



**UMCS**

UNIwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

Projekt „Zintegrowany UMCS”  
Centrum Kształcenia i Obsługi Studiów, Biuro ds. Kształcenia Ustawicznego  
telefon: +48 81 537 54 61

# **PODSTAWY ELEKTRONIKI**

Opracował **Artur Wójtowicz**



## **Elektronika a elektrotechnika**

Elektronika to dziedzina wiedzy i techniki, zajmująca się projektowaniem, konstruowaniem i badaniem obwodów elektronicznych, zawierających zarówno elementy elektroniczne bierne (rezystory - inaczej oporniki, kondensatory, cewki) i aktywne (np. elementy półprzewodnikowe jak diody, tranzystory czy też elementy nie półprzewodnikowe, np. lampy próżniowe itp.), konstruowane i produkowane zarówno jako elementy dyskretne (pojedynczy element elektroniczny w jednej obudowie) jak i elementy złożone (np. analogowe czy cyfrowe układy scalone, zawierające w obudowie wiele elektronicznych elementów składowych). W odróżnieniu od elektrotechniki elektronika nie skupia się na zagadnieniach energii elektrycznej, ale raczej na zagadnieniach związanych z sygnałami elektrycznymi (ich detekcją, generowaniem, przetwarzaniem itp.). Generalnie elektronika zajmuje się urządzeniami o mniejszej mocy niż elektrotechnika, lecz podział na elektronikę i elektrotechnikę nie jest zbyt ostry i nie zawsze oczywisty.

Elektronika dzieli się na elektronikę analogową i cyfrową (oczywiście w wielu urządzeniach mamy elementy zarówno jednego jak i drugiego rodzaju). Elektronika analogowa zajmuje się zarówno układami liniowymi (takimi, gdzie są proste zależności między np. napięciem, rezystancją czy natężeniem prądu elektrycznego) jak i nieliniowymi. Elektronika cyfrowa (w tym technika mikroprocesorowa) zajmuje się przetwarzaniem informacji w układach, w których określonym wartościom parametrów elektrycznych umownie przypisano wartości logiczne.

Elektronika we współczesnej świecie ma tak szerokie zastosowanie, że nie ma potrzeby wymieniać dziedzin nauki i techniki, w których jest powszechnie wykorzystywana.

## **Prąd elektryczny**

Najważniejsze zjawisko, bez którego nie ma mowy o elektronice to prąd elektryczny. Prądem elektrycznym nazywamy uporządkowany (przynajmniej częściowo) ruch nośników ładunku elektrycznego w materiałach (zwykle przewodnikach, ale np. też w próżni), w których ruchliwe nośniki ładunku istnieją lub mogą się pojawić, wymuszony przez pole elektryczne. Mówimy, że pole elektryczne powstaje np. w przewodniku

prądu elektrycznego pod wpływem przyłożonego pomiędzy różne punkty przewodnika napięcia elektrycznego.

Materiały dobrze przewodzące prąd elektryczny to przewodniki. Izolatory elektryczne (dielektryki) to takie materiały, które bardzo słabo przewodzą prąd elektryczny czy to z powodu braku nośników czy też z powodu niewielkiej ruchliwości tych nośników, nawet jeśli w danym materiale występują. Trzecia grupa materiałów to półprzewodniki. Ich opór właściwy jest większy niż przewodników, mniejszy niż izolatorów i zwykle maleje wraz ze wzrostem temperatury materiału.

Nośnikami ładunku w przewodnikach (zwykle metalach) są najczęściej elektrony, mające ujemny (tak to przyjęto określać) ładunek elektryczny. W elektrolitach czy gazach nośnikami ładunku elektrycznego są jony, zarówno dodatnie jak i ujemne. W gazach o mniejszym ciśnieniu i w próżni nośnikami prądu są zwykle elektrony, emitowane w urządzeniach elektronicznych (lampach elektronicznych) z powierzchni rozgrzanej, metalowej elektrody. Czasami, np. w przypadku półprzewodników wytwarzanych w procesie domieszkowania izolatorów odpowiednimi domieszkami, wygodnie posługiwać się do opisu przepływu prądu elektrycznego kwazicząstkami, zwanymi tam dziurami. Fizycznie w takich materiałach poruszają się elektrony, ale w opisie posługujemy się właśnie wspomnianymi dziurami czyli „pustymi miejscami po elektronie”.

Pamiętać należy, że umowny kierunek przepływu prądu elektrycznego to taki, jakby poruszały się nośniki obdarzone ładunkiem dodatnim, niezależnie od tego, że w rzeczywistości poruszają się np. w przewodniku elektrony niosące ładunek ujemny. Prąd elektryczny w przewodniku będzie więc przepływał od punktu o wyższym potencjale elektrycznym do punktu o niższym potencjale.

Najważniejszą wielkością opisującą prąd elektryczny jest jego natężenie. Definiuje się je jako stosunek ładunku, który przepływa przez poprzeczny przekrój przewodnika do czasu przepływu tego ładunku. Jeśli w dowolnych, jednakowo długich odcinkach czasu przez przewodnik przepływa taka sama ilość ładunku, to mówimy o prądzie stałym. Wówczas natężenie prądu wyraża wzór:

$$I = \frac{q}{t}.$$

Jeśli przepływająca ilość ładunku zmienia się w czasie, to natężenie wiążemy pochodną ładunku elektrycznego po czasie:

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

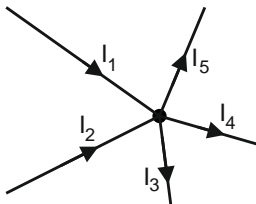
W układzie SI ładunek określamy w kulombach (C), czas w sekundach (s), a natężenie prądu w amperach (A). W elektronice często używa się jednostek mniejszych, jak miliamper ( $\text{mA} = 10^{-3} \text{ A}$ ), czy mikroamper ( $\mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$ ) lub jeszcze mniejszych.

Przepływowi prądu elektrycznego przez przewodnik o niezerowym oporze towarzyszy strata energii, zazwyczaj objawiająca się wydzielaniem ciepła i skutkująca wzrostem temperatury tego przewodnika, jeśli tylko nie ma wystarczającego odprowadzania tego ciepła do otoczenia.

Ze zjawiskiem prądu elektrycznego związane są trzy podstawowe prawa fizyczne:

### a) pierwsze prawo Kirchhoffa

Prawo to wynika z zasady zachowania ładunku (ładunki elektryczne nie powstają ani nie znikają samorzutnie). Dla węzła obwodu elektrycznego (punktu, gdzie stykają się przewodniki będące elementami obwodu) suma algebraiczna natężeń prądów wpływających (+) i wypływających (-) jest równa zero (tyle samo ładunków elektrycznych z węzła wypływa, co i do niego wpływa).



*Pierwsze prawo Kirchhoffa.*

W przypadku węzła przedstawionego na rysunku, jeśli przyjmiemy, że prądy wpływające są dodatnie a wypływające ujemne, można zapisać:

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0,$$

zaś ogólnie możemy stwierdzić, że dla wielu ( $n$ ) prądów:

$$\sum_i I_i = 0.$$

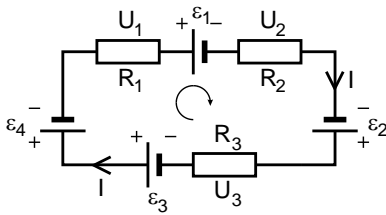
### b) drugie prawo Kirchhoffa

Prawo to (zwane prawem napięciowym) opisuje bilans napięć w zamkniętym obwodzie elektrycznym prądu stałego (oczku sieci, jeśli to element większej sieci elektrycznej). Mówi, że w zamkniętym obwodzie suma spadków napięć na oporach równa jest sumie sił elektromotorycznych

(wartości źródeł napięcia) znajdujących się w tym obwodzie. Można je zapisać równaniem:

$$\sum_i U_i = \sum_k \varepsilon_k .$$

$U_i$  to spadek napięcia na  $i$ -tym oporze,  $\varepsilon_k$  – siła elektromotoryczna  $k$ -tego źródła napięcia.



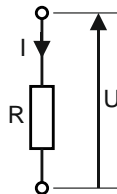
*Drugie prawo Kirchhoffa.*

Spadki napięcia na oporach i siły elektromotoryczne mogą mieć wartości zarówno dodatnie jak i ujemne. Znak tych spadków i sił ustala się, przyjmując określony kierunek w obwodzie, np. zgodny z kierunkiem wskazówek zegara. Jeżeli kierunek przepływu prądu przez element jest zgodny z przyjętym kierunkiem obwodu, to spadek napięcia na oporze jest dodatni (w przeciwnym wypadku ujemny). Jeżeli siła elektromotoryczna ma polaryzację zgodną z przyjętym kierunkiem obiegu, to jej wartość jest dodatnia.

Gdyby to prawo nie było zawsze spełnione to wychodząc od wybranego punktu w wybranym kierunku obwodu i dodając do potencjału elektrycznego w tym punkcie „po drodze” spadki napięcia na oporach i siły elektromotoryczne, to po ponownym dojściu do tego samego punktu mielibyśmy inny niż wyjściowy potencjał elektryczny w tym punkcie, co jest jednak wewnątrz sprzeczne i po prostu niemożliwe.

### c) prawo Ohma

Prawo Ohma dla przewodnika elektrycznego mówi o proporcjonalności natężenia prądu płynącego przez przewodnik do napięcia między końcami tego przewodnika.



*Ilustracja prawa Ohma.*

Dla prądu stałego proporcjonalność napięcia  $U$  i natężenia prądu  $I$  wyraża się zależnością:

$$U = I \cdot R,$$

gdzie współczynnik proporcjonalności  $R$  nazywa się rezystancją lub oporem elektrycznym. Jednostka oporu elektrycznego to 1 om ( $\Omega$ ):

$$1\Omega = \frac{1\text{V}}{1\text{A}}.$$

Pamiętać trzeba, że chociaż prawo Ohma jest powszechnie stosowane, to nie jest ono jednak uniwersalnym prawem przyrody. Dla skrajnie małych czy dużych napięć czy natężeń prądu oraz w niektórych specyficznych grupach materiałów prawo to nie jest spełnione. Prawo Ohma nie jest spełnione zwłaszcza gdy istotnie zmienia się temperatura przewodnika, chociażby z powodu rozpraszanej przez płynący w nim prąd energii.

## **Bierne elementy elektroniczne**

### **Rezystory**

Rezystor (opornik) jest podstawowym biernym elementem elektronicznym. Jego zadaniem jest ograniczenie (zgodnie z prawem Ohma) natężenia prądu przepływającego między punktami obwodu o różnych potencjałach. Przepływający przez opornik prąd traci część swojej energii, która na rezystorze wydzielana jest w formie ciepła zgodnie ze wzorem:

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}.$$

Dobierając rezystor jako element obwodu elektronicznego trzeba zwracać uwagę, by dopuszczalna moc, jaka może być przez niego wydzielana nie przekraczała tej określonej przez producenta.

Typowe rezystory produkowane są w bardzo szerokim zakresie wartości, od  $0\ \Omega$  do  $10\ \text{M}\Omega$ . Specjalistyczne, np. te wykorzystywane do mierzenia prądów o bardzo małych natężeniach mogą mieć opory nawet do  $10^{14}\ \Omega$ .

Większość rezystorów to rezystory węglowe. Są bardzo tanie w produkcji, jednak ich wadą jest dość duży współczynnik zmiany oporu w zależności od zmian temperatury, nawet rzędu  $0,1\%/^{\circ}\text{C}$ . Lepsze pod tym względem są tzw. rezystory metalizowane, tu współczynnik ten to typowo  $0,002\%/^{\circ}\text{C}$ .

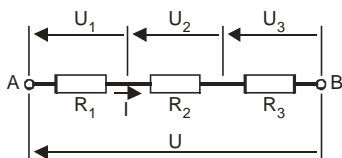
W rzeczywistych rezystorach oprócz oporu występuje też niewielka pojemność elektryczna i niewielka indukcyjność, lecz te wielkości zwykle się zaniedbuje, chyba że rezystor pracuje przy bardzo wysokich częstościach rzędu setek MHz.

## Łączenie rezystorów. Wartości zastępcze rezystancji

W obwodach elektrycznych i elektronicznych elementy, w tym rezystory, mogą być połączone na różne sposoby. Najczęściej wymienia się tu połączenia szeregowe i równoległe. W tych przypadkach stosunkowo prosto można wyliczyć opór zastępczy danej gałęzi obwodu (opór rezystora, którym można zastąpić połączone rezystory bez zmiany napięć i natężeń prądu elektrycznego w pozostałych częściach obwodu).

### Połączenie szeregowe

Na poniższym rysunku przedstawiono 3 rezystory połączone szeregowo.



