnaugh są tak zbudowane, że wyrażenia sąsiednie różnią się negacją jednej zmiennej. W zależności od ilości zmiennych, tablice zawierają odpowiednio dla 2, 3, n zmiennych mają $2^2, 2^3, 2^n$ pól. Im więcej pól, tym bardziej zminimalizowany zapis funkcji można otrzymać. Wartości funkcji (0 lub 1) wpisywane są w pola dla stanów argumentów podanych na obrzeżu tablicy. Jeżeli dla jakiegoś stanu wejść, funkcja nie ma określonej wartości, wówczas w odpowiednie pole wpisujemy poziomą kreskę i przy sklejaniu możemy przyjąć wartość 0 lub 1. Na rysunku 4.69 pokazano przykłady tworzenia zminimalizowanych postaci funkcji. Sąsiednie pola zawierające jedynki (zera) łączy się (skleja) w większe bloki, dwu, cztero, ośmiopolowe.

Po sklejeniu znikają wszystkie zmienne wejściowe, których wartości zmieniają się wewnątrz zaznaczonego bloku. Pozostają tylko wartości wspólne dla całego bloku.



Rys. 4.69. Minimalizacja funkcji metodą tablice Karnaugh: a) dwóch zmiennych, b) trzech zmiennych, c) czterech zmiennych

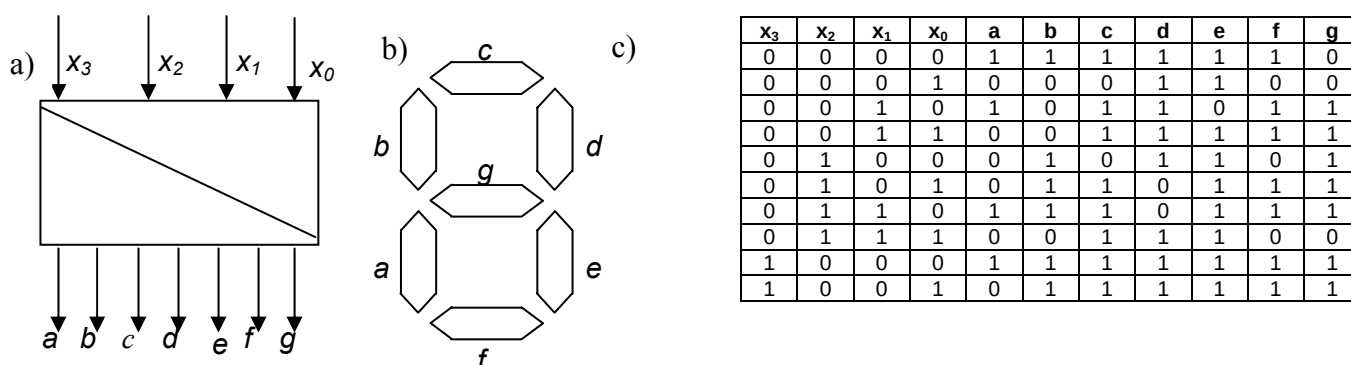
Układ komutacyjny jest to układ kombinacyjny umożliwiający przełączania sygnałów cyfrowych. Podstawowe rodzaje bloków funkcjonalnych (komutacyjnych):

- 1) koder, transkoder,
- 2) dekodek,
- 3) multiplexer,
- 4) demultiplexer.

Koder jest to układ realizujący proces zamiany informacji kodowanej w kodzie 1 z n na kod wewnętrzny urządzenia.

Transkoder zamienia jeden kod wewnętrzny na inny, z których żaden nie jest kodem 1 z n.

Konwerter kodu (transkoder) realizuje proces zamiany kodów. Rys. 4.70 przedstawia konwerter kodu dwójkowego prostego na siedmiobitowy kod sterujący diodami świecącymi wyświetlacza siedmiosegmentowego.



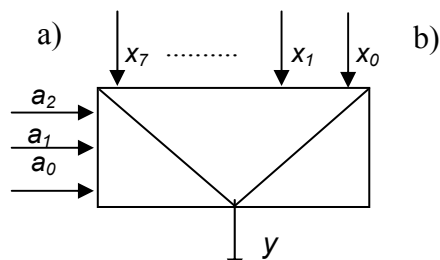
x_3, x_2, x_1, x_0 – sygnały wejściowe (stan wejść)

a, b, c, d, e, f, g – sygnały wyjściowe (stan wyjść)

Rys. 4.70. Konwerter kodu dwójkowego na sygnał sterujący wyświetlaczem: a) symbol graficzny, b) wyświetlacz, c) tablica wartości funkcji [14]

Dekoder jest to układ realizujący działanie odwrotne do kodera. Dekoder zamienia jeden kod (inny niż 1 z n) na kod 1 z n.

Multiplexer jest układem, który pozwala na wybranie jednego z kilku sygnałów wejściowych i przekazanie go na pojedyncze wyjście Y (rys. 4.71). Przekazywany sygnał wybieramy jest sygnałem sterującym (adresem a_0, a_1, a_2).



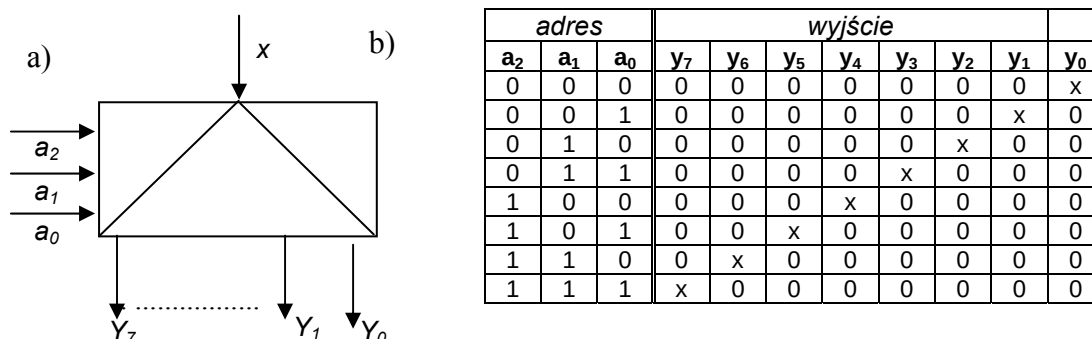
Rys. 4.71. Multiplexer ośmiobitowy:

a) symbol graficzny, b) tablica wartości adresów [14]

a_2	a_1	a_0	y
0	0	0	x_0
0	0	1	x_1
0	1	0	x_2
0	1	1	x_3
1	0	0	x_4
1	0	1	x_5
1	1	0	x_6
1	1	1	x_7

Demultiplekser spełnia odwrotną funkcję niż multiplekser. Demultiplekser umożliwia przesłanie do jednego z wyjść sygnału doprowadzonego do wejścia.

Bit wyjścia wybierany jest sygnałem adresowym. Pozostałe wyjścia pozostają w stanie L lub H w zależności od konkretnego typu demultipleksa. Przykład demultipleksa 8 bitowego pokazano na rys. 4.72.



Rys. 4.72. Demultiplekser ośmiobitowy: a) symbol graficzny, b) tablica wartości adresów

Układy arytmetyczne – układy umożliwiające realizację podstawowych działań arytmetycznych, takich jak: dodawanie, odejmowanie, mnożenie i dzielenie.

Dokonując operacji arytmetycznych należy założyć określoną i jednakową dla wszystkich liczb długość ich reprezentacji binarnej.

Dodawanie liczb dwójkowych przeprowadza się, podobnie jak w przypadku liczb dziesiętnych, stosując „przeniesienie”.

Przykład:

Należy dodać dwie liczby dwójkowe $1010011_2 = 83_{10}$ i $10001_2 = 17_{10}$

```

1010011
 10001
-----
1000010 – pierwsza suma częściowa
 1 1 – przeniesienie z pierwszego półsumowania
1100000 – druga suma częściowa
 1 – przeniesienie z drugiego półsumowania
-----
1100100 – wynik

```

Odejmowanie liczb dwójkowych – można zastąpić dodawaniem, jeżeli odjemnik zastąpimy uzupełnieniem do dwóch, w skrócie oznaczane zapisem U_2 . Więcej informacji na temat odejmowania można znaleźć w pozycji 5 spisu literatury.