*Szeregowe łączenie rezystorów.*

Jeżeli pomiędzy punkty  $A$  i  $B$  przyłożymy napięcie elektryczne  $U$ , to przez każdy z rezystorów będzie płynął prąd elektryczny o takim samym natężeniu  $I$ . Spadki napięcia na kolejnych rezystorach będą wynosiły odpowiednio  $U_1$ ,  $U_2$  i  $U_3$ ; możemy je wyliczyć zgodnie z prawem Ohma i wyrazić wzorami :

$$U_1 = I \cdot R_1, \quad U_2 = I \cdot R_2 \quad \text{oraz} \quad U_3 = I \cdot R_3.$$

Całkowity spadek napięcia na tak połączonych rezystorach to suma spadków napięcia na każdym z nich:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = I(R_1 + R_2 + R_3).$$

Spadek napięcia na rezystorze zastępczym  $R$  zgodnie z prawem Ohma wynosi:

$$U = I \cdot R.$$

Po porównaniu powyższych wyrażeń i skróceniu (podzieleniu) przez  $I$  otrzymujemy:

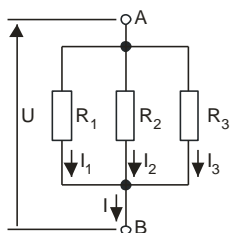
$$R = R_1 + R_2 + R_3.$$

Uogólniając możemy napisać, że dla  $n$  szeregowo połączonych rezystorów rezystancja zastępcza (wypadkowa) wyraża się wzorem:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

### Połączenie równoległe

Na rysunku przedstawiono 3 rezystory połączone równoległe.



*Równoległe łączenie rezystorów.*

Jeżeli pomiędzy punkty A i B przyłożymy napięcie elektryczne o wartości  $U$ , to przez poszczególne rezystory  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$  przepłyną prądy elektryczne o natężeniach  $I_1$ ,  $I_2$  i  $I_3$ , wyrażonych zgodnie z prawem Ohma wzorami:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2} \quad \text{oraz} \quad I_3 = \frac{U}{R_3}.$$

Całkowite natężenie prądu płynącego między A i B to suma tych trzech prądów:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = U \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right).$$

Opór zastępczy  $R$  musi mieć wartość taką, przy której natężenie prądu przez niego płynące jest takie samo jak płynące w rozpatrywanym obwodzie i wynosi ono:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Porównując natężenia prądu w powyższych wzorach i skracając przez  $U$ , otrzymujemy:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

Uogólniając można napisać, że dla  $n$  równoległe połączonych rezystorów odwrotność rezystancji zastępczej jest równa sumie odwrotności rezystancji poszczególnych rezystorów:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

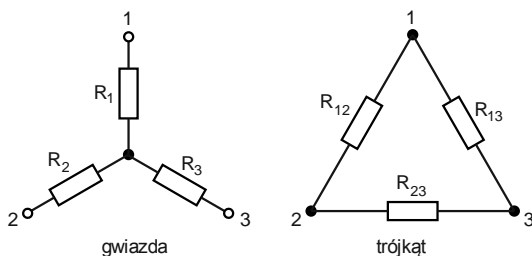
### **Transfiguracja**

W części obwodów elektrycznych nie da się wyliczyć oporu zastępczego na drodze kolejnych przybliżeń, licząc opory zastępcze rezystorów połączonych



szeregowo i równolegle, bo część rezystorów może być włączona w obwód w sposób bardziej skomplikowany. Przydaje się wówczas metoda przekształcenia obwodu na obwód zastępczy zwana transfiguracją. Założeniem poprawnej transfiguracji jest niezmiennosc napięć i natężeń prądu elektrycznego w pozostałej części obwodu, niepodlegającej przekształceniu.

Najczęściej wykorzystywanym przykładem transfiguracji jest zamiana układu rezystorów połączonych w układzie w trójkąt na połączenie w gwiazdę w układzie zastępczym lub odwrotnie.



*Połączenia w gwiazdę  
i w trójkąt.*

Połączenie w gwiazdę i równoważne mu połączenie w trójkąt przedstawia powyższy rysunek:

### Transfiguracja trójkąt-gwiazda

Udowodnione zostało, że wartości zastępcze rezystancji dla połączenia w gwiazdę w obwodzie zastępczym przy danych wartościach rezystancji przy połączeniu w trójkąt w obwodzie analizowanym wyrażone są wzorami:

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}, \quad R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}} \quad \text{oraz} \quad R_3 = \frac{R_{13} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}.$$

Dla szczególnego przypadku – układu symetrycznego, w którym  $R_{12} = R_{13} = R_{23}$  mamy:

$$R_i = \frac{1}{3} R_{ij}.$$

### Transfiguracja gwiazda-trójkąt

Udowodniono, że wartości zastępcze rezystancji dla połączenia w trójkąt w obwodzie zastępczym przy danych wartościach połączenia w gwiazdę wyrażone są wzorami:

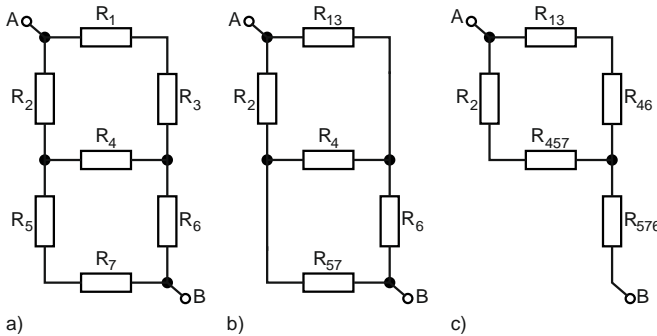
$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}, \quad R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \quad \text{i} \quad R_{13} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}.$$

Dla układu symetrycznego, w którym  $R_{12} = R_{13} = R_{23}$  mamy:

$$R_{ij} = 3R_i.$$

### Przykład zastosowania transfiguracji.

Rozpatrzmy obwód elektryczny, zawierający 7 rezystorów, przedstawiony na rysunku a).

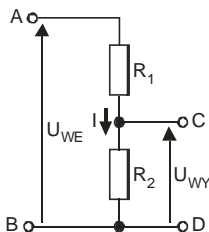


*Przykład transfiguracji.*

Jeżeli chcemy policzyć wartość zastępczego oporu tego obwodu między punktami A i B, to najpierw uprościmy obwód, zastępując oporami zastępczymi te jego fragmenty, które są połączone szeregowo. Uproszczony (nieco tylko) obwód pokazany jest na rysunku b). W obwodzie tym  $R_{13} = R_1 + R_3$  oraz  $R_{57} = R_5 + R_7$ . Rezystory  $R_4$ ,  $R_{57}$  i  $R_6$  tworzą trójkąt, który zastępujemy rezystorami połączonymi w gwiazdę o symbolach  $R_{457}$ ,  $R_{46}$ ,  $R_{576}$  (rysunek c). Wartości rezystorów połączonych w gwiazdę otrzymamy z poznanych już wzorów. W uzyskanym tak obwodzie zastępczym są już tylko połączenia szeregowo i równoległe, które nie sprawiają żadnego kłopotu rachunkowego.

### Dzielnik napięcia

Dzielnik jest czwórnikiem (4-zaciskowym obwodem elektrycznym), zbudowanym z dwu (w najprostszym przypadku) rezystorów, którego zadaniem jest zapewnienie na wyjściu określonej części napięcia wejściowego.



*Dzielnik napięcia.*

W przedstawionym na rysunku dzielniku wejściem są zaciski  $A$  i  $B$ , zaś wyjściem  $C$  i  $D$ . Stosunek wartości napięcia wejściowego  $U_{WE}$  do wyjściowego  $U_{WY}$  to przekładnia  $K$  dzielnika.

Napięcie wyjściowe w nieobciążonym dzielniku jest zawsze mniejsze od napięcia wejściowego (napięcia zasilania) i zależne jest tylko od stosunku wartości rezystancji rezystorów, z których jest zbudowany.

Jeżeli do wejścia przyłożyliśmy napięcie o wartości  $U_{WE}$ , to przez opory  $R_1$  i  $R_2$  płynie prąd o natężeniu  $I$ :

$$I = \frac{U_{WE}}{R_1 + R_2}.$$

Spadek napięcia na rezystorze  $R_2$ , który to spadek jest jednocześnie napięciem wyjściowym dzielnika, wynosi:

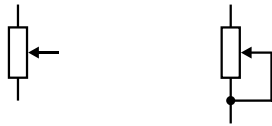
$$U_{WY} = I \cdot R_2.$$

Po podstawieniu natężenia prądu  $I$  z pierwszego wzoru do drugiego otrzymujemy wyrażenie opisujące wartość napięcia wyjściowego  $U_{WY}$  w zależności od napięcia wejściowego  $U_{WE}$ :

$$U_{WY} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{WE}.$$

## Potencjometr

Potencjometr to 3-wyprowadzeniowy element elektroniczny pełniący funkcję regulowanego dzielnika napięcia. Dwa wyprowadzenia połączone są ścieżką z materiału oporowego. Trzecie doprowadzenie dołączone jest do ruchomego ślizgacza, który może się przemieszczać wzdłuż materiału oporowego. Produkuje się m.in. potencjometry, które mają ścieżki oporowe wykonane z węgla, cermetu czy drutu oporowego. W zależności od konstrukcji wyróżniamy m.in. potencjometry suwakowe, obrotowe i wieloobrotowe. Nie wszystkie potencjometry są liniowe czyli mają ścieżki oporowe wykonane z materiału o takim samym oporze właściwym. Niektóre produkowane potencjometry mają charakterystyki wykładnicze czy logarytmiczne i znajdują zastosowanie np. w sprzęcie audio do regulacji głośności, Ludzkie zmysły, w tym słuch mają logarytmiczny charakter i dzięki użyciu odpowiedniego potencjometru użytkownik sprzętu audio ma wrażenie, że natężenie dźwięku zmienia się proporcjonalnie z przesunięciem/obrotem ślizgacza potencjometru. Potencjometr, w którym jedno z wyprowadzeń ścieżki oporowej połączone jest ze ślizgaczem pełni funkcję regulowanego oporu.



*Symbol potencjometru  
i potencjometr w funkcji regulowanego  
oporu.*

## Kondensatory

Kondensatory to bierne elementy elektroniczne, których zadaniem jest gromadzenie ładunku elektrycznego w obwodach elektronicznych. Kondensator składa się z dwóch okładek (przewodników) rozdzielonych izolatorem (dielektrykiem). Po przyłożeniu napięcia elektrycznego do okładek kondensatora gromadzi się na nich ładunek elektryczny. Napięcie elektryczne między okładkami w czasie gromadzenia ładunku rośnie i zrównuje się (niemal) z przyłożonym z zewnątrz napięciem. Jeżeli odłączymy naładowany kondensator od źródła napięcia, to ładunek na jego okładkach będzie się utrzymywał dzięki siłom przyciągania elektrostatycznego, o ile kondensator nie jest naładowany jako całość. Jeśli kondensator nie jest naładowany jak całość, to na okładkach są takie same ładunki, ale o przeciwnych znakach. Podstawową cechą kondensatora jest jego **pojemność**  $C$ , która mówi o zdolności kondensatora do gromadzenia ładunku elektrycznego:

$$C = \frac{Q}{U},$$

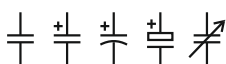
gdzie  $Q$  to ładunek zgromadzony na jednej okładce, zaś  $U$  to napięcie między okładkami. Jednostką pojemności jest F (farad):

$$1\text{F} = 1\text{C}/1\text{V}.$$

Kondensator ma pojemność 1 F, gdy po zgromadzeniu na okładce ładunku 1 C napięcie między okładkami wynosi 1 V.

Farad to duża jednostka. Wykorzystywane w elektronice kondensatory mają typowo pojemności dużo mniejsze: rzędu od 1 pF ( $10^{-12}$  F), przez 1 nF ( $10^{-9}$  F), 1  $\mu\text{F}$  ( $10^{-6}$  F) do 1 mF ( $10^{-3}$  F). Produkowane są też kondensatory o dużo większej pojemności (dziesiątki faradów) ale ich zastosowanie to nie obwody elektroniczne, ale źródła prądu (np. zamiast akumulatorów w modelarstwie).

**Symbole kondensatorów** przedstawia poniższy rysunek.

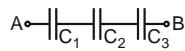


*Symbole kondensatorów, kolejno: symbol ogólny (także kondensator niespolaryzowany), kondensator spolaryzowany (3 symbole) i kondensator o zmiennej pojemności (trymer).*

## Łączenie kondensatorów

W przypadku **szeregowego łączenia kondensatorów** wypadkowa pojemność jest mniejsza niż każdego z nich i dana jest wzorem:

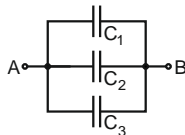
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$



*Kondensatory  
połączone szeregowo.*

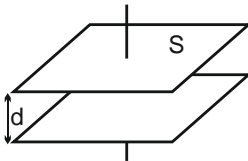
Gdy **łączymy kondensatory równolegle**, pojemności łączonych kondensatorów się dodają (bo rośnie sumaryczna powierzchnia okładek):

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$



*Kondensatory  
połączone równolegle.*

## Kondensator płaski



*Kondensator płaski.*

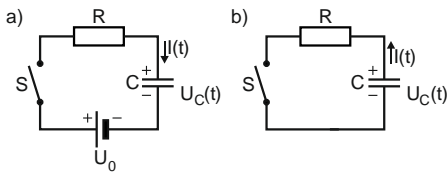
Prosty wzór opisuje pojemność kondensatora płaskiego:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d},$$

gdzie  $\varepsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni,  $\varepsilon_r$  – względna przenikalność elektryczna dielektryka między okładkami,  $S$  - powierzchnia każdej z okładek,  $d$  – odległość między okładkami.

## Ładowanie i rozładowanie kondensatora przez opór

Jeżeli zamkniemy kluczem  $S$  obwód (rysunek poniżej, a), w którym mamy szeregowo połączone źródło napięcia  $U_0$ , rezystor  $R$  i (nienaładowany) kondensator  $C$ , to w tym obwodzie popłynie prąd  $I$ , a kondensator będzie się ładował, przy czym napięcie między okładkami będzie dążyć do wartości równej napięciu źródła.



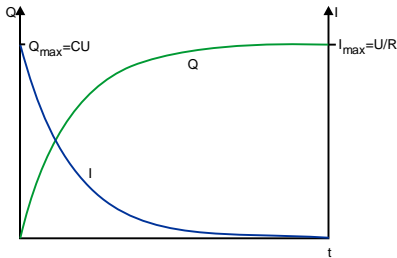
Obwody szeregowe ilustrujące:  
 a) ładowanie kondensatora,  
 b) rozładowywanie kondensatora.

Zmiana napięcia na okładkach kondensatora wyrażona jest wzorem:

$$U_C(t) = U_0 \left( 1 - e^{-t/\tau} \right),$$

gdzie  $\tau = RC$  to tzw. stała czasowa obwodu RC.

Po czasie  $t = 1\tau$  napięcie  $U_C$  wynosi  $0,63U_0$ , zaś  $0,99U_0$  osiągnięte jest po czasie  $t = 4,6\tau$ .



Prąd i ładunek  
 podczas ładowania  
 kondensatora.

Natężenie prądu płynącego przez rezystor  $R$  wyrazić można wzorem:

$$I = I_0 e^{-t/\tau},$$

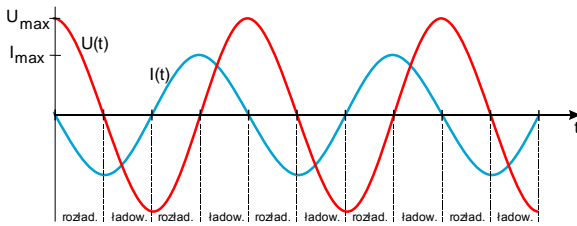
gdzie  $I_0 = \frac{U_0}{R}$ , czyli jest to natężenie prądu płynącego przez rezystor  $R$  w chwili początkowej, gdy na kondensatorze nie jest zgromadzony jeszcze żaden ładunek a napięcie między okładkami jest zerowe.

### Reaktancja kondensatora

Reaktancja kondensatora jest wielkością, która wiąże prąd i napięcie na kondensatorze w przypadku prądów zmiennych. Jest ona tym mniejsza, im większe są pojemność kondensatora i częstotliwość prądu i wyraża się wzorem:

$$X_C = \frac{-1}{\omega C} = \frac{-1}{2\pi f C}.$$

W przypadku sygnałów zmiennych sinusoidalnych napięcie jest opóźnione w fazie względem prądu o  $\pi/2$  (czyli prąd wyprzedza napięcie o  $\pi/2$ ). Ilustruje to poniższy rysunek.



*Przesunięcie prądu  
względem napięcia  
w kondensatorze.*

Kondensatory produkowane są w kilku różnych **technologiach**. Wyróżnia się m.in.:

- kondensatory elektrolityczne, w których jedna okładka jest metalowa (zwykle tantal lub aluminium), zaś druga to suchy lub ciekły elektrolit; izolatorem jest tlenek metalu, z którego wykonano pierwszą elektrodę; kondensatory te mają ustaloną polaryzację a odwrotne ich podłączenie może skutkować reakcją elektrochemiczną, gromadzeniem się gazu i wybuchem; zwykle mają dość dużą pojemność przy względnie małej objętości; są niezbyt szybkie, mają stosunkowo duże prądy upływu;
- kondensatory foliowe, wykonane z 2 pasków folii metalowej rozdzielonych folią z dielektryka i zwiniętych dla zmniejszenia gabarytów; pracują przy dużych prądach, mają dużą wytrzymałość napięciową i małe upływy;
- kondensatory ceramiczne; dielektrykiem są materiały ceramiczne czasem o bardzo wysokim współczynniku przenikalności elektrycznej; mogą poprawnie pracować przy wysokich częstotliwościach;
- kondensatory powietrzne, często o zmiennej geometrii, więc i regulowanej pojemności (kondensatory strojeniowe).

Kondensatory stosowane są m.in. w układach zasilających (wygładzanie tętnień), przeciwzakłóceńowych, jako elementy podtrzymujące napięcie w układach cyfrowych, gdzie wraz z taktem zegara otwierane/zamykane są jednocześnie tysiące tranzystorów i gwałtownie, chwilowo rośnie zapotrzebowanie na prąd; stanowią elementy sprzęgające w układach analogowych – nie przenoszą napięć stałych, ale przenoszą sygnały zmienne, stanowią elementy filtrów częstotliwości czy generatorów sygnałów okresowych.

## **Cewki**

Cewki są biernymi elementami elektronicznymi, których najważniejszą cechą jest indukcyjność. Wykonane są zazwyczaj z wielu uzwojeń drutu miedzianego, nawiniętego często na metalowy, magnetyczny rdzeń. Ponieważ opór rezystancyjny drutu jest niewielki, to zwykle można go zaniedbać. Niewielka jest zazwyczaj też pojemność cewki. Dla prądów stałych cewka stanowi opornik o niewielkiej wartości, zaś dla prądów zmiennych największe znaczenie ma reaktancja cewki.

**Reaktancja cewki** jest wielkością, która wiąże prąd i napięcie na cewce w przypadku prądów zmiennych. Jest ona tym większa, im większe są indukcyjność cewki i częstotliwość prądu. Napięcie samoindukowane na cewce wyraża się wzorem:

$$U = -L \frac{di}{dt},$$

gdzie  $L$  jest indukcyjnością cewki, zaś  $i$  to natężenie prądu. Indukcyjność  $L$  to podstawowy parametr opisujący cewkę i jest ona stosunkiem strumienia magnetycznego  $\Phi$ , wytwarzanego przez przepływający prąd do wartości natężenia tego prądu  $i$ :

$$L = k \frac{\Phi}{i},$$

gdzie  $k$  to parametr zależny od geometrii cewki (m.in. liczby uzwojeń, kształtu i przenikalności magnetycznej rdzenia). Cewka ma indukcyjność 1 H (henra), jeżeli przepływający prąd, którego natężenia zmienia się z szybkością 1 A/1 s indukuje napięcie o wartości 1 V między końcami cewki.

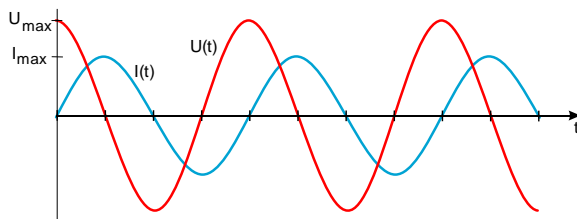
Ważne jest, że indukowane napięcie przeciwdziała przyrostowi natężenia prądu, więc skierowane jest przeciwnie do  $i$ .

Samą reaktancję cewki możemy wyrazić wzorem:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L.$$

Jest ona tym większa, im większa jest indukcyjność cewki i im większa jest częstotliwość prądu przepływającego przez cewkę.

W przypadku sygnałów zmiennych sinusoidalnych prąd w cewce jest opóźniony w fazie względem napięcia o  $\pi/2$  (czyli napięcie wyprzedza prąd o  $\pi/2$ ). Zatem sytuacja jest dokładnie odwrotna niż w przypadku kondensatora. Ilustruje to poniższy rysunek.



*Przesunięcie prądu  
względem napięcia  
w cewce*



## Łączenie cewek

W przypadku **szeregowego** połączenia cewek ich indukcyjność jest sumą indukcyjności poszczególnych cewek:

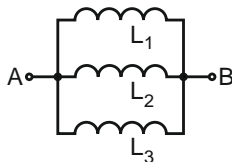
$$L = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$



*Cewki połączone szeregowo.*

W przypadku **równoległego** połączenia cewek ich indukcyjność jest mniejsza niż każdej z nich i dana jest wzorem:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$$



*Cewki połączone równolegle.*

## Cewki w obwodach elektrycznych

Cewki są stosowane m.in. jako:

- dławiki: w obwodach wejściowych urządzeń zasilanych z sieci prądu przemiennego stanowią element filtrów przeciwzakłóceń; w zasilaczach i przetwornicach napięcia magazynują energię;
- elementy filtrów LC;
- elementy obwodów rezonansowych w generatorach.

## Transformator

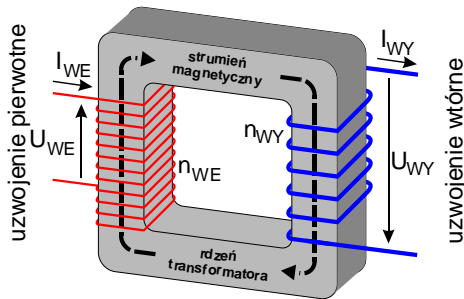
Urządzeniem indukcyjnym najczęściej stosowanym jako element różnego rodzaju zasilaczy jest transformator czyli takie urządzenie, w którym energia elektryczna przenoszona jest z jednego obwodu do drugiego dzięki indukcji. Najprostszy transformator składa się z 2 izolowanych uzwojeń drutu, np. miedzianego, stanowiących obwody elektryczne, nawiniętych na wspólny, stalowy rdzeń, który jest obwodem magnetycznym transformatora i przewodzi strumień magnetyczny. Jedno z uzwojeń traktujemy jako pierwotne i do niego przykładana jest napięcie zmienne ze źródła napięcia, zaś drugie uzwojenie to uzwojenie wtórne. Zmienny prąd przepływający przez uzwojenie pierwotne wytwarza w rdzeniu strumień magnetyczny. Strumień ten indukuje w uzwojeniu wtórnym ponownie zmienny prąd elektryczny, o tej samej częstotliwości co w uzwojeniu pierwotnym.

W większości transformatorów uzwojenia są odseparowane od siebie galwanicznie (nie ma połączenia elektrycznego). Wyjątkiem jest autotransformator, który ma tylko jedno uzwojenie, będące zarazem pierwotnym jak i wtórnym.

Transformator pozwala na zmianę napięcia prądu przemiennego. W idealnym transformatorze proporcja napięć  $U$  w obu uzwojeniach jest taka sama jak proporcja ilości zwojów  $n$  drutu w uzwojeniach:

$$\frac{U_{WE}}{U_{WY}} = \frac{I_{WY}}{I_{WE}} = \frac{n_{WE}}{n_{WY}},$$

gdzie indeksy WY i WE odnoszą się odpowiednio do uzwojeń wtórnych (wyjściowych) i pierwotnych (wejściowych) – patrz rysunek poniżej.



*Transformator z jednym uzwojeniem pierwotnym i jednym wtórnym.*

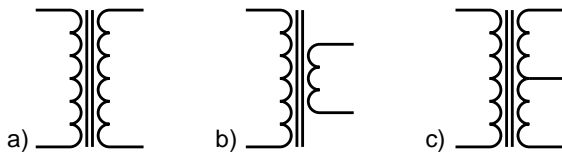
Z zasady zachowania energii (co w transformatorze można sprowadzić do mocy w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym) wynika, że stosunek natężeń prądów w uzwojeniach jest odwrotnie proporcjonalny do stosunku napięć między ich końcami, a więc i odwrotnie proporcjonalny do liczby zwojów. Transformatory obniżające napięcie (i pozwalające na pobór prądu o większym natężeniu) mają w uzwojeniu wtórnym mniej zwojów niż w pierwotnym; transformatory podwyższające napięcie mają więcej zwojów w uzwojeniu wtórnym. Spotyka się także transformatory, w których liczba zwojów jest taka sama w obu uzwojeniach; są to tzw. transformatory separujące, czasem pełniące funkcję transformatorów bezpieczeństwa.

Ponieważ w rzeczywistych transformatorach występują pewne straty energii, związane z oporem uzwojeń, prądami wirowymi w rdzeniu czy też histerezą magnetyczną rdzenia, to mają one zazwyczaj po stronie wtórnej o kilkakilkanaście % uzwojeń więcej niż to wynika z obliczeń dla transformatora idealnego. Przykładowo transformator separujący, który teoretycznie powinien mieć identyczną liczbę zwojów w obu uzwojeniach, ma w uzwojeniu wtórnym więcej zwojów i uzwojenia pierwotne i wtórne są na obudowie transformatora oznaczone. Odwrotne podłączenia

transformatora separującego dawałoby nie takie samo napięcie na uzwojeniu wyjściowym co wejściowym, ale obniżone o kilkanaście %.

Oprócz najprostszych transformatorów mających po jednym pierwotnym i wtórnym uzwojeniu, produkowane są też transformatory, które mają po stronie pierwotnej i/lub (częściej) wtórnej kilka uzwojeń, czasem identycznych, a czasem o bardzo różnych napięciach wtórnych (różnych liczbach zwojów we wtórnych uzwojeniach). Produkowane są też transformatory, który mają wiele wyprowadzeń z tego samego uzwojenia.

Na rysunku poniżej przedstawione są symbole kilku rodzajów transformatorów.



*Transformatory:*  
a) separacyjny (1:1);  
b) obniżający napięcie;  
c) z dodatkowym odczepem.