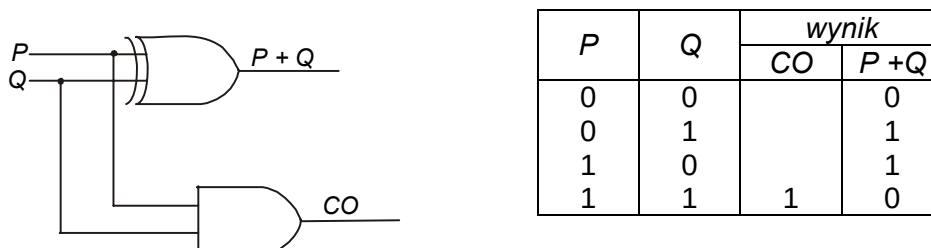
Mnożenie liczb dwójkowych można zrealizować poprzez:

- 1) wielokrotne dodawanie,
- 2) zastosowanie metody z arytmetyki dziesiętnej mnożenia przez poszczególne cyfry mnożnika, a następnie dodawanie.

Dzielenie liczb dwójkowych można realizować przez wielokrotne odejmowanie.

Arytmetyczne bloki funkcjonalne

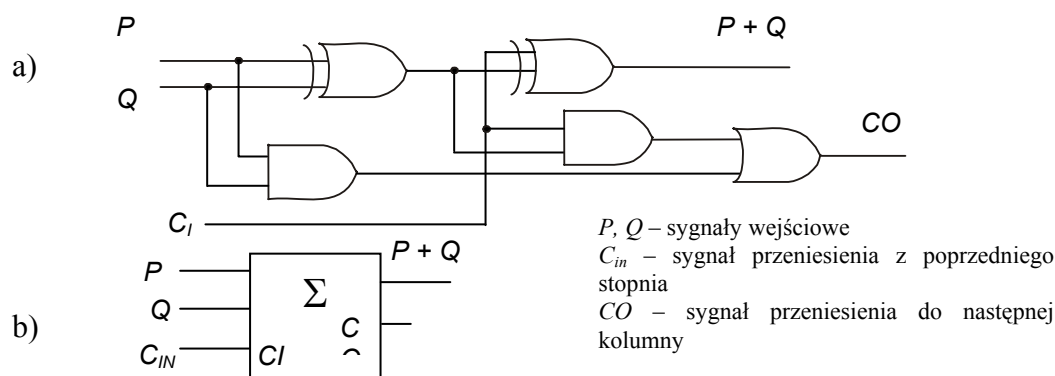
Realizację półsumatora i realizowaną przez niego funkcję przedstawiono na rys. 4.73, P , Q – sygnały wejściowe.



Rys. 4.73. Realizacja półsumatora za pomocą bramek EX-OR i AND [15]

CO – sygnał przeniesienia.

Łącząc dwa półsumatory otrzymujemy pełny sumator przedstawiony na rys. 4.74.



Rys. 4.74. Pełny sumator: a) układ logiczny, b) symbol ogólny [15]

4.5.2. Pytania sprawdzające

Opowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonywania ćwiczeń.

1. Co to jest system binarny?
2. Na czym polega konwersja dziesiętno-dwójkowa?
3. Na czym polega konwersja dwójkowo-dziesiętna?
4. Co to jest system ósemkowy?
5. Jak brzmią prawa de' Morgana?
6. Co to jest funktor?
7. Jakie wartości napięć odpowiadają „0”, a jakie „1” w układach TTL?
8. W jaki sposób zrealizujesz sumę na elementach stykowych?
9. W jaki sposób zrealizujesz iloczyn na elementach stykowych?
10. W jaki sposób tworzy się kanoniczne postacie funkcji?
11. Które wyrażenia w tablicy Karnaugh można ze sobą sklejać?
12. Co to jest układ komutacyjny?
13. Jaką funkcję pełni koder?
14. Jaką funkcję pełni dekodek?
15. Jaką funkcję pełni multiplexer?
16. Jaką funkcję pełni demultiplexer?
17. Jaka jest zasada działania półsumatora?
18. Jaka jest zasada działania sumatora?

4.5.3. Ćwiczenia

Ćwiczenia rachunkowe 1, 2, 3 wykonuj zgodnie z poleceniami w treści zadania, korzystaj z informacji zamieszczonych w Poradniku dla ucznia i ze wskazówek nauczyciela.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- pozycja 5 spisu literatury .

Ćwiczenie 1

Wykonaj konwersję dziesiętno-dwójkową liczb:

- a) 52 b) 124

Ćwiczenie 2

Wykonaj konwersję dwójkowo-dziesiętną liczb:

- a) 1101 b) 10101 c) 1010111

Ćwiczenie 3

Liczbę daną w systemie dziesiętnym zapisz w różnych kodach BCD:

- a) 74_{10} b) 29_{10}

Ćwiczenie 4

Zaprojektuj układ zbudowany na elementach AND, OR, NOT, NAND I NOR realizujący funkcje:

$$y = \overline{x_1} + \overline{x_2} \cdot \overline{x_3}, \quad y = \overline{x_1} \cdot x_2 + x_3, \quad y = \overline{x_1} \cdot (x_2 + \overline{x_3})$$

$$y = \overline{x_1} + x_2, \quad y = x_1 \cdot x_2$$

Sporządź tablice prawdy funkcji.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) narysować schematy układów stosując odpowiednie funktory, przed rysowaniem układów na bramkach NOR i NAND dostosować zapisy funkcji, korzystając z odpowiednich praw de Morgana,
- 2) sporządzić tablicę prawdy,
- 3) połączyć układ zgodnie ze schematem,
- 4) sprawdzić działanie układu ze sporządzoną tablicą prawdy,
- 5) skorygować ewentualne błędy.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko laboratoryjne z elementami AND, OR, NOT, NOR, NAND,
- próbnik stanów logicznych,
- literatura.

Ćwiczenie 5

Narysuj schematy układów na elementach przekaźnikowych realizujących funkcje z ćwiczenia 4. Sprawdź działanie układów.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) narysować schematy układów,
- 2) sporządzić tablicę prawdy,
- 3) połączyć układy zgodnie ze schematami,
- 4) sprawdzić działanie układów ze sporządzonymi tablicami prawdy,
- 5) skoryguj ewentualne błędy.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko laboratoryjne do modelowania funkcji na przekaźnikach,
- literatura.

Ćwiczenie 6

Zminimalizuj funkcje metodą tablic Karnaugh'a:

- a) $y(x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum (0, 2, 3, 5, 6, 7, 11, 13)$,
- b) $y(x_1, x_2, x_3, x_4) = \prod (0, 4, 7, 8, 12, 15)$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) narysować tablice czterech zmiennych,
- 2) wpisać 1 w odpowiednie pola tablicy zgodnie z funkcją a, lub 0 zgodnie z funkcją b,
- 3) skleić odpowiednie, sąsiednie pola,
- 4) zapisać funkcję po zminimalizowaniu.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- Poradnik dla ucznia,
- literatura.

Ćwiczenie 7

Sprawdź działanie układów realizujących zminimalizowane w ćwiczeniu 6 funkcje.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) przekształcić zapis zminimalizowanych funkcji do postaci umożliwiającej jej realizację na funktorach wskazanych przez prowadzącego,
- 2) narysować schematy układów realizujących zminimalizowane funkcje,
- 3) połączyć układy zgodnie ze schematami na stanowisku laboratoryjnym,
- 4) sprawdzić zgodność działania zminimalizowanych funkcji z funkcjami przed zminimalizowaniem,
- 5) usunąć błędy w przypadku braku zgodności.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko laboratoryjne do modelowania układów realizujących funkcje logiczne,
- próbnik stanów logicznych.

Ćwiczenie 8

Zaprojektuj i sprawdź działanie układu kombinacyjnego (dekodera) służącego do konwersji dwubitowego kodu dwójkowego na kod 1 z 4. Do budowy układu wykorzystaj bramki NAND.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) sporządzić tablicę wartości funkcji dekodera, przyjmując sygnały wejściowe: x_1, x_2 , sygnały wyjściowe y_0, y_1, y_2, y_3 ,
- 2) zapisać kanoniczne postacie alternatywne funkcji wyjściowych,
- 3) przekształcić zależności opisujące funkcje wyjściowe do postaci umożliwiających realizację na elementach NAND,
- 4) narysować schemat układu dekodera z zastosowaniem elementów NAND,
- 5) połączyć zaprojektowany układ na stanowisku do modelowania funkcji NAND,

6) sprawdzić poprawność działania dekodera.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko do modelowania układów zbudowanych na elementach NAND,
- próbnik stanów logicznych,
- literatura..

Ćwiczenie 9*

Zaprojektuj układ kombinacyjny $y(a, b, c) = \sum (1, 2, 4, 5, 7)$. Zastosuj multiplekser o 3 wejściach adresowych. Sprawdź działanie zaprojektowanego układu.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) napisać tabelę działania multipleksa,
- 2) narysować schemat logiczny układu,
- 3) połączyć zaprojektowany układ na stanowisku do testowania układów komutacyjnych,
- 4) sprawdzić działanie układu.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko laboratoryjne do testowania układów komutacyjnych,
- multiplekser o 3 wejściach adresowych,
- próbnik stanów logicznych,
- karty katalogowe.