## Filtry pasywne dla sygnałów zmiennych

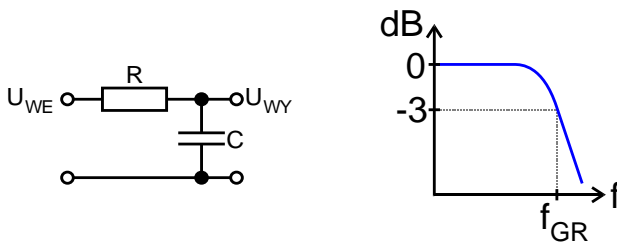
Filtry pasywne to układy elektroniczne, zbudowane wyłącznie z wykorzystaniem pasywnych elementów, takich jak rezystory, kondensatory, cewki. Zastosowaniem filtrów jest przepuszczanie sygnałów przy określonych częstotliwościach, zaś blokowanie przy innych.

Generalnie **filtry możemy dzielić na:**

- dolnoprzepustowe (przenoszą niskie częstotliwości, blokują wysokie);
- górnoprzepustowe (przenoszą wysokie częstotliwości, blokują niskie);
- środkowoprzepustowe (pasmowe - przenoszą częstotliwości z określonego zakresu, blokują niższe i wyższe);
- środkowozaporowe (blokują częstotliwości z określonego zakresu, przenoszą niższe i wyższe).

Nigdy granica częstotliwości w pasywnych filtrach nie jest ostra, dlatego zdefiniować trzeba dla filtrów częstotliwość graniczną (odcięcia). Najczęściej przyjmuje się, że jest to częstotliwość, przy której amplituda sygnału po przejściu przez filtr zmniejsza się o 3 dB (decybele).

**Dolnoprzepustowy filtr RC pierwszego rzędu** zbudowany jest z rezystora włączonego szeregowo z odbiornikiem i kondensatora włączonego równoległe z odbiornikiem (patrz rysunek poniżej).



*Filtr dolnoprzepustowy  
RC  
i przykładowa  
charakterystyka  
częstotliwościowa.*

Przy niskich częstotliwościach kondensator tylko minimalnie wpływa na sygnał bo ma dużą reaktancję; przy częstotliwościach wysokich reaktancja jest mała, więc kondensator stanowi praktycznie zwarcie i do odbiornika dochodzi tylko niewielka część sygnału. Stała czasowa, określona dla filtru dolnoprzepustowego RC wynosi:

$$T = RC.$$

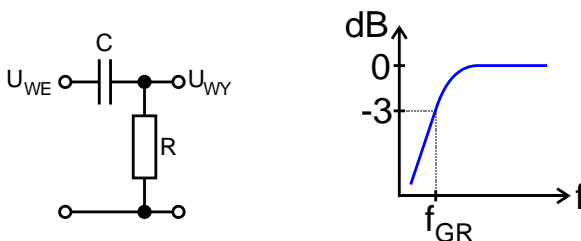
Częstotliwość graniczną można policzyć ze wzoru

$$f_{GR} = \frac{1}{2\pi T} = \frac{1}{2\pi RC},$$

i odpowiada jej graniczna częstotaść kołowa, wyrażona wzorem:

$$\omega_{GR} = \frac{1}{T} = \frac{1}{RC}.$$

**Górnoprzepustowy (dolnozaporowy) filtr RC** zbudowany jest z kondensatora włączonego szeregowo z odbiornikiem i rezystora włączonego równolegle z odbiornikiem (patrz rysunek poniżej).



*Filtr górnoprzepustowy RC  
i przykładowa  
charakterystyka  
częstotliwościowa.*

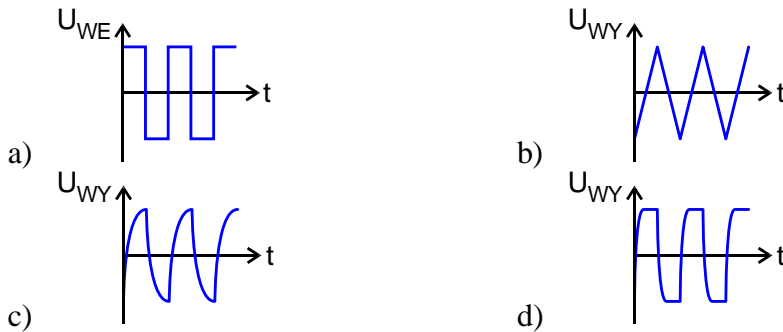
Przy niskich częstotliwościach szeregowo włączony kondensator stanowi w praktyce przerwę w obwodzie. Przy wysokich częstotliwościach sygnał jest przenoszony przez kondensator do odbiornika. Częstotliwość graniczna takiego filtru określona jest identycznie jak dla filtru dolnoprzepustowego i wynosi:

$$f_{GR} = \frac{1}{2\pi T} = \frac{1}{2\pi RC}.$$

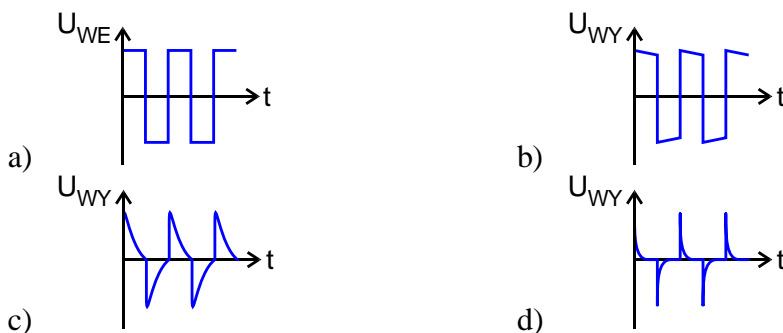
Kondensator włączony w szereg z odbiornikiem sprawia, że zmieniana jest faza przenoszonego napięcia i prądu (następuje przesunięcie sygnału na wyjściu filtra względem sygnału na jego wejściu o pewien kąt) i, co więcej, kąt przesunięcia fazowego  $\varphi$  zależny jest od częstotliwości sygnału. Można go opisać wyrażeniem:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{f_{GR}}{f} = \frac{1}{2\pi fRC}.$$

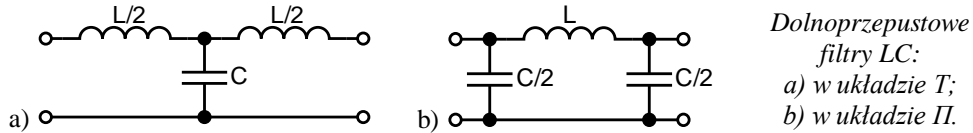
Filtr dolnoprzepustowy RC przy wysokich częstotliwościach sygnału wejściowego może być traktowany jako **układ całkujący sygnały**. Na poniższych rysunkach pokazano wejściowy sygnał prostokątny (a) i sygnały wyjściowe: (b) wysokiej częstotliwości (dobrze scałkowany), (c) średniej częstotliwości (częściowo scałkowany), (d) niskiej częstotliwości (źle scałkowany).



Filtr górnoprzepustowy RC przy niskich częstotliwościach sygnału wejściowego może być traktowany jako **układ różniczkujący sygnały**. Na poniższych rysunkach pokazano wejściowy sygnał prostokątny (a) i sygnały wyjściowe: (b) wysokiej częstotliwości (źle zróżniczkowany), (c) średniej częstotliwości (częściowo zróżniczkowany), (d) niskiej częstotliwości (dobrze zróżniczkowany).



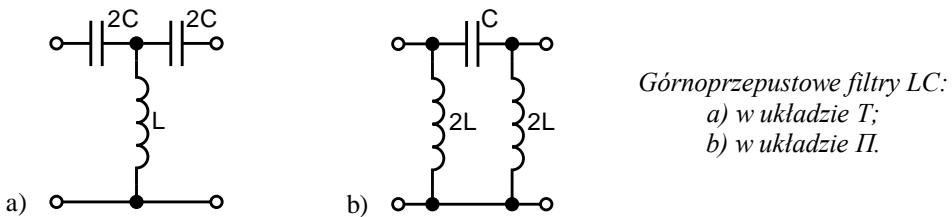
**Reaktancyjne filtry dolnoprzepustowe LC** opierają zasadę działania na zależności reaktancji poszczególnych gałęzi filtra od częstotliwości sygnału wejściowego. Kondensatory w takich filtrach umieszcza się w gałęziach równoległych, cewki w szeregowych. Na poniższym rysunku pokazano dolnoprzepustowe filtry LC w układach T (a) i  $\Pi$  (b).



Częstość graniczna w takich filtrach to:

$$f_{GR} = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}.$$

**Reaktancyjne filtry górnoprzepustowe LC** mają kondensatory w gałęziach szeregowych, zaś cewki w równoległych. Na poniższym rysunku pokazano górnoprzepustowe filtry LC w układach T (a) i  $\Pi$  (b).



Częstość graniczna w takich filtrach to:

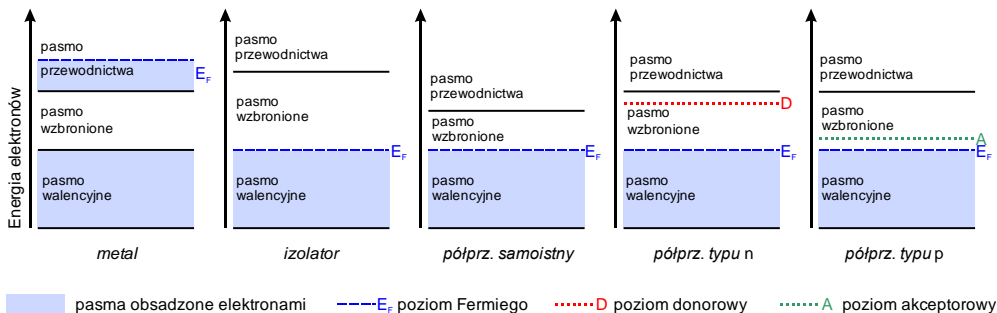
$$f_{GR} = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}}.$$

## Półprzewodnikowe elementy elektroniczne

### Przewodnictwo ciał stałych, półprzewodniki

W przyrodzie istnieje kilka grup materiałów różniących się przewodnictwem elektrycznym  $\sigma$ : metale  $10^7 - 10^4 (\Omega\text{m})^{-1}$ , półprzewodniki  $(10^4 - 10^{-8} (\Omega\text{m})^{-1})$  i izolatory  $10^{-8} - 10^{-20} (\Omega\text{m})^{-1}$ . Materiały te różnie się zachowują przy zmianach temperatury - z jej wzrostem przewodnictwo metali maleje a półprzewodników rośnie. Fizyka kwantowa wyjaśnia to różną strukturą widma energii elektronów walencyjnych. Widmo to jest pasmowe, ale nie

jest ciągle, występują w nim zakresy energii wzbronionych – nie ma elektronów o energiach w pewnych przedziałach.



*Modele pasmowe ciał stałych.*

W **metalach** najwyższe pasmo energii dozwolonych (pasmo przewodnictwa) jest tylko częściowo obsadzone. Poziom Fermiego, tj. maksymalna energia elektronów w temperaturze 0 K (kelwinów) przebiega w tym paśmie i elektrony o energiach z tego pasma mogą się w metalach przemieszczać – metal przewodzi prąd elektryczny.

W **izolatorach** poziom Fermiego znajduje się w okolicy maksimum pasma walencyjnego. Przerwa energetyczna (różnica energii między pasmem walencyjnym a przewodnictwa jest duża (kilka eV).

W **półprzewodnikach samoistnych** pasmo walencyjne, podobnie jak w izolatorach jest całkowicie obsadzone, ale szerokość przerwy energetycznej jest mniejsza i wynosi od ułamka eV do ok. 2 eV, dlatego względnie łatwo, przy niewielkim wzroście energii, część elektronów z pasma walencyjnego może przejść do pasma przewodnictwa i półprzewodnik przewodzić może wówczas prąd elektryczny.

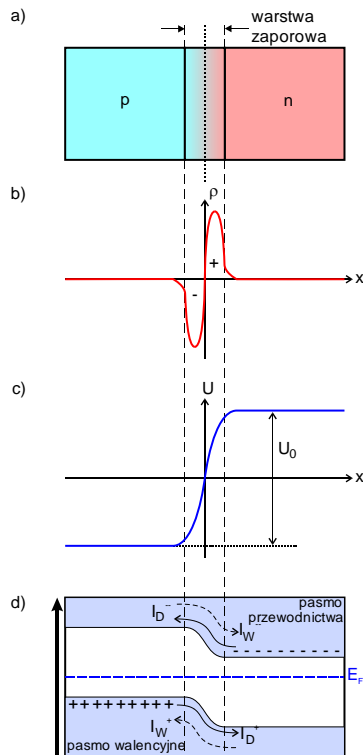
Przewodnictwo półprzewodników można mocno zwiększyć poprzez ich **domieszkowanie** czyli wprowadzenie do sieci krystalicznej pewnej ilości atomów innego, odpowiednio dobranego pierwiastka (zwykle jeden atom na setki tysięcy macierzystych). Jeśli do krystalu z IV grupy układu okresowego (np. krzemu) dodamy domieszkę z grupy V, pojawią się w sieci krystalicznej „nadmiarowe”, słabo związane elektrony. Lokalne energetyczne poziomy domieszkowe, nazywamy w tym przypadku **donorowymi**, położone są w obszarze przerwy energetycznej, ale blisko pasma przewodnictwa. Półprzewodnik taki to **półprzewodnik typu n**. Jeśli dodamy do krzemu atomy domieszki z grupy III, niektóre atomy krzemu będą miały „nadmiarowe” elektrony. W półprzewodnikach takich (**typu p**) pojawia się w paśmie wzbronionym dodatkowy poziom **akceptorowy** (blisko pasma walencyjnego). Dość łatwo może być on obsadzany przez elektrony z pasma walencyjnego i wówczas pojawiają się w nim dziury (po

elektronie) – kwazicząstki, którym przypisuje się dodatni ładunek elektryczny. Dziury są nośnikiem prądu, ale są one dużo mniej ruchliwe niż elektrony.

### Złącze *p-n*

W temperaturze dużo wyższej niż 0 K w półprzewodnikach typu *n* jest duża koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa, w półprzewodnikach typu *p* jest duża koncentracja dziur w paśmie walencyjnym. Jeśli zetkniemy

półprzewodniki typu *n* i *p* ze sobą, to elektrony dyfundują z półprzewodnika *n* do *p*, a dziury w odwrotnym kierunku. W wyniku dyfuzji znikają swobodne nośniki w pobliżu złącza a pozostają w nim nieruchome jony – ujemne po stronie typu *p*, dodatnie po stronie typu *n*. Średnia energia elektronów po stronie *n* jest mniejsza niż po stronie *p*. Układ pasm energetycznych po stronie *n* przesuwają się w dół, by zrównały się po obu stronach poziomy Fermiego i powstaje w efekcie bariera potencjału dyfuzyjnego. Pole elektryczne w złączu przeciwdziała dyfuzji nośników większościowych, sprzyja zaś dyfuzji mniejszościowych.



Na rysunku obok pokazano **niespolaryzowane złącze *p-n***: a) model złącza; b) rozkład gęstości ładunku; c) rozkład napięcia względem powierzchni granicznej; d) model pasmowy i kierunek przepływu ładunków mniejszościowych  $I_W^-$  i  $I_W^+$  oraz dyfuzja ładunków większościowych  $I_D^+$  i  $I_D^-$ .

### Polaryzacja złącza *p-n*

W stanie równowagi natężenie prądu nośników mniejszościowych  $I_M$  jest równe natężeniu prądu nośników większościowych (prądu dyfuzyjnego)  $I_D$ . Jeżeli do złącza przyłożymy napięcia tak, by wytwarzane pole elektryczne miało zgodny kierunek z polem już istniejącym w obszarze bariery potencjału (wyższy, + do *n*, zaś niższy, - do *p*, to szerokość bariery, więc i jej opór rośnie. Płyne więc przez złącze jeszcze mniej nośników

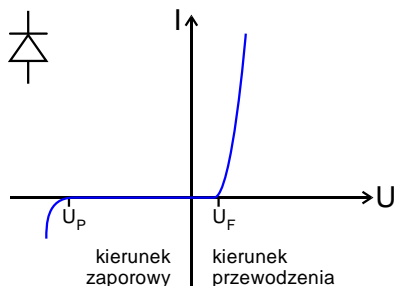


większościowych, ale dla mniejszościowych nie jest to przeszkoda (jednak jest to prąd o niewielkim natężeniu, bo tych nośników jest mało).

Jeśli do złącza przyłożymy napięcie tak, by wytwarzane pole zmniejszało lub wręcz likwidowało istniejące już pole elektryczne w obszarze złącza, to bariera staje się mniejsza i w końcu znika, zaś natężenie prądu nośników większościowych bardzo rośnie. Potencjał dodatni przyłożony do materiału typu  $p$  a ujemny do materiału typu  $n$  to potencjał przyłożony w kierunku przewodzenia (większościowego) złącz  $p-n$ .

## Diody

Złącza, w których opór w kierunku przewodzenia jest kilka rzędów mniejszy niż w kierunku zaporowym są produkowane masowo i noszą nazwę **diod półprzewodnikowych** złączowych, warstwowych, zwanych też często prostowniczymi (bo prąd w jedną stronę płynie duży, w drugą znikomy).



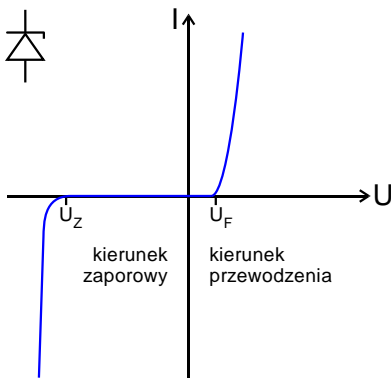
*Symbol i charakterystyka diody prostowniczej.*

Na poniższym rysunku przedstawiono symbol diody i typową charakterystykę prądowo-napięciową diody półprzewodnikowej. Prąd płynący w kierunku zaporowym nie jest zerowy, ale jest kilka rzędów wielkości mniejszy od prądu płynącego przy polaryzacji złącza w kierunku przewodzenia. Stosunkowo duży prąd w kierunku przewodzenia płynie, gdy przyłożone napięcie przekroczy wartość  $U_F$  - około 0,7 V dla najpowszechniej używanych diod krzemowych lub około 0,3 V dla diod germanowych (obecnie niemal nieprodukowanych, zastąpionych na rynku przez diody Schottky'ego, będące złączem metal-półprzewodnik, także o małym spadku napięcia w kierunku przewodzenia rzędu 0,3 V). Zbyt wysokie napięcie przyłożone do diody w kierunku zaporowym ( $>U_P$ ) sprawia, że zaczyna gwałtownie płynąć prąd i dioda zostaje bezpowrotnie zniszczona („przebita”).

## Diody o dużej koncentracji domieszek – dioda Zenera

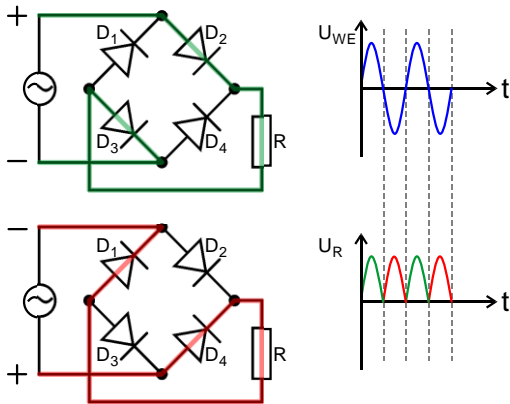
Przy bardzo dużych koncentracjach domieszek (powyżej  $10^{16} - 10^{17}$  atomów/cm<sup>3</sup>) pasma energetyczne układają się tak, że dla swobodnych nośników po drugiej stronie bariery zaporowej nie ma wolnych stanów

energetycznych. W takich złączach, gdy napięcie w kierunku zaporowym jest na tyle duże, że pasmo podstawowe półprzewodnika typu  $n$  zaczyna się pokrywać z pasmem podstawowym półprzewodnika typu  $p$ , gwałtownie wzrośnie tak zwany prąd tunelowy (Zenera)  $I_Z$ , gdyż wzrasta liczba wolnych stanów, jakie mogą być zajmowane przez swobodne nośniki po tzw. przejściu tunelowym przez warstwę zaporową. Wartość graniczna  $U_Z$ , przy której zaczyna gwałtownie płynąć prąd  $I_Z$  to napięcie Zenera. W zależności od koncentracji domieszek może ono wynosić od około 0,7 V do kilkuset V. Diody ze złączem Zenera to w elektronice po prostu diody Zenera. Symbol i charakterystyka przedstawione są na poniższym rysunku. Skoro w dużym zakresie natężeń prądu spadek napięcia na takiej diodzie (przy napięciu Zenera) jest niemal niezmienny, to diody te powszechnie stosuje się jako stabilizatory napięcia, np. w różnego rodzaju zasilaczach napięcia stałego.



*Symbol i charakterystyka diody Zenera.*

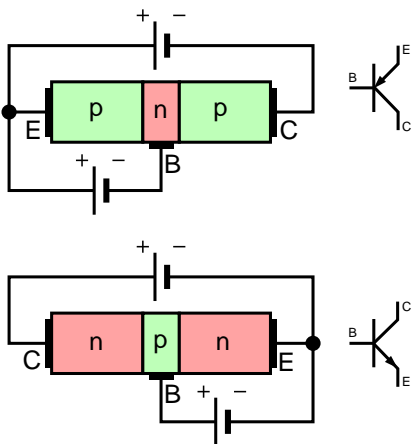
Zastosowanie diod to m.in. prostowanie prądu. Na rysunku poniżej pokazany jest tzw. mostek Graetza (tak naprawdę wynaleziony przez Karola Pollaka), zbudowany z 4 diod i służący do prostowania prądu przemiennego, podawanego na jego wejście. W zależności od aktualnej polaryzacji napięcia, przewodzi jedna ( $D_2$  i  $D_3$ ) lub druga ( $D_1$  i  $D_4$ ) para diod prostowniczych, a napięcie na odbiorniku (oporniku  $R$ ) jest zawsze spolaryzowane w tym samym kierunku.



*Prostowanie prądu na mostku Graetza: przepływ prądu przy różnych polaryzacjach napięcia wejściowego oraz przebiegi napięcia wejściowego i napięcia na odbiorniku.*

## Tranzystory bipolarne

Tranzystory bipolarne (zwane też warstwowymi) zbudowane są tak, że w jednej próbce półprzewodnika znajdują się dwa złącza  $p-n$  umieszczone w ten sposób, że wspólny obszar dla obu złącz (środkowa warstwa o innym, niż skrajne typie przewodnictwa) ma niewielką grubość rzędu  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  mm.



Modele tranzystora  $p-n-p$  i  $n-p-n$ .

Wspólny obszar nosi nazwę bazy  $B$ , zaś skrajne to kolektor  $C$  i emiter  $E$ . Jeśli baza jest wykonana z półprzewodnika typu  $n$ , to mówimy o **tranzystorze  $p-n-p$** , jeśli zaś z półprzewodnika typu  $p$ , to jest to **tranzystor  $n-p-n$** . Na rysunku obok przedstawiono modele tranzystora  $p-n-p$  oraz  $n-p-n$  spolaryzowane tak, aby przepływał przez nie prąd elektryczny (w tranzystorze  $p-n-p$  od emitera do kolektora, w tranzystorze  $n-p-n$  od kolektora do emitera) oraz symbole tych tranzystorów.

Rozpatrzmy **zasadę działania tranzystora bipolarnego** na przykładzie tranzystora  $p-n-p$ . Przyjmijmy, że koncentracja domieszek akceptorowych w kolektorze i emiterze jest dużo większa od koncentracji donorowych w bazie. Przyjmijmy, że baza jest odpowiednio szeroka by w stanie równowagi oba złącza na siebie nawzajem nie oddziaływały. W takiej sytuacji swobodne nośniki poruszają się w obu złączach jak we wcześniej omawianym pojedynczym złączu  $p-n$ ., więc natężenia prądów dyfuzyjnych i prądów wstecznych są sobie równe.

W normalnych warunkach pracy tranzystora złącze kolektorowe polaryzuje się w kierunku zaporowym, zaś złącze emiterowe w kierunku przewodzenia.

Po przyłożeniu ujemnego napięcia  $U_{BE}$  do bazy względem emitera poprzez złącze bazy płynie prąd nośników większościowych, bo obniżyła się bariera potencjału dyfuzyjnego i zmniejszyła szerokość emiterowej warstwy zaporowej. Prąd ten to suma prądu dyfundujących dziur  $I_E^+$  z emitera do bazy i dyfundujących w przeciwnym kierunku elektronów  $I_B^-$ , przy czym prąd dziur jest o wiele większy od prądu elektronów, bo koncentracja dziur w emiterze jest dużo większa niż elektronów w bazie.

Gdyby tylko złącze kolektorowe było spolaryzowane (zaporowo) to płyną by w nim niewielki prąd wsteczny związany z przepływem nośników mniejszościowych.

Gdy oba złącza są spolaryzowane jednocześnie, to dziury, które przedyfundowały z emitera do bazy są w niej nośnikami mniejszościowymi. Przechodzą one do obszaru kolektora z powodu wpływu na nie pola elektrycznego warstwy zaporowej przy złączu kolektorowym. Przy pewnej, niewielkiej wartości napięcia  $U_{CB}$  między kolektorem a bazą wszystkie dziury z emitera przechodzą do kolektora i tworzą prąd kolektora  $I_C^+$ . Natężenie tego prądu zależy od ilości wstrzykiwanych z emitera dziur, więc od prądu  $I_E$ , niewiele zaś zależy od napięcia  $U_{CB}$ . Mówimy, że prąd emitera  $I_E$  steruje prądem kolektora  $I_C$ . Można zapisać:

$$I_C^+ = \alpha I_E.$$

Zależność zmian prądu  $I_C$  od zmian prądu  $I_B$  można zapisać też, posługując się współczynnikiem  $\beta$ :

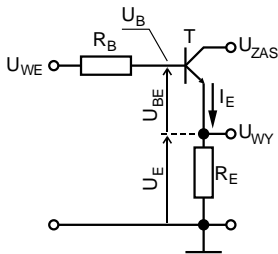
$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Wartość  $\beta$  rośnie wraz ze wzrostem  $U_{CE}$  i dla większości tranzystorów wynosi między 30 a 200.

### **Wzmacniacze tranzystorowe**

Fakt, że w tranzystorze bipolarnym prądem bazy  $I_B$  sterują się prąd kolektora  $I_C$ , wykorzystuje się przede wszystkim we wzmacniaczach tranzystorowych. Spośród różnych możliwych układów (konfiguracji) wzmacniaczy zbudowanych na 1 tranzystorze, 3 mają zastosowanie praktyczne i są mniej lub bardziej powszechnie stosowane. Są to wzmacniacze w układach ze wspólnym kolektorem, wspólnym emiterem i wspólną bazą.