Ćwiczenie 10*

Zaprojektuj i sprawdź działanie układu kombinacyjnego czterowyjściowego opisanego funkcjami:

$$y_1 = f_1(c, b, a) = \sum (2, 4, 6)$$

$$y_3 = f_3(c, b, a) = \sum (3, 4, 5)$$

$$y_4 = f_4(c, b, a) = \sum (2, 7)$$

$$y_2 = f_2(c, b, a) = \sum (1, 3, 7)$$

Zastosuj demultiplekser o trzech wejściach adresowych.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) napisać tabelę działania demultipleksa o trzech wejściach adresowych,
- 2) narysować symbol graficzny demultipleksa,
- 3) zastosować na wyjściu demultipleksa elementy logiczne OR w celu uzyskania funkcji y_1 , y_2 , y_3 , y_4 ,
- 4) narysować schemat logiczny układu,
- 5) połączyć zaprojektowany układ na stanowisku do testowania układów komutacyjnych,
- 6) sprawdzić poprawność działania układu.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- demultiplekser o trzech wejściach adresowych, funktory logiczne,
- stanowisko do testowania układów komutacyjnych,
- próbnik stanów logicznych,
- karty katalogowe.

Ćwiczenie 11

Sprawdź działanie półsumatora oraz sumatora logicznego.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) narysować schemat logiczny półsumatora zbudowanego przy pomocy bramek EX-OR i AND,
- 2) połączyć bramki na stanowisku laboratoryjnym zgodnie ze schematem,
- 3) sprawdzić działanie układu,
- 4) porównać otrzymane przebiegi z teoretycznymi,
- 5) zapisać wnioski,
- 6) wykonać czynności od 1 do 5 dla sumatora zbudowanego z bramek EX-OR, AND i OR.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- stanowisko laboratoryjne do modelowania układów na elementach EX-OR, AND i OR,
- próbnik stanów logicznych,
- literatura, katalogi.

4.5.4 Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) wykonać konwersję dziesiętno-dwójkową?	☐	☐
2) wykonać konwersję dwójkowo-dziesiętną?	☐	☐
3) zapisać liczbę w różnych kodach BCD?	☐	☐
4) zaprojektować i połączyć prosty układ kombinacyjny na elementach:		
a) OR, AND, NOT,	☐	☐
b) NAND,	☐	☐
c) NOR,	☐	☐
d) przełącznikach?	☐	☐
5) zapisać postać kanoniczną alternatywną funkcji?	☐	☐
6) zapisać postać kanoniczną koniunkcyjną funkcji?	☐	☐
7) zminimalizować funkcję przy pomocy tablic Karnaugh'a?	☐	☐
8) zaprojektować prosty dekodery?	☐	☐
9) zaprojektować układ kombinacyjny z wykorzystaniem multipleksa?	☐	☐
10) zaprojektować układ kombinacyjny z wykorzystaniem demultipleksa?	☐	☐
11) wyjaśnić zasadę działania sumatora?	☐	☐

4.6. Układy sekwencyjne

4.6.1. Materiał nauczania

W układzie sekwencyjnym wartości sygnałów wyjściowych (stan wyjść) zależą nie tylko od bieżących wartości sygnałów wejściowych, ale również od poprzednich stanów wejściowych.

Przerzutnik jest to najprostszy układ sekwencyjny.

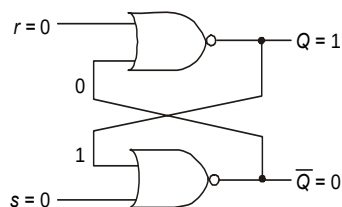
Podział przerzutników:

- asynchroniczne – stosowane w asynchronicznych układach pamięci,
- synchroniczne – stosowane w synchronicznych układach pamięci.

Przerzutniki asynchroniczne

Przerzutnik **rs** zbudowany jest z dwóch bramek NOR (rys. 4.75).

a)



b)

s	r	Q
0	0	Q^{t-1}
1	0	1
0	1	0
1	1	zabroniony

s (set) – wejście wpisujące,

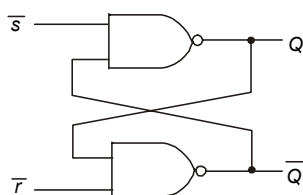
r (reset) – wejście zerujące,

Q^{t-1} – stan poprzedni

Rys. 4.75. Przerzutnik rs: a) schemat logiczny, b) tablica wartości [5]

Przerzutnik $\bar{r}\bar{s}$ jest zbudowany z dwóch bramek NAND (rys. 4.76).

a)



b)

s	r	Q
$\bar{0}$	$\bar{0}$	Q^{t-1}
1	0	1
0	1	0
1	1	zabroniony

r (reset) – wejście zerujące,

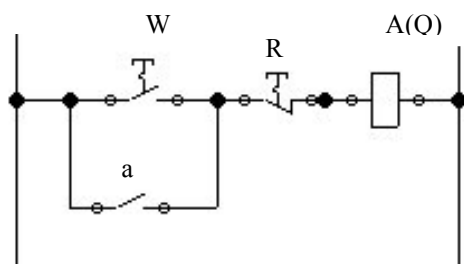
s (set) – wejście wpisujące,

Q^{t-1} – stan poprzedni

Rys. 4.76. Przerzutnik $\bar{r}\bar{s}$: a) schemat logiczny, b) tablica wartości

Realizację przekaźnikowych układów pamięci pokazano na rysunkach 4.77 i 4.78.

a)

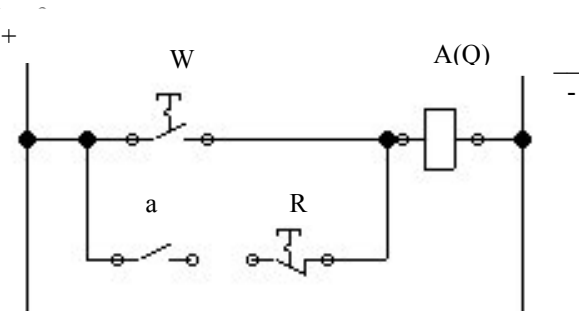


b)

W	R	Q
0	0	Q^{t-1}
1	0	1
0	1	0
1	1	0

Rys. 4.77. Przekaźnikowy układ pamięci z priorytetem zerowania: W – sygnał wpisujący, R – sygnał zerujący:
a) schemat układu, b) tablica wartości

a)



b)

W	R	Q
0	0	Q^{t-1}
1	0	1
0	1	0
1	1	1

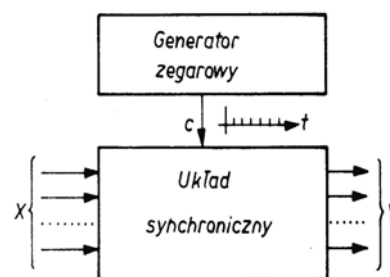
Rys. 4.78. Przekaźnikowy układ pamięci z priorytetem wpisu: a) schemat układu,
b) tablica wartości

Przerzutniki synchroniczne

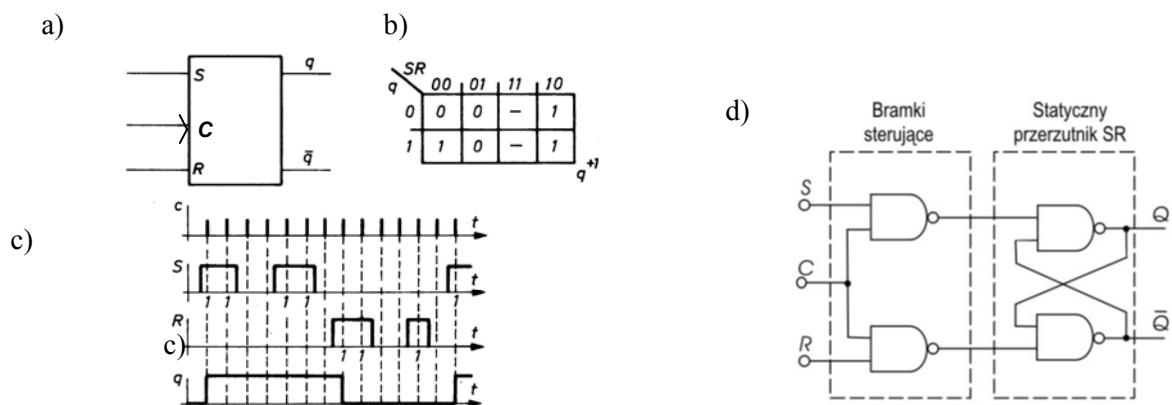
Przerzutniki synchroniczne w porównaniu z przerzutnikami asynchronicznymi mają dodatkowe wejście C , do którego doprowadzony jest sygnał synchronizujący (zegarowy) rys. 4.79.

Synchronizacja zwiększa odporność układu na zakłócenie, umożliwia prostsze przesyłanie sygnałów wielobitowych oraz eliminuje możliwość powstania błędów w stanach przejściowych.

Przerzutniki wyzwalane są poziomem lub zboczem sygnału zegarowego (taktującego). Wyzwalanie poziomem polega na tym, że sygnał z wejść informacyjnych może oddziaływać na stan przerzutnika tylko wtedy, gdy sygnał zegarowy ma poziom wysoki H lub niski L . Wyzwalanie zboczem polega na oddziaływanie na stan przerzutnika tylko, w czasie narastania lub opadania sygnału taktującego. Na symbolach graficznych przerzutniki działające na zbocze przednie (narastające) oznacza się rysując trójkąt na wejściu zegarowym, działające na zbocze tylne (opadające) – kółko i trójkąt, lub zaczerniony trójkąt. Symbole przerzutników wyzwalanych poziomem są rysowane bez trójkąta. Jeżeli przerzutnik wyzwalany jest poziomem niskim na wejściu przerzutnika jest rysowane kółeczko. Schemat działania przerzutnik SR pokazano na rys. 4.80.



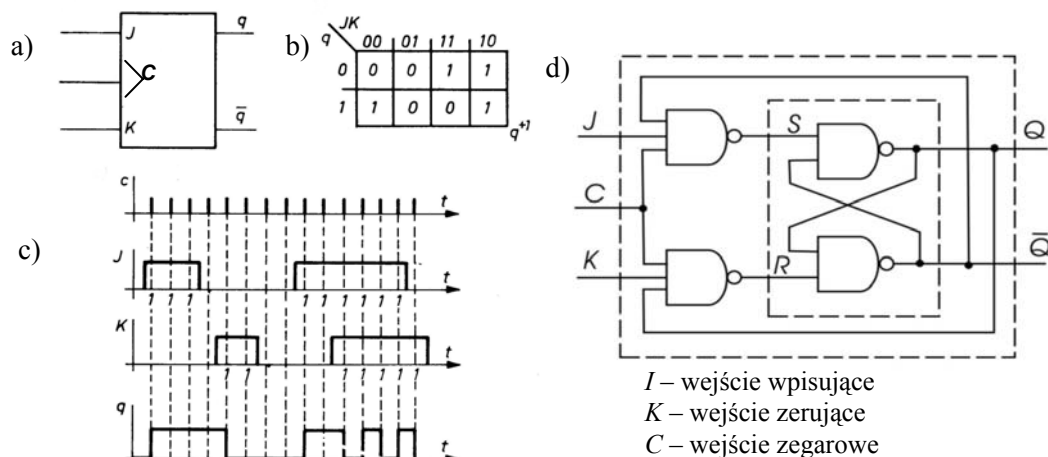
Rys. 4.79. Doprowadzenie sygnału synchronizującego [14]



Rys. 4.80. Przerzutnik SR: a) symbol graficzny, b) tablice przejść, c) przykładowy wykres zmian stanu przerzutnika [14], d) realizacja przerzutnika na bramkach NAND

Przerzutnik JK pokazano na rys. 4.81.

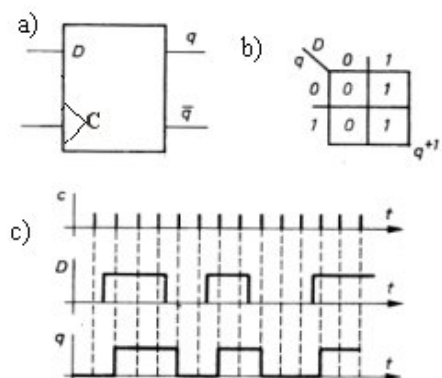
Przerzutnik JK przy stanie wejść $J=1$, $K=1$ zmienia swój stan na przeciwny po każdym impulsie zegara.



Rys. 4.81. Przerzutnik JK: a) symbol graficzny, b) tablice przejść, c) przykładowy wykres zmian stanu przerzutnika [14], d) realizacja na bramkach NAND

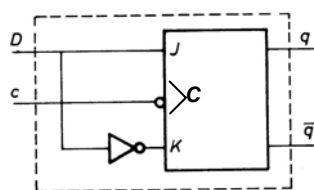
Przerzutnik D ma jedno wejście informacyjne oznaczone literą D i wejście zegarowe C rys. 4.82.

Przerzutnik D zwany jest również elementem opóźniającym, ponieważ sygnał wyjściowy odtwarza przebieg sygnału wejściowego zsynchronizowany z sygnałem taktującym.



Rys. 4.82. Przerzutnik D: a) symbol graficzny, b) tablica przejść, c) wykres zmiany stanu przerzutnika [14]

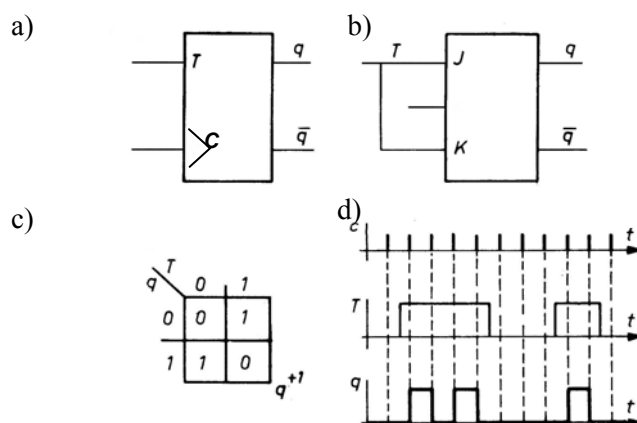
Przerzutnik D można utworzyć z przerzutnika JK łącząc układ wg schematu (rys. 4.83).



Rys. 4.83. Przerzutnik D utworzony z przerzutnika JK i elementu negacji [14]

Przerzutnik T

Symbol graficzny i działanie przerzutnika pokazano na rysunku 4.84.



Rys. 4.84. Przerzutnik T: a) symbol graficzny, b) przerzutnik T utworzony z przerzutnika JK, c) tablica przejść, d) wykres zmian stanu przerzutnika T [14]

Przerzutniki są podstawowymi elementami do budowy liczników, rejestrów, pamięci.

Licznik jest to układ służący do zliczania i pamiętania liczby impulsów wejściowych.

Klasyfikacja liczników ze względu na sposób zliczania:

- licznik dodający (zliczający w przód) – po każdym impulsie wejściowym zwiększa się zawartość licznika o jeden,
- licznik odejmujący (zliczający w tył) – po każdym impulsie wejściowym zmniejsza się zawartość licznika o jeden,
- licznik rewersyjny (dwukierunkowy) – realizuje dodawanie i odejmowanie impulsów.

Klasyfikacja liczników ze względu na doprowadzenie sygnału zegarowego:

- licznik asynchroniczny (szeregowy) – sygnał zegarowy (impulsy zliczane) doprowadzany jest tylko do pierwszego przerzutnika. Do wejścia zegarowego następnego przerzutnika doprowadzone jest wyjście poprzedniego przerzutnika. Zmianę stanu Q następnego przerzutnika powoduje przerzutnik poprzedni. Nie wszystkie przerzutniki działają synchronicznie ze zliczanym impulsem – stąd nazwa przerzutniki asynchroniczne.

- licznik synchroniczny (równoległy) – sygnał zegarowy (impulsy zliczane) jest doprowadzony jednocześnie do wejść synchronizujących wszystkich przerzutników.

Klasyfikacja liczników ze względu na sposób przechodzenia przez zliczane stany:

- licznik modulo N (mod N) – przechodzi przez wszystkie stany cykliczne,
- licznik do N – licznik przechodzi przez wszystkie stany jednokrotnie. Ponowne użycie licznika wymaga wyzerowania licznika.

Określenie mod N oznacza dzielenie przez N . Gdy na wejściu licznika mod N zostanie podanych M impulsów to na wyjściu licznika (na wyjściu ostatniego przerzutnika) pojawi się

liczba całkowita impulsów wynikająca z dzielenia $\frac{M}{N}$.

Liczniki budowane są z przerzutników synchronicznych. Sygnał zegarowy będący dla licznika przebiegiem impulsów zliczanych podawany jest na wejście zliczające. Wyjściem licznika jest wyjście użytego przerzutnika.

Długość licznika – liczba wyjść licznika równa jest liczbie przerzutników.