1) **Wzmacniacz ze wspólnym kolektorem** (WK, *ang.* OC). Wzmacniacz przedstawiony jest na poniższym rysunku.



*Wzmacniacz  
w układzie  
wspólnego kolektora.*

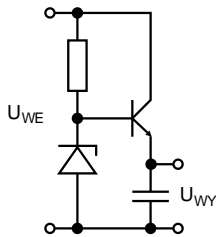
Wejściem tego wzmacniacza jest baza, zaś wyjściem emiter tranzystora. Rozpatrzmy 3 różne przypadki:

a) jeżeli spolaryzujemy bazę tranzystora napięciem  $U_B$  mniejszym, niż spadek napięcia  $U_{BE}$  na przewodzącym złączu baza-emiter (typowo 0,6 V), to przez złącze baza-emiter nie będzie płynął prąd  $I_{BE}$ . W związku z powyższym nie będzie płynął także prąd między kolektorem i emiterym  $I_C$ , więc prąd emitery  $I_E$  (suma  $I_B$  i  $I_C$ ) jest w takim przypadku zerowy i spadek napięcia  $U_E$  na rezystorze  $R_E$  także wynosi 0 V. Mówimy, że w takiej sytuacji **tranzystor jest zatkany** i wzmacniacz nie działa.

b) jeżeli spolaryzujemy bazę tranzystora pewnym dodatnim napięciem  $U_B$  ( $U_B > U_{BE}$  i  $U_B < U_{ZAS} + U_{BE}$ ), to na emiterze będziemy mieli napięcie  $U_E = U_B - U_{BE}$  (niższe od  $U_B$  o spadek napięcia na złączu baza-emiter  $U_{BE}$ ). Przez opór  $R_E$  będzie płynął prąd o natężeniu  $I_E = U_E/R_E$ . Zwróćmy uwagę, że gdy będziemy zmieniać napięcie  $U_B$  we wspomnianym wyżej zakresie, to napięcie na emiterze  $U_E$  zawsze będzie podążać za napięciem na bazie  $U_B$ , dlatego taki układ nazywamy także **wtórnikiem emiterowym**.

c) jeżeli napięcie na bazie  $U_B$  przekroczy o  $U_{BE}$  napięcie zasilające  $U_{ZAS}$ , to napięcie  $U_{CE}$  będzie bliskie zeru (mniej niż 0,1 V) i tranzystor będzie całkowicie otwarty ( $U_E$  praktycznie równe  $U_C$ ), zaś przez  $R_E$  będzie płynął prąd o natężeniu  $I_E = U_C/R_E$ . Wzmacniacz WK stracił swoją podstawową cechę i  $U_E$  nie podąża już za  $U_B$ . Mówimy, że **wzmacniacz został nasycony**. Można zapytać, po co budować wzmacniacz, który gdy pracuje, ma wzmocnienie napięciowe mniejsze od 1 ( $U_E = U_B - U_{BE}$ )? Podstawową zaletą układu WK jest duże ( $\beta+1$ ) wzmocnienie prądowe takiego układu. Opór wejściowy takiego wzmacniacza (opór jaki ma wzmacniacz „widziany” od strony źródła sygnału) jest około  $\beta$  razy większy niż jego opór wyjściowy.

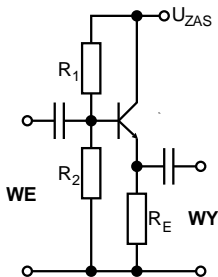
Przykład użycia wzmacniacza WK pokazany jest na rysunku poniżej.



*Wtórnik emiterowy  
w stabilizatorze napięcia.*

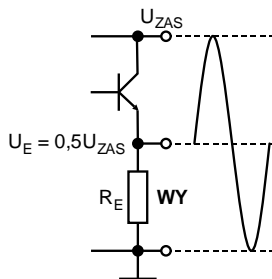
Niestabilne napięcie  $U_{WE}$  podawane jest na szeregowo połączony rezystor  $R$  z diodą Zenera  $Z$ . Napięcie na diodzie  $Z$  ma już stabilną wartość, ale z takiego źródła nie można pobierać zbyt dużego prądu ze względu na opór  $R$ , ograniczający jego natężenie. Dzięki zastosowaniu tranzystora  $T$  w układzie wtórnika emiterowego, można pobierać ze stabilizatora prąd  $\beta$  razy większy, niż gdyby tego wtórnika nie było. Kondensator  $C$  na wyjściu dodatkowo stabilizuje wartość napięcia wyjściowego  $U_{WY}$ .

Wzmacniacz ze wspólnym kolektorem może wzmacniać także sygnały zmienne. Taki wzmacniacz jest narysowany na poniższym rysunku i różni się od poprzednio pokazanego przede wszystkim kondensatorami na wejściu i wyjściu, które odcinają składową stałą napięcia a przenoszą tylko zmienną.



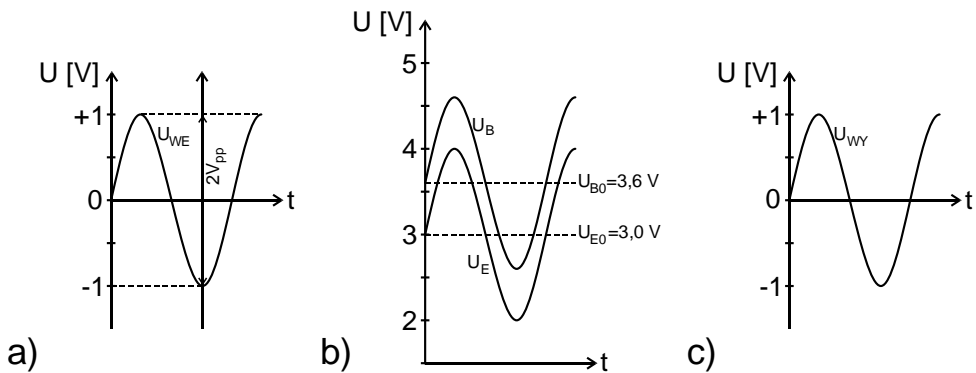
*Wzmacniacz  
w układzie  
wspólnego kolektora  
dla prądów zmiennych.*

Punkt pracy wzmacniacza ustalony jest dzielnikiem rezystorowym ( $R_1$  i  $R_2$ ) i od razu można tu powiedzieć, że optymalną sytuacją jest ustalenie tego punktu pracy tak, by na spadek napięcia na oporniku  $R_E$  miał wartość  $U_{E0} = U_{ZAS}/2$  (patrz poniższy rysunek).

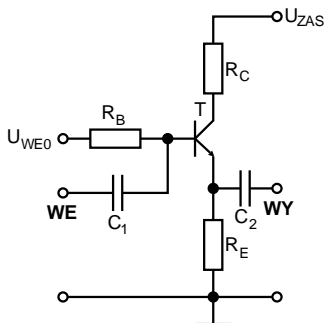


*Optymalny  
punkt pracy  
wzmacniacza.*

Założmy, że składowa zmienna napięcia podawanego z zewnętrznego źródła na kondensator wejściowy ma amplitudę międzyszczytową  $U_{PP}$ . Napięcie na bazie zmienia się zatem w zakresie od  $U_{B0} - U_{PP}/2$  do  $U_{B0} + U_{PP}/2$ . Napięcie na emiterze  $U_E$  jest zawsze o  $U_{BE}$  niższe od  $U_B$  (jeśli tylko tranzystor nie został zatkany lub nasycony z powodu chwilowej zbyt niskiej lub zbyt wysokiej wartości napięcia wejściowego), zaś po odcięciu składowej stałej  $U_{E0}$  napięcia na emiterze przez kondensator wyjściowy  $C_{WY}$ , napięcie na wyjściu  $U_{WY}$  ma dokładnie taką samą amplitudę jak napięcie wejściowe. Zyskiem jest mały opór wyjścia w porównaniu z wejściem wzmacniacza. Rysunki poniżej ilustrują przebiegi napięć zmiennych na wejściu (a), bazie oraz emiterze (b) i wyjściu (c) wzmacniacza prądu zmiennego w układzie ze wspólnym kolektorem, gdzie amplituda sygnału  $U_{PP}$  wynosi 2 V, a punkt pracy  $U_{E0}$  ustalony jest na 3 V.



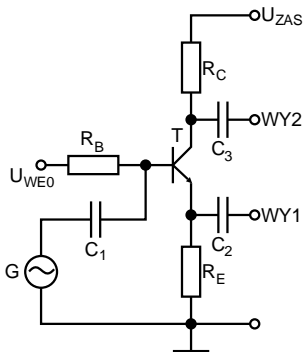
2) **Wzmacniacz ze wspólnym emiterem (WE, ang. OE).** Wejściem tego wzmacniacza jest baza tranzystora, zaś wyjściem jego kolektor. Poniższy rysunek przedstawia rozpatrywany wcześniej wzmacniacz prądu zmiennego w układzie WK z dodatkowym rezystorem  $R_C$  między kolektorem a źródłem napięcia  $U_{ZAS}$ .



Wzmacniacz WK  
z dodatkowym  
rezystorem  $R_C$ .

Jest to niewątpliwie nadal wzmacniacz WK (wyjściem jest emiter). Jeżeli  $R_C$  ma niewielką wartość w porównaniu z  $R_E$  to zmalała tylko nieco wartość napięcia, przy którym wzmacniacz będzie nasycony, bowiem na  $R_C$  odkłada się napięcie o wartości  $I_C$  razy  $R_C$ . Przy dużym współczynniku  $\beta$ ,  $I_C$  jest tylko nieco wyższe od  $I_E$  (o wartość  $I_B$ ), zatem w przybliżeniu spadek napięcia na  $R_C$  wynosi  $I_E$  razy  $R_C$ .

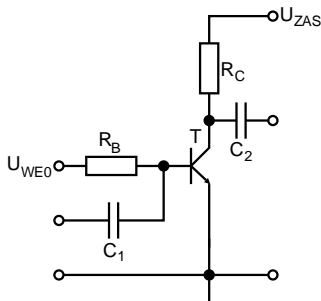
Jeżeli  $R_C$  ma wartość równą  $R_E$ , to na  $R_C$  spada praktycznie takie samo napięcie jak na  $R_E$ . Żeby wzmacniacz się nie nasycał, trzeba zmienić wartość punktu pracy czyli obniżyć  $U_{B0}$  (optymalnie tak, by spełnić zależność  $U_{E0} = U_{ZAS}/4$ ). Po podaniu na wejście takiego wzmacniacza sygnału zmiennego, amplitudy sygnałów na kolektorze i emiterze są równe, ale sygnał na kolektorze na odwróconą fazę (gdy na emiterze napięcie rośnie, to na kolektorze spada, gdyż napięcie na kolektorze  $U_C = U_{ZAS} - U_C = U_{ZAS} - U_E$  (w przybliżeniu)). Jeżeli potraktujemy teraz kolektor jako wyjście, to otrzymany wzmacniacz jest układem WE o wzmacnieniu 1.



*Wzmacniacz WK (wyjście WY1)  
i jednocześnie WE (wyjście WY2).*

Jeżeli  $R_C$  ma wartość większą niż  $R_E$ , to wzmacnienie  $K$  też jest większe niż 1, w przybliżeniu wynosi  $K = R_C/R_E$ .

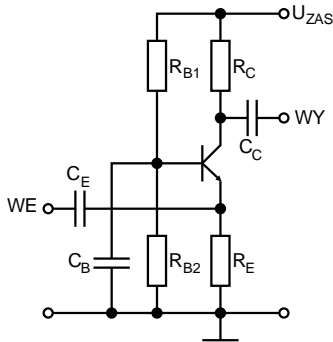
Gdyby z takiego wzmacniacza usunąć w ogóle opór  $R_E$  (patrz rysunek poniżej), to otrzymany wzmacniacz będzie oczywiście wzmacniaczem OE, ale układ taki będzie mało stabilny i niepraktyczny.



*Niepraktyczny wzmacniacz WE bez  
rezystora między emiterem a masą.*



3) **Wzmacniacz ze wspólną bazą (WB, ang. OB).** Wejściem tego wzmacniacza jest emiter, a wyjściem kolektor tranzystora. Wzmacniacz w konfiguracji WB pokazany jest na poniższym rysunku.

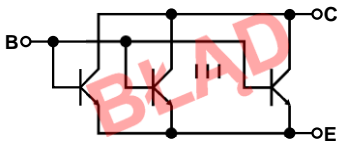


*Wzmacniacz prądu zmiennego ze wspólną bazą WB).*

We wzmacniaczu tym chwilowe odchylenia od wartości spoczynkowej napięcia na emiterze sprawiają, że zmienia się także chwilowo natężenie prądu  $I_E$ . Ponieważ  $I_C$  jest niemal równe  $I_E$ , to zmiany napięcia na kolektorze (i wzmocnienie napięciowe  $K$ ) mają amplitudę większą  $K = R_C/R_E$  razy niż na emiterze.