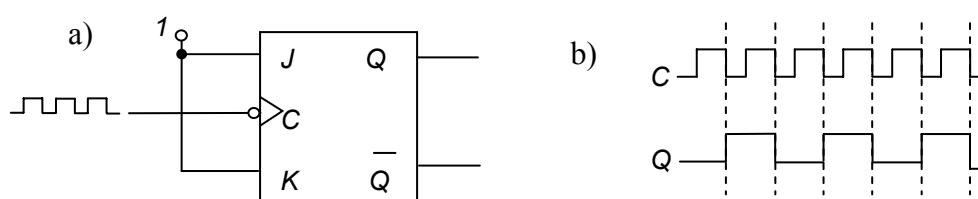
Stan licznika – określona kombinacja stanów przerzutników.

Pojemność licznika N – określa maksymalna liczba stanów licznika. Licznik zbudowany z dwóch przerzutników ma:

$$\begin{aligned} N &= 2^2 = 4 \text{ stany} & \text{gdzie: } n &= \text{liczba przerzutników} \\ \text{z czterech} \quad N &= 2^4 = 16 \text{ stanów} \\ \text{ogólne} \quad N &= 2^n \end{aligned}$$

Liczniki asynchroniczne

Licznik mod 2 (dwójka licząca) zbudowany z przerzutnika JK przedstawiono na rys. 4.85.

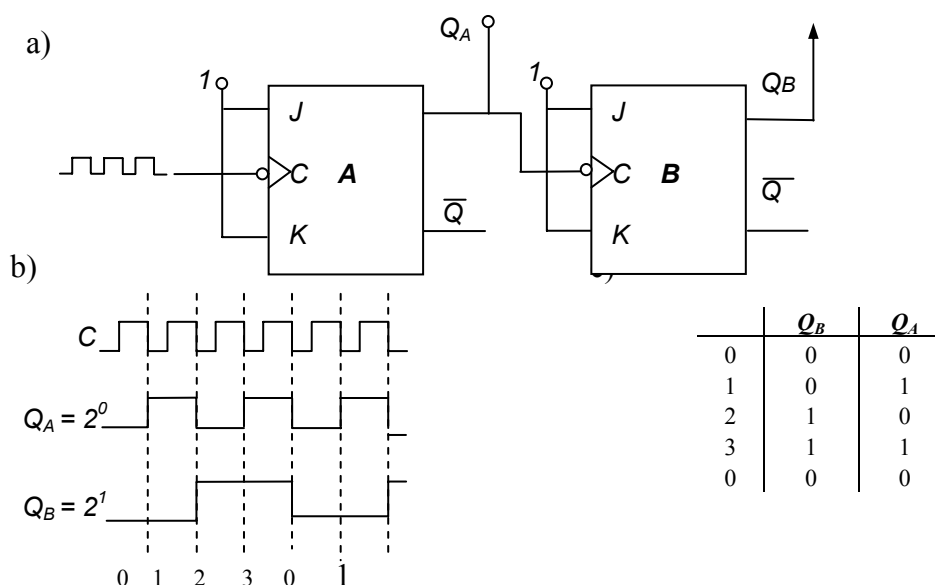


Rys. 4.85. Licznik modulo 2: a) schemat logiczny, b) przebiegi czasowe na wejściu C i wyjściu Q [5]

Oba wejścia licznika J i K ustawione są w stan wysoki. Częstotliwość sygnału Q jest dwukrotnie mniejsza niż częstotliwość sygnału C .

Łączenie liczników

Zmianę pojemności licznika można uzyskać poprzez łączenie liczników szeregowo, równolegle oraz wprowadzając do licznika sprzężenia zwrotne. Licznik mod 4 z szeregowego połączenia dwóch dwójek liczących przedstawiono na rysunku 4.86.

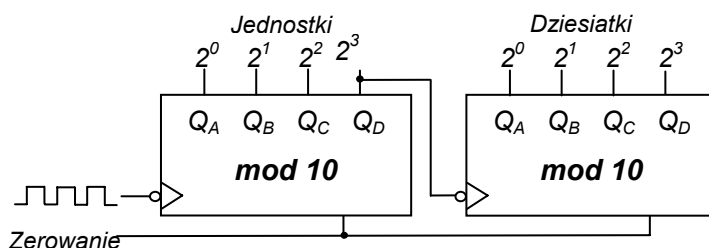


Rys. 4.86. Licznik mod 4: a) schemat logiczny, b) przebiegi czasowe, c) tablice stanów [5]

Podłączenie wyjścia Q_A do wejścia C_B pozwala uzyskać licznik czterostopniowy.

Częstotliwość sygnału Q_B w porównaniu z C jest czterokrotnie mniejsza. Jeżeli sygnałami wyjściowymi będą Q_A i Q_B , to uzyskamy zakodowane liczby od 0 do 3. Po liczbie 3 układ zaczyna cykl od początku.

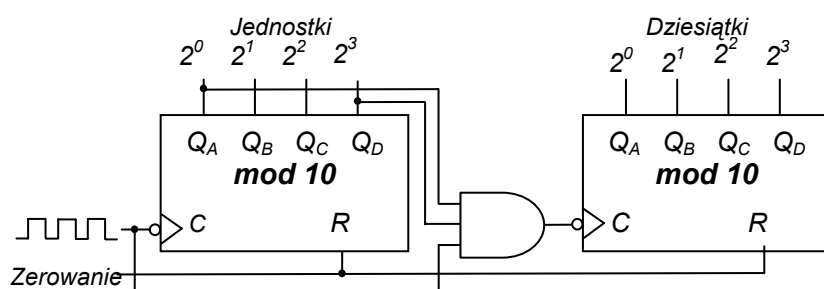
Licznik modulo 100 można zbudować z dwóch liczników modulo 10 połączonych szeregowo (rys. 4.87).



Rys. 4.87. Licznik modulo 100 zbudowany z dwóch modulo 10 połączonych szeregowo [5]

Sygnał zliczony doprowadzony jest do wejścia C pierwszego licznika. Wejście zegarowe drugiego licznika połączone jest z wyjściem pierwszego licznika Q_D o najwyższej wadze.

Licznik mod 100 można zbudować również z dwóch liczników mod 10 połączonych równolegle (rys. 4.88).



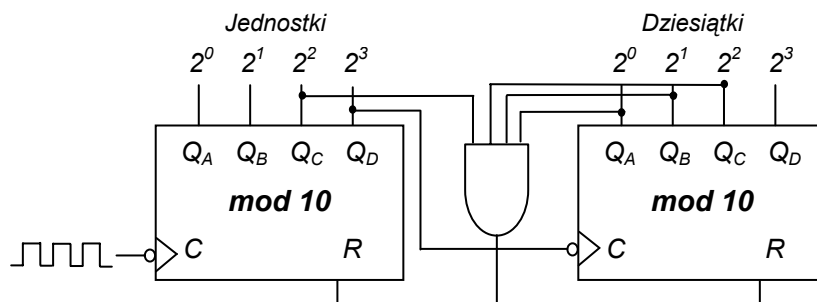
Rys. 4.88. Licznik modulo 100 zbudowany z dwóch liczników modulo 10 połączonych równolegle [5]

W połączeniu równoległym po zliczeniu do 9 (stan pierwszego licznika 1001) zostaje uruchomione zliczanie pierwszej dziesiątki przez drugi licznik. Zliczanie to uruchamia 1 na wejściu C licznika drugiego zrealizowana przez element *AND*. Licznik drugi zliczy tylko jeden impuls i ponieważ licznik pierwszy zostanie ustawiony w stan 0000, bramka *AND* zablokuje licznik 2, aż do ponownego pojawienia się na wyjściu z licznika pierwszego stanu 1001, wówczas zostanie przez licznik drugi zliczona następna dziesiątka.

Pojemność łączonych liczników równa się iloczynowi pojemności poszczególnych liczników.

Jeżeli zachodzi potrzeba zbudowania licznika o innej pojemności (różnej od iloczynu użytych liczników), wówczas stosuje się odpowiednie sprzężenie. Na rys. 4.89 pokazano realizację licznika modulo 74, gdy dysponujemy dwoma licznikami modulo 10. Licznik po zliczeniu do 73 należy wyzerować.

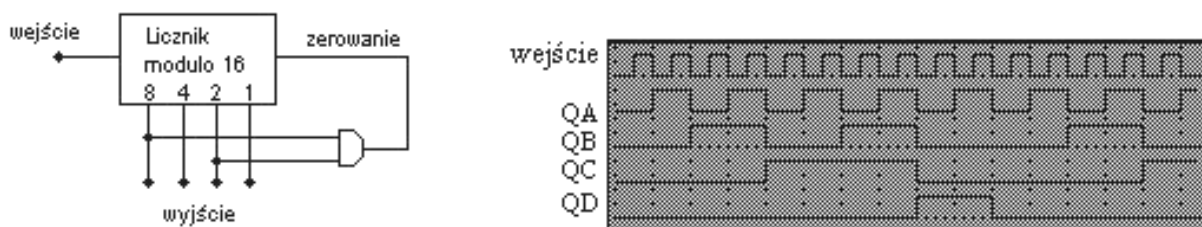
Wyjścia licznika, które mają wartość 1 w chwili wystąpienia liczby 74 poprzez bramkę *AND* łączymy z wejściami zerującymi liczników ($74_{10} = 01110100_{2/10}$).