### Łączenie tranzystorów

Czasami może być przydatne równoległe połączenie 2 lub więcej takich samych tranzystorów, aby np. dzięki takiemu układowi zwiększyć (z wielokrotności) maksymalne natężenie prądu kolektora. Wydawać by się mogło, że wystarczy połączyć ze sobą wszystkie emitory, osobno wszystkie kolektory i, osobno, wszystkie bazy, by otrzymać układ, który zastąpi pojedynczy tranzystor, ale umożliwi sterowanie prądem o odpowiednio większym natężeniu. Takie rozwiązanie, pokazane na rysunku poniżej, nie będzie niestety działać prawidłowo.

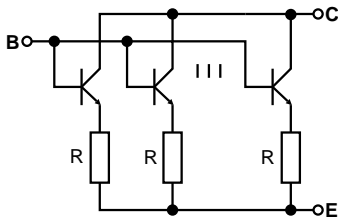


*Błędne równoległe połączenie tranzystorów.*

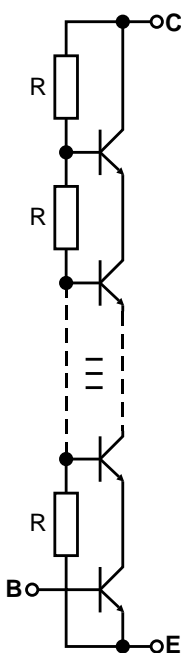
Nawet próba dobrania selekcyonowanych tranzystorów jednego modelu, z jednej serii produkcyjnej nic nie da – każdy egzemplarz nieco się różni. Jeżeli przez jeden z tranzystorów będzie płynął prąd nieco większy niż przez inne, to nagrzej się on mocniej od innych. Wzrost temperatury spowoduje spadek napięcia  $U_{BE}$ , a przy stałym napięciu – wzrost prądu  $I_B$ , a zatem też prądu  $I_C$ . Będzie rosła tracona moc i dale wzrośnie temperatura. Skończy się to przejściem przez jeden tranzystor całego prądu, który gdy przekroczy

maksymalny dopuszczalny, uszkodzi tranzystor. Jeśli będzie w wyniku uszkodzenia zwarty, to całe urządzenie przestanie działać, jeśli, co bardziej prawdopodobne, rozewrze, to pierwotny prąd będzie rozdzielony na mniejszą już liczbę tranzystorów i jeszcze szybciej zakończy się to uszkodzeniem kolejnego itd.

Aby zapobiec opisanej wyżej sytuacji, wystarczy dodać niewielkie, identyczne rezystory w obwodach emiterów. Tak należy dobrać ich opór, by przy największym spodziewanym natężeniu prądu spadek napięcia wynosił ok. 0,2 – 0,3 V. To wystarczy, by moc w tranzystorach rozkładała się równomiernie i do awarii nie doszło.



*Prawidłowe równoległe połączenie tranzystorów.*



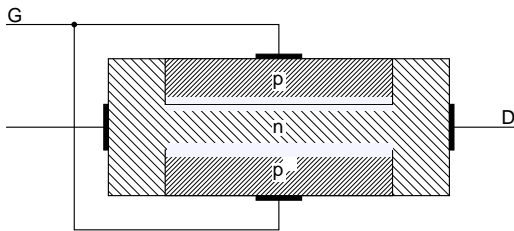
Zazwyczaj nie ma potrzeby szeregowego łączenia tranzystorów. Gdyby jednak się okazało, że trzeba połączyć kilak tranzystorów by uzyskać układ na wyższe napięcie, można to zrobić zgodnie z zamieszczonym obok schematem. Lepszy wyjściem jest jednak zakup pojedynczego tranzystora na odpowiednio wysokie napięcie.

*Szeregowe łączenie tranzystorów.*

## Tranzystory polowe

Inną grupą tranzystorów są tranzystory polowe, które dzielimy na tranzystory polowe złączowe i tranzystory z izolowaną bramką.

**Tranzystor polowy złączowy (JFET)** składa się z 3 warstw półprzewodników domieszkowanych, przy czym warstwa środkowa ma inny typ przewodnictwa niż zewnętrzne i nazywana jest kanałem. Na obu końcach kanału są doprowadzenia elektryczne, dzięki którym przez kanał może przepływać prąd. Połączone ze sobą połączenia elektryczne, nazywane bramką i oznaczane literą  $G$  (*gate*) doprowadzone są także do warstw zewnętrznych. Układ 3 warstw daje 2 złącza  $p$ - $n$ , zaś warstwy przy złączach pozbawione są (gdy złącza nie są spolaryzowane) swobodnych nośników prądu.



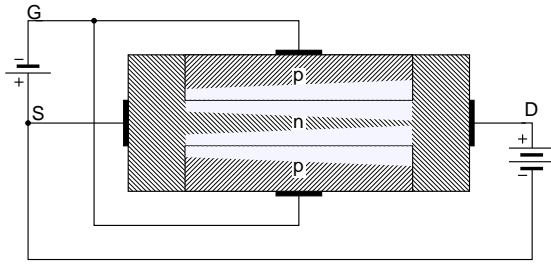
*Niespolaryzowany tranzystor polowy złączowy (JFET).*

Zmiana napięcie przykładanego między elektrody na końcach kanału a bramkę  $G$  może zmieniać szerokość obszaru pozbawionego nośników, co zmienia też szerokość kanału w środkowej warstwie, gdzie są te nośniki.

Gdy przyłożymy odpowiednio duże napięcie polaryzujące złącza w kierunku przewodzenia, to kanał się poszerzy do maksymalnej szerokości i jego opór będzie minimalny, zaś odpowiednio duże napięcie przyłożone w kierunku zaporowym sprawi, że kanał zostanie całkowicie zamknięty.

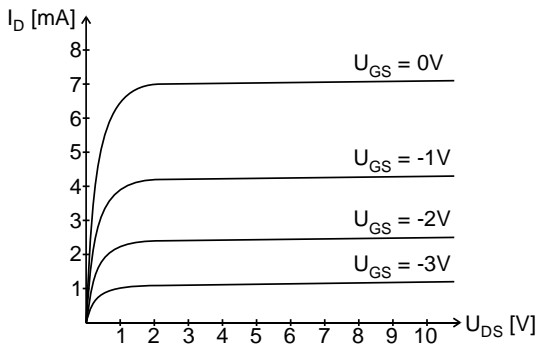
W tranzystorze z kanałem typu  $n$  spolaryzujemy złącze zaporowo, przykładając napięcie niższe niż do kanału. Jeśli przez kanał płynął prąd (bo było przyłożone napięcie między jego końcami), to obniżając napięcie na bramce  $G$  zwiększamy opór kanału i przy pewnym napięciu go zamykamy. Zwykle rozróżnia się doprowadzenia kanału. To, do którego przykładamy wyższe napięcie to dren  $D$ , drugie to źródło  $S$  (*source*). Napięcie polaryzujące bramkę  $G$  przykładamy między  $G$  a  $S$ . Ilustruje to kolejny rysunek. Miejsca niezakreskowane na rysunku to obszary pozbawione nośników.

W pobliżu źródła  $S$  na szerokość warstwy zaporowej wpływa tylko napięcie  $U_{GS}$ , natomiast przy drenie szerokość ta zależy od sumy  $U_{GS}$  i  $U_{DS}$  i jest w ogólności większa, zaś kanał jest węższy i ma większy opór. Prąd płynąć może tylko przez wąski obszar zwany drenem (stąd też nazwa doprowadzenia).



*Tranzystor polowy  
złączowy (JFET)  
ze spolaryzowanymi  
wyprowadzeniami.*

Jeśli zwiększamy wartość  $U_{GS}$ , to przy pewnej wartości granicznej (napięcie odcięcia)  $U_{GS_{odc}}$  prąd w ogóle przestanie płynąć. Można by sądzić, że gdy  $U_{GS}$  ma wartość mniejszą niż graniczną, za to gdy odpowiednio duża będzie wartość  $U_{DS}$ , to też prąd przestanie płynąć. Tak się jednak nie dzieje, duże natężenie pola elektrycznego w obszarze drenu sprawia, że pewien prąd (prąd drenu) dalej płynie a jego natężenie praktycznie nie rośnie już przy dalszym wzroście  $U_{DS}$ . Kanał można zamknąć całkowicie tylko odpowiednio dużym, ujemnym napięciem  $U_{GS}$ . Typowa charakterystyka tranzystora JFET pokazana jest na poniższym wykresie.

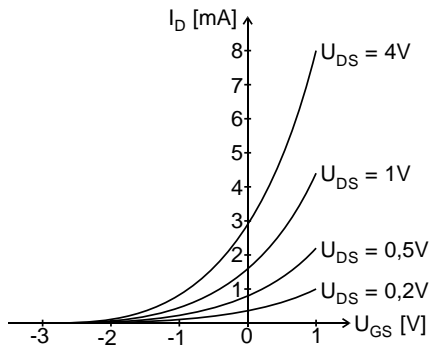


*Przykładowa zależność natężenia prądu drenu  $I_D$  od napięcia  $U_{DS}$  przy różnych wartościach  $U_{GS}$  dla tranzystora JFET.*

Niewielka dodatnia polaryzacja bramki sprawia, że płynie w kanale prąd większy, niż przy braku polaryzacji, natomiast gdy napięcie  $U_{GS}$  przekroczy  $+0,6$  V, to gwałtownie zacznie płynąć prąd przez łącza i tranzystor traci własności wzmacniające. Przykładowe zależności natężenia prądu drenu  $I_D$  od napięcia  $U_{GS}$  dla różnych wartości  $U_{DS}$  pokazane są na kolejnym wykresie.

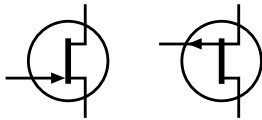
Zaznaczyć trzeba, że normalnie, przy ujemnie spolaryzowanej bramce  $G$ , opór wejściowy tej bramki dla prądu stałego jest bardzo duży, rzędu  $10^9 \Omega$ .

Wszystkie powyższe rozważania będą słuszne także dla tranzystorów JFET z kanałem typu  $p$ , jeśli tylko będziemy wówczas pamiętać o odwrotnej polaryzacji złącz.



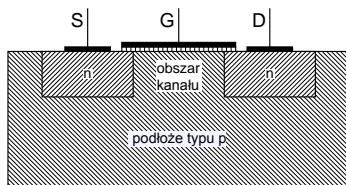
Przykładowa zależność natężenia prądu drenu  $I_D$  od napięcia  $U_{GS}$  przy różnych wartościach  $U_{DS}$  dla tranzystora JFET.

Symbole obydwu wersji tranzystora JFET (z kanałem typu  $n$  i typu  $p$ ) pokazane są na poniższym rysunku.



Symbole tranzystorów JFET:  
z kanałem typu  $n$  (z lewej)  
i kanałem typu  $p$  (z prawej).

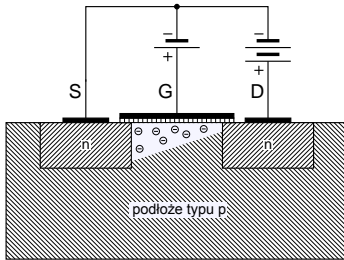
**Tranzystor polowy z izolowaną bramką (MOSFET)** zbudowany jest w taki sposób, że na podłożu z półprzewodnika (zwykle domieszkowanego krzemu) o określonym typie przewodnictwa znajdują się 2 silnie domieszkowane, rozdzielone obszary o przeciwnym typie przewodnictwa. Do obszarów tych (drenu  $D$  i źródła  $S$ ) przyłączone są wyprowadzenia. Pomędzy tymi obszarami na podłożu naniesiona jest cienka warstwa izolatora (zwykle tlenek krzemu) i trzecia elektroda, bramka  $G$ . W obszarze między drenem  $D$  a źródłem  $S$  może być wytwarzany (albo tylko indukowany) kanał tranzystora. Jeśli podłożo jest typu  $p$ , to kanał będzie typu  $n$  i odwrotnie. Schemat budowy tranzystora MOSFET pokazany jest na poniższym rysunku.



Tranzystor z izolowaną bramką (MOSFET)  
o podłożu typu  $p$ .

Jeżeli pomiędzy drenem  $D$  a źródłem  $S$  jest niezmiennione podłożo typu  $p$ , to po przyłożeniu do bramki  $G$  dodatniego potencjału względem źródła  $S$  zostanie wyindukowany kanał typu  $n$ , gdyż z obszaru pod izolatorem zostaną odepchnięte dziury a przyciągnięte elektrony. Koncentracja elektronów w kanale i jego szerokość rośnie wraz ze zwiększaniem dodatniego potencjału na bramce  $G$  i dlatego opór kanału maleje. Jeżeli pomiędzy drenem a źródłem przyłożone było napięcie, to popłynie między nimi prąd

elektryczny. Kanał, podobnie jak w tranzystorze JFET nie ma jednakowej szerokości na całej długości, ale jest szerszy tam, gdzie różnica napięć jest większa, czyli w pobliżu źródła. Ilustruje to poniższy rysunek.

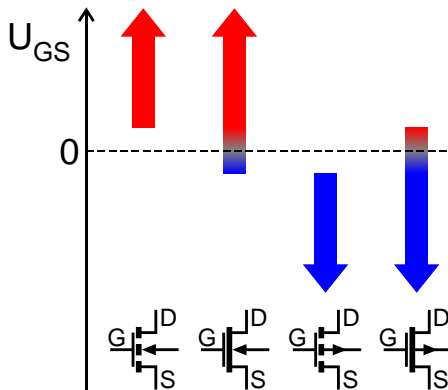


*Spolaryzowany tranzystor MOSFET z wyindukowanym kanałem typu n.*

Tranzystory MOSFET produkowane są też w wersji, w której kanał istnieje bez przyłożonego do bramki napięcia. Uzyskuje się to domieszkując obszar kanału tym samym rodzajem domieszki co dren i źródło, tylko o mniejszej koncentracji. Odpowiednia polaryzacja bramki może w takim tranzystorze albo zmniejszyć opór kanału, albo go zwiększyć lub wręcz kanał zamknąć, co spowoduje, że prąd między drenem a źródłem nie będzie płynął mimo przyłożonego między te elektrody napięcia.