Rys. 4.89. Licznik modulo 74

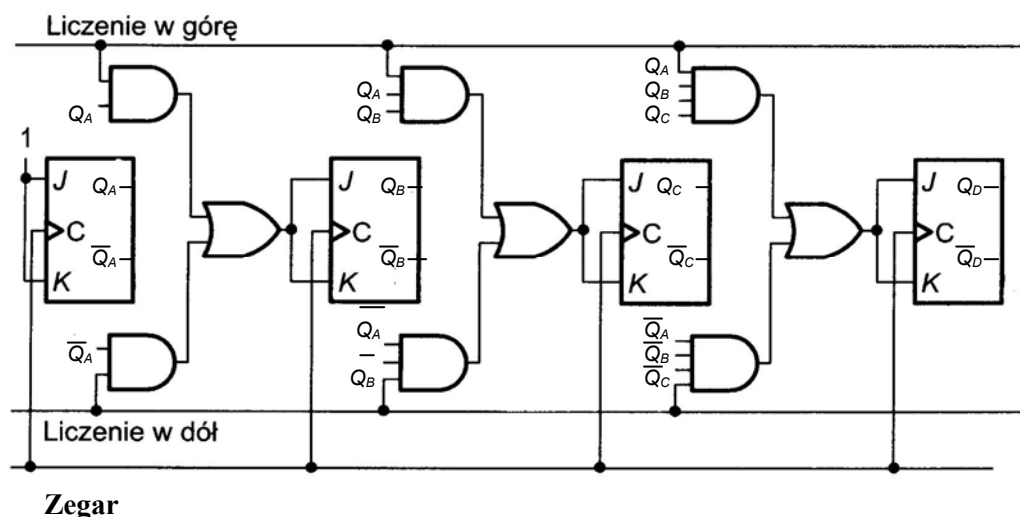
Jeżeli licznik zerowany byłby niskim poziomem, zamiast bramki AND, należałoby użyć bramki NAND. Wadą takich układów jest możliwość pojawienia się krótkotrwałego impulsu z wyjścia Q_C licznika jednostek, który może spowodować niewłaściwe działanie układu.

Popularnym licznikiem jest licznik modulo 10, który można utworzyć z licznika modulo 16 przez wprowadzenie odpowiednich sprzężeń (rys. 4.90).



Rys. 4.90. Przekształcenia licznika modulo 16 w licznik modulo 10

Licznik dwójkowy liczący wstecz ma następujące sekwencje 111, 110, 101, 011, 001, 000, 111. Licznik dwójkowy liczący wstecz można otrzymać z licznika dwójkowego wprzód biorąc stany wyjściu $\bar{Q}$. Na rys. 4.91 przedstawiono schemat rewersyjnego licznika dwójkowego.



Rys. 4.91. Rewersyjny licznik dwójkowy [16]

Liczenie w przód lub w tył realizuje dwójkowy sygnał sterujący, dla 0 zliczanie w przód dla 1 w tył. Sygnał sterujący powoduje, że Q , albo $\bar{Q}$ jest dołączana do wejść następnych przerzutników.

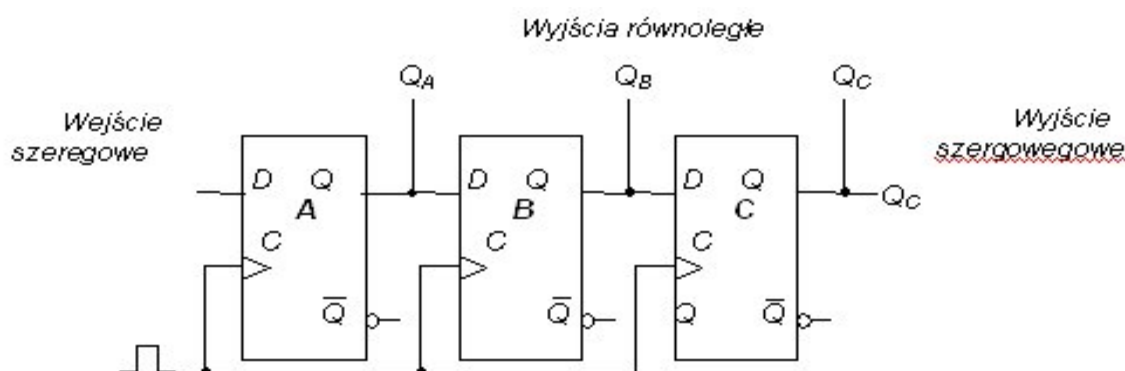
Rejestr jest to układ przechowujący informację, zbudowany z przerzutników. Przerzutnik może zapamiętać jedną cyfrę dwójkową (bit). Jeżeli chcemy przechować informację zawierającą n bitów, należy użyć n przerzutników.

Długość rejestru – liczba bitów informacji, jaka może być przechowana w rejestrze, równa się liczbie zastosowanych przerzutników.

Ze względu na sposób wprowadzenia informacji i jej odczyt rejestry dzielą się na:

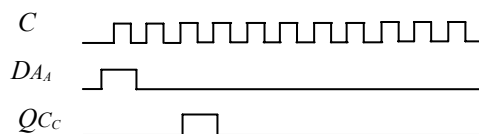
- szeregowo-szeregowy – wprowadzenie i odczyt informacji szeregowy,
- szeregowo-równoległy – wprowadzenie informacji szeregowo, odczyt równoległy,
- równoległo-szeregowy – wprowadzenie równoległe, odczyt szeregowy,
- równoległo-równoległy – wprowadzenie i odczyt równoległy.

Rejestry przesuwające są to takie rejestry, w których istnieje możliwość przesuwania zapisanej informacji. Na rys. 4.92 przedstawiono rejestr zbudowany z przerzutników D , oznaczonych odpowiednio, jako przerzutniki A , B , C .



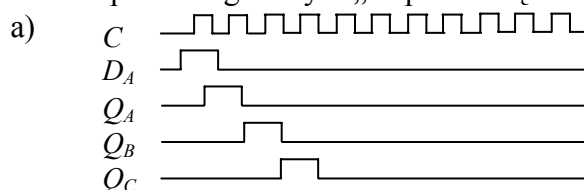
Rys. 4.92. Rejestr zbudowany z trzech przerzutników [5].

Jeżeli informacja będzie pobierana tylko z wyjścia Q_C , będzie to rejestr szeregowo-szeregowy (rys. 4.93). Jeżeli informacja będzie pobierana jednocześnie z wyjść Q_A , Q_B , Q_C – szeregowo-równoległy rys. 4.94.



Rys. 4.93. Przebiegi czasowe w rejestrze pracującym jako rejestr szeregowo-szeregowy [5].

Kolejne impulsy zegarowe przesyłają sygnał wejściowy „1” do kolejnych przerzutników. Po trzecim impulsie zegarowym „1” przesunięta zostanie do przerzutnika C , $Q_C = 1$.



b)

Q_C	Q_B	Q_A
0	0	1
0	1	0
1	0	0

Rys. 4.94. Rejestr szeregowo-równoległy a) przebiegi czasowe, b) wyjścia przerzutników [5].

Jeżeli połączymy wyjście Q_C z wejściem D_A , nastąpi cykliczne powtarzanie powyższych stanów wyjść. Układ taki może pracować jako licznik mod 3. Tego rodzaju liczniki nazywane są pierścieniowymi.

Rejestry przesuwające umożliwiają wykonywanie:

- dzielenia – przesunięcie wpisanej liczby o pozycję w prawo (dzielenie przez 2), np. w rejestrze 8-bitowym liczba $10_{10} = 00001010_2$ po przesunięciu w prawo, otrzymujemy $0000101_2 = 5_{10}$,
- mnożenie – przesunięcie w lewo, pomnożenie liczby przez dwa.

Pamięć

Pamięć jest to układ służący do przechowywania informacji.

Podział pamięci:

- 1) ulotne – pamięci RAM (SRAM, VideoRAM, DRAM),
- 2) nieulotne – pamięci ROM (ROM, PROM, EPROM, FlashROM).

Pamięci typu RAM (Random Access Memory) są pamięciami posiadającymi możliwość odczytu i zapisu. Zawartość takiej pamięci jest tracona po zaniku zasilania.

Pamięci statyczne SRAM (Static Random Access Memory) zbudowane są z przerzutników bistabilnych. Charakteryzują się dużą szybkością działania. Ze względu na wysoki koszt produkcji stosowane są w podzespołach. Nie są stosowane jako pamięci podstawowe komputera. Znalazły zastosowanie w układach buforujących, w nowoczesnym sprzęcie przenośnym.

Pamięć typu DRAM (dynamiczna) zbudowana jest najczęściej z kondensatorów. Komórki mają skłonność do samorzutnego rozładowywania się. Powoduje to konieczność odświeżania zawartości w określonych momentach czasu. Charakteryzuje się niskim poborem mocy.

Pamięci typu ROM (Read Only Memory) są pamięciami tylko do odczytu.

Pamięci ROM programowalne są:

- przez producenta w czasie cyklu produkcji (MROM),
- w sposób trwały przez użytkownika (PROM),
- poza systemem z możliwością wymazania i ponownego zapisania (EPROM).

Zawartość pamięci typu ROM jest utrzymywana po wyłączeniu zasilania.

4.6.2. Pytania sprawdzające

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

1. Co to jest układ sekwencyjny?
2. Jakie znasz przerzutniki asynchroniczne?
3. Jaka jest zasada działania przerzutnika RS?
4. Jaka jest zasada działania przekątnikowych układów pamięci?
5. Jaka jest podstawowa różnica między przerzutnikiem asynchronicznym, a synchronicznym?
6. Jaka jest zasada działania przerzutnika SR?
7. Jaka jest zasada działania przerzutnika JK?
8. Jaka jest zasada działania przerzutnika D?
9. Jaka jest zasada działania przerzutnika T?
10. Co to jest licznik asynchroniczny?
11. Co to jest licznik synchroniczny?
12. Jaka jest zasada działania licznika modulo 2 zbudowanego z przerzutnika JK?
13. Jaka jest zasada działania licznika modulo 4 zbudowanego z przerzutników JK?
14. W jaki sposób z dwóch liczników modulo 10 można uzyskać licznik modulo 74?
15. Jaka rolę pełni w układzie rejestr?

16. Z jakich elementów zbudowany jest rejestr?
17. W jaki sposób można uzyskać w rejestrze przesuwany dzielenie, a w jaki mnożenie?
18. Co oznaczają pojęcia RAM, ROM, SRAM?

4.6.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Sprawdź działanie przerzutników asynchronicznych zbudowanych z bramek NOR i NAND.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) narysować schemat logiczny przerzutnika RS,
- 2) połączyć bramki NOR na stanowisku laboratoryjnym zgodnie ze schematem,
- 3) sprawdzić działanie przerzutnika,
- 4) porównać otrzymane przebiegi z teoretycznymi,
- 5) zapisać wnioski,
- 6) wykonać czynności od 1 do 5 dla przerzutnika $\overline{R}\overline{S}$ zbudowanego z bramek NAND.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- stanowisko laboratoryjne do modelowania układów z elementów NOR i NAND,
- próbnik stanów logicznych,
- literatura, katalogi.

Ćwiczenie 2

Sprawdź działanie przekładnikowych układów pamięci.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) narysować schemat przekładnikowego układu pamięci z priorytetem włączania,
- 2) połączyć układ na stanowisku laboratoryjnym zgodnie ze schematem,
- 3) sprawdzić działanie układu,
- 4) zanotować wyniki w tabeli wartości,
- 5) porównać otrzymane przebiegi z teoretycznymi,
- 6) zapisać wnioski,
- 7) wykonać czynności od 1 do 5 dla przekładnikowego układu pamięci z priorytetem wpisu.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- stanowisko laboratoryjne do modelowania układów przekładnikowych,
- próbnik stanów logicznych,
- literatura, katalogi.

Ćwiczenie 3

Zbadaj działania przerzutników synchronicznych SR, JK, D, T.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) połączyć przerzutnik SR na stanowisku zgodnie ze schematami rys. 4.80 z Poradnika dla ucznia,
- 2) podłączyć odpowiednie sygnały wejściowe,
- 3) podłączyć wyjście Q do diody sygnalizacyjnej,
- 4) ustawić małą częstotliwość generatora zegarowego,
- 5) sprawdzić działanie przerzutnika,
- 6) zanotować wyniki,
- 7) porównać otrzymane wyniki z przebiegami teoretycznymi,
- 8) wykonać czynności od 1 do 7 kolejno dla przerzutników JK, D, T, korzystając z odpowiednich schematów zamieszczonych w Poradniku dla ucznia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko elektroniczne do badania przerzutników synchronicznych,
- funktry NAND,
- próbnik stanów logicznych,
- katalogi, literatura.

Ćwiczenie 4

Zbuduj i sprawdź działanie licznika modulo 2.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) połączyć przerzutnik JK tak, aby zbudować licznik modulo 2,
- 2) sprawdzić działanie licznika,
- 3) zanotować wyniki,
- 4) porównać otrzymane wyniki z przebiegami teoretycznymi.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko elektroniczne do badania przerzutników JK,
- próbnik stanów logicznych,
- katalogi, literatura.

Ćwiczenie 5

Zbuduj liczniki modulo 4 i modulo 16 oraz sprawdź ich działanie.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) narysować schematy licznika modulo 4 (zastosować przerzutniki JK),
- 2) sprawdzić działanie licznika,
- 3) zanotować wyniki,
- 4) porównać otrzymane wyniki z przebiegami teoretycznymi,
- 5) powtórzyć czynności od 1 do 4 dla licznika modulo 16.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko elektroniczne do badania przerzutników JK,

- próbnik stanów logicznych,
- katalogi, literatura.

Ćwiczenie 6

Zaprojektuj i sprawdź działania liczników: modulo 84 i modulo 68

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinienś:

- 1) narysować schemat licznika modulo 84 (zastosować liczniki mod 10),
- 2) sprawdzić działanie licznika,
- 3) zanotować wyniki,
- 4) porównać otrzymane wyniki z przebiegami teoretycznymi,
- 5) powtórzyć czynności od 1 do 4 dla licznika modulo 68.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko elektroniczne do badania przerzutników JK,
- próbnik stanów logicznych,
- katalogi, literatura.

Ćwiczenie 7

Zapoznaj się z budową i działaniem rejestru zbudowanego z przerzutników D .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinienś:

- 1) narysować schemat rejestru zbudowanego z trzech przerzutników D ,
- 2) zamodelować rejestr na stanowisku laboratoryjnym,
- 3) sprawdzić działanie rejestru pracującego jako:
 - a) rejestru szeregowy,
 - b) rejestru równoległego,
- 4) zanotować i zinterpretować trzymane wyniki.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko do modelowania przerzutników D ,
- próbnik stanów logicznych,
- katalogi, literatura.

Ćwiczenie 8*

Zbuduj i sprawdź działanie rejestru zbudowanego z przerzutników JK.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinienś:

- 1) narysować schemat 7-bitowego rejestru przesuwającego szeregowo-równoległego zbudowanego z przerzutników JK,
- 2) zamodelować rejestr na stanowisku laboratoryjnym,
- 3) sprawdzić działanie rejestru,
- 4) zanotować i zinterpretować otrzymane wyniki.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko do modelowania przerzutników JK,
- próbnik stanów logicznych,
- katalogi, literatura.

Uwaga: Przy realizacji ćwiczenia oznaczonego * zwróć się o pomoc do nauczyciela.

4.6.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) zamodelować przerzutnik synchroniczny na elementach NOR?	☐	☐
2) zamodelować przerzutnik synchroniczny na elementach NAND?	☐	☐
3) sprawdzić działanie przerzutników synchronicznych?	☐	☐
4) wyjaśnić pojęcie licznik asynchroniczny?	☐	☐
5) wyjaśnić pojęcie licznik synchroniczny?	☐	☐
6) sprawdzić działanie licznika?	☐	☐
7) zaprojektować licznik?	☐	☐
8) wyjaśnić pojęcia :		
– rejestr,	☐	☐
– długość rejestru,	☐	☐
– rejestr przesuwany?	☐	☐
9) zaprojektować rejestr zbudowany:		
– z przerzutników D,	☐	☐
– z przerzutników JK?	☐	☐
10) sprawdzić działanie rejestru?	☐	☐
11) zinterpretować przebiegi czasowe w rejestrze?	☐	☐
12) sklasyfikować pamięci?	☐	☐

5. SPRAWDZIAN OSIĄGNIĘĆ

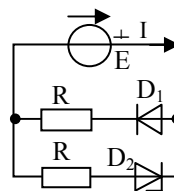
Test nr 1

INSTRUKCJA DLA UCZNIA

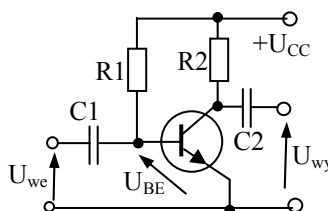
1. Przeczytaj uważnie instrukcję.
2. Podpisz imieniem i nazwiskiem kartę odpowiedzi.
3. Zapoznaj się z zestawem zadań testowych.
4. Test zawiera 10 zadań. Do każdego zadania dołączone są 4 możliwości odpowiedzi. Tylko jedna jest prawidłowa.
5. Udzielaj odpowiedzi tylko na załączonej karcie odpowiedzi, stawiając w odpowiedniej rubryce znak X. W przypadku pomyłki należy błędną odpowiedź zaznaczyć kółkiem, a następnie ponownie zakreślić odpowiedź prawidłową.
6. Zadania wymagają stosunkowo prostych obliczeń, które powinieneś wykonać na dodatkowym arkuszu odpowiedzi, przed zaznaczeniem poprawnego wyniku. Tylko wskazanie odpowiedzi, nawet poprawnej, bez uzasadnienia, nie będzie uznane.
7. Pracuj samodzielnie, bo tylko wtedy będziesz miał satysfakcję z wykonanego zadania.
8. Kiedy udzielenie odpowiedzi będzie Ci sprawiało trudność, odłóż jego rozwiązanie na później i wróć do niego, gdy zostanie Ci wolny czas.
9. Na rozwiązanie testu masz 45 min.
Powodzenia!

ZESTAW ZADAŃ TESTOWYCH

1. W obwodzie diody spolaryzowane są:
a) D1 zaporowo, D2 zaporowo,
b) D1 w kierunku przewodzenia, D2 zaporowo,
c) D1 zaporowo, D2 w kier. przewodzenia,
d) D1, D2 w kierunku przewodzenia.
2. W obwodzie przedstawionym w zadaniu 1: $E=15V$, spadek napięcia na diodach w kierunku przewodzenia $U_F(D1, D2)=1V$, napięcie Zenera $U_Z(D2)=7,5V$, $R=1k\Omega$. Prąd I źródła ma wartość:
a) 8mA.
b) 14mA.
c) 15mA.
d) 22mA.



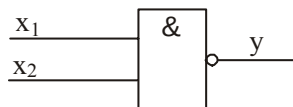
3. W układzie wzmacniacza przedstawionym na poniższym schemacie. $R1=300k\Omega$, $R2=1k\Omega$, $E_C=15V$, $h_{21E}=100$. Przybliżone wartości prądów bazy i kolektora mają wartości:
a) $50\mu A$, 5mA.
b) $150\mu A$, 15mA.
c) $50\mu A$, 0mA.
d) 5mA, 500mA.



4. W układzie wzmacniacza przedstawionym w zadaniu 3: $R1=150k\Omega$, $R2=150\Omega$, $E_C=15V$, $h_{21E}=100$. Przybliżona wartość mocy pobieranej ze źródła E_C wynosi
a) 150mW.
b) 50mW.

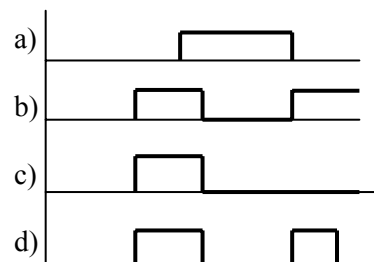
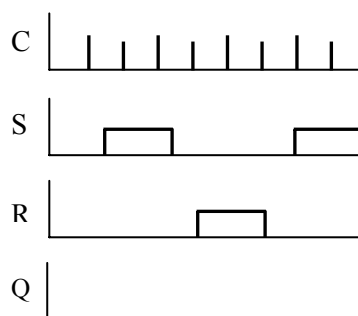
- c) 100mW.
d) 1W.
5. W prostowniku pełnofalowym w układzie Graetza, zasilanym z sieci jednofazowej $U=230V$ przez transformator o liczbie zwojów $Z_1=2300$, $Z_2=230$, z obciążeniem $R=10\Omega$, wartości skuteczna napięcia wtórnego i średnia prądu obciążenia wynoszą
- a) 23V, 2,3A.
b) 23V, 1A.
c) 32V, 2,3A.
d) 32V, 3,2A.
6. Wzmacniacz charakteryzuje się: $R_{we}=1k\Omega$, $k_u=100$, $R_{wy}=100\Omega$. Do jego wejścia doprowadzono sygnał $U_{WE}=10mV$, wyjście obciążono rezystancją $R_O=0,1k\Omega$. Na wyjściu uzyskamy napięcie U_{wy} równe
- a) 1V.
b) 0,5V.
c) 0,1 V.
d) 100 mV.
7. Liczba 215 poddana konwersji dziesiętno-dwójkowej będzie miała zapis
- a) 1100111.
b) 100111
c) 11010111.
d) 111000.
8. Przedstawiony symbolem graficznym funktor realizuje funkcję:

- a) $y = x_1 \cdot x_2$.
b) $y = x_1 + x_2$.
c) $y = x_1 + \overline{x_2}$.



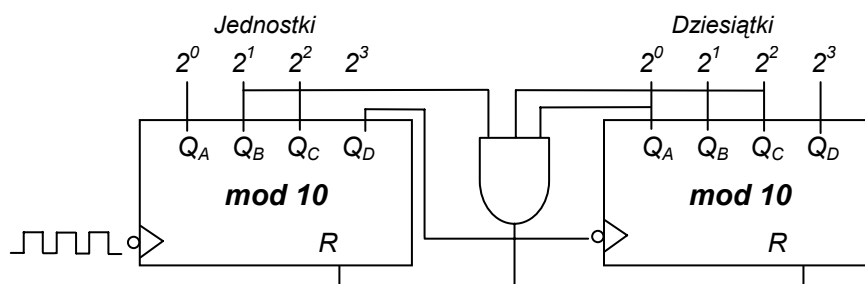
- d) $y = \overline{x_1} + x_2$

9. Na wyjściu Q przerzutnika pojawi się przebieg o kształcie:



10. Na schemacie przedstawiono licznik pracujący w kodzie BCD(8421):

- a) modulo 56
b) modulo 78.
c) modulo 80.
d) modulo 82.



ODPOWIEDZI do testu nr 1

Imię i nazwisko..... klasa.....

Data wykonania.....

Analizowanie działania układów analogowych i cyfrowych

Zakreśl poprawną odpowiedź

<i>Nr zadania</i>	<i>Odpowiedź</i>				<i>Punkty</i>
1	a	b	c	d	
2	a	b	c	d	
3	a	b	c	d	
4	a	b	c	d	
5	a	b	c	d	
6	a	b	c	d	
7	a	b	c	d	
8	a	b	c	d	
9	a	b	c	d	
10	a	b	c	d	
Razem:					

6. LITERATURA

1. Bolkowski S.: Elektrotechnika. WSiP, Warszawa 1995
2. Borczyński J.: Dumin P., Mliczewski A.: Podzespoły elektroniczne, półprzewodniki – poradnik. WKiŁ, Warszawa 1993
3. Chochowski A.: Elektrotechnika z automatyką. WSiP, Warszawa 1996
4. Chwaleba A., Moeschke B., Płoszajski G.: Elektronika. WSiP, Warszawa 2004
5. Głocki W.: Układy cyfrowe. WSiP, Warszawa 1999
6. Jabłoński W., Płoszajski G.: Elektrotechnika z automatyką. WSiP, Warszawa 1998
7. Limann O., Pelka H.: seria: Elektronika bez wielkich problemów: Automatyka, Optoelektronika, Technika cyfrowa. WKiŁ, Warszawa 1991
8. Marusak A.: Urządzenia elektroniczne. WSiP, Warszawa 2000
9. Misiurewicz P.: Podstawy techniki cyfrowej. WNT, Warszawa 1982
10. Pilawski M.: Pracownia elektryczna, podręcznik dla technikum. WSiP, Warszawa 1995
11. Pióro B., Pióro M.: Podstawy elektroniki cz. I i II. WSiP Warszawa 1997
12. Rusek M., Pasierbiński J.: Elementy i układy elektroniczne w pytaniach i odpowiedziach. WNT Warszawa 1999
13. Stabrowski M., Węgrzyn J.: Laboratorium techniki cyfrowej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej Warszawa 1995
14. Szafarczyk M.: Podstawy układów logicznych i komputerów. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1992
15. Watson J.: Elektronika. WKŁ, Warszawa 2002
16. Wilkinson B.: Układy cyfrowe. WKŁ, Warszawa 2000

Czasopisma:

- Elektronika dla wszystkich
- Elektronika
- Przegląd Elektroniczny