Tranzystory na podłożu typu *n* to zwierciadlane odpowiedniki omówionych wyżej tranzystorów na podłożu typu *p*.

Poniższy rysunek przedstawia symbole wszystkich 4 rodzajów tranzystorów MOSFET i, pogładowo, zakres napięć, przy których są one otwarte.



*Przedziały napięć  $U_{GS}$ , przy których są otwarte i symbole tranzystorów MOSFET, kolejno od lewej:*

- z kanałem n, wzbogacony;
- z kanałem n, zubożony;
- z kanałem p, wzbogacony,
- z kanałem p, zubożony.

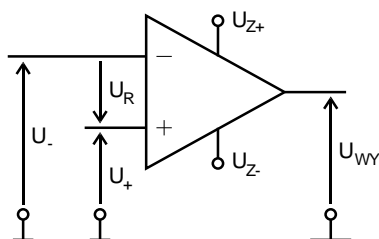
Podkreślić trzeba, że z powodu izolowanej bramki tranzystory te mają bardzo duży opór wejściowy, np.  $10^{13} \Omega$  dla napięć stałych. Dla zmiennych opór już nie jest tak duży, bo bramkę tranzystora MOSFET można traktować jak kondensator, który w takim wypadku musi być naprzemiennie ładowany ładunkami o przeciwnych znakach. Duży opór wejściowy, zwykle pożądanym, ma w tych tranzystorach pewien ujemny efekt uboczny. Ponieważ izolacja

jest bardzo cienka, a prąd w praktyce nie może przez nią przepływać, to dość łatwo o elektrostatyczne przebicie bramki  $G$  (napięcia elektrostatyczne rzędu kilku kV nie są rzadkością np. na ciele czy ubraniu człowieka), zwłaszcza, gdy tranzystor nie jest jeszcze wlutowany w docelowe urządzenie.

## Wzmacniacz operacyjny

Pod pojęciem **wzmacniacza operacyjnego** (ang. *operational amplifier*, *op-amp*) rozumiemy układ różnicowego (a więc mającego dwa wejścia) wzmacniacza napięciowego o bardzo dużym współczynniku wzmocnienia, posiadającego zwykle jedno wyjście. Na wyjściu wzmacniacza operacyjnego otrzymujemy napięcie (mierzone względem masy całego układu, w którym umieszczony jest wzmacniacz operacyjny) typowo kilkaset tysięcy razy większe, niż różnica napięć pomiędzy jego wejściami (o ile wzmacniacz nie jest *nasycony*, o czym później).

Wzmacniacze operacyjne produkowane są zwykle w postaci układów scalonych, zawierających jedno lub czasem kilka takich urządzeń w jednej obudowie, przez dziesiątki różnych producentów w zapewne tysiącach różnych modeli i wersji, optymalizowanych często do konkretnych zastosowań. Wzmacniacze te znalazły jednak zastosowanie jako powszechnie używane układy w elektronice analogowej ze względu na swoją uniwersalność. Dokładając do wzmacniacza zaledwie kilka zewnętrznych elementów można w prosty sposób zbudować wiele praktycznych aplikacji, z których większość wykorzystuje pętlę ujemnego sprzężenia zwrotnego.



Symbol wzmacniacza operacyjnego wraz z oznaczeniami napięć wejściowych, wyjściowego i zasilających.

Symbol wzmacniacza operacyjnego przedstawiony jest na rysunku. Czasami rysuje się też dodatkowe wyprowadzenia, jeżeli konkretny model wzmacniacza je posiada (zwykle tylko, gdy te wyprowadzenia są w konkretnej aplikacji wzmacniacza rzeczywiście używane). Często, zwłaszcza na schematach ideowych, pomija się dla uproszczenia

doprowadzenia zasilania do wzmacniacza.

Wejście różnicowe składa się z wejścia nieodwracającego (+), do którego przykładamy napięcie oznaczane jako  $U_+$  i odwracającego (-), do którego przykładamy napięcie  $U_-$ . Wzmacniacz wzmacnia różnicę napięć  $U_R$  pomiędzy tymi wejściami. Napięcie wyjściowe wzmacniacza wyraża wzór:

$$U_{WY} = K_{OP} (U_+ - U_-) = K_{OP} U_R,$$

gdzie  $K_{OP}$  oznacza wzmocnienie wzmacniacza przy otwartej pętli czyli bez ujemnego sprzężenia zwrotnego.

Pomimo że napięcia zasilające wzmacniacz noszą zwykle nazwę dodatniego ( $U_{Z+}$ ) i ujemnego ( $U_{Z-}$ ), nie oznacza to wcale (choć najczęściej tak jednak jest), że pierwsze z nich musi być dodatnie względem masy, a drugie ujemne. To nazywane dodatnim musi być po prostu wyższe od zwanego ujemnym, ale oba mogą mieć zarówno polaryzację dodatnią, jak i ujemną względem masy. Dość często spotyka się wzmacniacze zasilane z pojedynczego, dodatniego źródła napięcia, wejście zasilania zwane ujemnym jest wówczas po prostu połączone z masą układu (trzeba zauważyć, że scalone wzmacniacze operacyjne nie mają w ogóle wyprowadzenia służącego do podłączania masy).

**Wzmacniacz z otwartą pętlą** charakteryzują się tym, że stosunkowo niewielka różnica napięć pomiędzy oboma wejściami sprawia, że napięcie na wyjściu jest bliskie dodatniemu napięciu zasilającemu wzmacniacz (gdy  $U_+ > U_-$ ) lub ujemnemu napięciu zasilającemu (gdy  $U_+ < U_-$ ). W takiej sytuacji mówi się, że wzmacniacz jest nasycony. Ponieważ współczynnik  $K_{OP}$  zwykle nie jest dokładnie określony (roźni się między modelami, ale także między konkretnymi egzemplarzami danego modelu, zależy częściowo np. od aktualnej temperatury układu itd. itp.), to nie buduje się praktycznie wzmacniaczy różnicowych o stałym i dobrze określonym współczynniku wzmocnienia bez pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego.

Brak sprzężenia zwrotnego ogranicza w zasadzie funkcjonalność wzmacniacza operacyjnego do roli komparatora napięć (układu, który porównuje dwa napięcia na dwu swoich wejściach i podaje na wyjściu informację, które z nich jest większe).

**Wzmacniacz z pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego** to taki wzmacniacz, w którym napięcie z jego wyjścia lub część tego napięcia podawane jest na wejście odwracające wzmacniacza. Ujemne sprzężenie zwrotne zmniejsza współczynnik wzmocnienia układu do wartości zależnej od elementów znajdujących się w pętli i/lub dołączonych do niej i jeżeli wartości oporów tych elementów są istotnie mniejsze niż wartości oporów wejściowych



wzmacniacza operacyjnego, to współczynnik wzmocnienia obwodu staje się niezależny od  $K_{OP}$ .

**Idealny wzmacniacz operacyjny** (gdyby naprawdę istniał), charakteryzowałyby następujące parametry:

- nieskończona wartość współczynnika wzmocnienia przy otwartej pętli  $K_{OP}$ ;
- nieskończone wartości oporu wejść, a więc też zerowe natężenia prądów wejściowych;
- zerowe napięcie niezrównoważenia (offsetu);
- zerowy opór wyjściowy;
- nieograniczony zakres napięć na wyjściu;
- pasmo przenoszenia sygnałów od częstości zerowej (napięcia stałe) do częstości nieskończenie dużej;
- brak szumów na wyjściu;
- niewrażliwość na zmiany napięć zasilających.

Taki idealny wzmacniacz w obecności pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego zawsze dawałby na wyjściu takie napięcie, by różnica napięć między wejściami była zerowa.

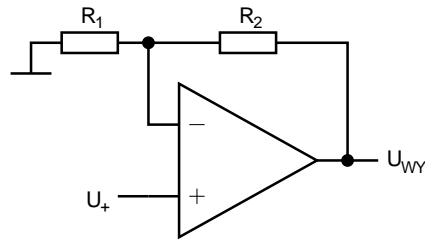
**Rzeczywiste wzmacniacze operacyjne** charakteryzują m.in.:

- duży, ale skończony współczynnik wzmocnienia wzmacniacza z otwartą pętlą (rzędu setek tysięcy, czasem nawet milionów);
- duże, ale skończone opory wejściowe (zwykle rzędu  $10^6 \Omega$ , gdy stopień wejściowy zbudowany jest w oparciu o tranzystory bipolarne do  $10^{12} \Omega$ , gdy w stopniu wejściowym są tranzystory polowe typu MOSFET; specjalne, ultraszybkie wzmacniacze mogą mieć opory zaledwie setek  $\Omega$ , zaś specjalne wzmacniacze używane do konwertowania bardzo małych prądów na napięcie (tzw. wzmacniacze elektrometryczne) mają opory wejściowe rzędu nawet  $10^{15} \Omega$ ;
- niezerowe, wynoszące typowo kilka  $\mu V$  od kilku mV, napięcie niezrównoważenia (offset); taki offset sprawia, że przy dużym współczynniku wzmocnienia wzmacniacz będzie nasycony nawet wtedy, gdy do obu wejść przyłożymy to samo napięcie (np. wejścia zewrzemy); wiele rzeczywistych wzmacniaczy posiada specjalne wyprowadzenia, umożliwiające kompensowanie offsetu;
- skończony opór wyjściowy, pozwalający pobierać z wyjścia typowo prąd o natężeniu kilkudziesięciu mA; specjalne wzmacniacze, np. OPA549 pozwalają pobierać z wyjścia prąd o natężeniu nawet do 10A;
- zakres możliwych do uzyskania napięć na wyjściu w typowych aplikacjach jest ograniczony (i zwykle nieco mniejszy) do zakresu napięć zasilających;

- pasmo przenoszonych częstotliwości zależnie od modelu jest ograniczone typowo od kilku MHz do kilku GHz;
- szумы zależne głównie od częstotliwości przenoszonych sygnałów;
- dobra, ale nie całkowita niezależność od zmian napięć zasilających;
- dryft temperaturowy, skutkujący pewną zależnością praktycznie wszystkich parametrów wzmacniacza od temperatury;
- nieliniowa zależność napięcia wyjściowego od różnicy napięć wejściowych; cecha ta w obecności sprzężenia zwrotnego, ograniczającego współczynnik wzmocnienia, ma niewielkie znaczenie.

Typowe **aplikacje wzmacniaczy operacyjnych**, jak wspomniano, zawierają pętlę ujemnego sprzężenia zwrotnego. Rozpatrując je będziemy przyjmować kilka założeń słusznych dla wzmacniacza idealnego, w przybliżeniu tylko realizowanych w rzeczywistych wzmacniaczach.

a) **wzmacniacz nieodwracający**;



Do wejścia (+) przykładamy napięcie  $U_+$ . Przy ujemnym sprzężeniu zwrotnym takie samo napięcie mamy na wejściu (-). Pozwala to wyliczyć natężenia prądu płynącego przez opornik  $R_1$  do masy:

$$I = \frac{U_+}{R_1}.$$

Ponieważ wejście (-) ma w przybliżeniu nieskończony opór, prąd o takim samym natężeniu, jak przez  $R_1$ , płynie także przez opór  $R_2$ . Stąd wyliczamy spadek napięcia na oporze  $R_2$ :

$$U_2 = IR_2.$$

Napięcie wyjściowe jest sumą spadków napięć na obu opornikach, czyli sumą  $U_+$  oraz  $U_2$ :

$$U_{WY} = U_+ + U_2 = U_+ + \frac{U_+}{R_1} R_2 = U_+ \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right),$$

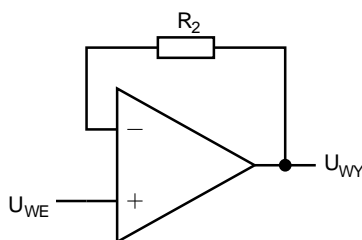
Współczynnik wzmocnienia wynosi zatem:

$$K = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

Z powyższego wynika, że współczynnik wzmocnienia w omawianej konfiguracji zależy wyłącznie od proporcji wartości oporów  $R_2$  do  $R_1$ . Teoretycznie nie ma znaczenia, jakie konkretne wartości mają mieć te dwa opory, jednak w praktyce muszą być odpowiednio dobierane. Nie mogą być bardzo duże, bo wtedy istotna część prądu w obwodzie będzie płynąć przez wejścia (-) i (+), a tych prądów nie uwzględniają powyższe obliczenia. Nie mogą te opory być też bardzo małe, gdyż wówczas płynące prądy miałyby duże natężenia, a rzeczywiste wzmacniacze mają jednak niezerowe opory wyjściowe.

Zwróćmy jeszcze uwagę, że opór wejściowy całego rozważanego układu jest równy oporowi wejścia nieodwracającego (+) wzmacniacza, a więc jest bardzo duży.

#### b) wtórnik napięciowy;

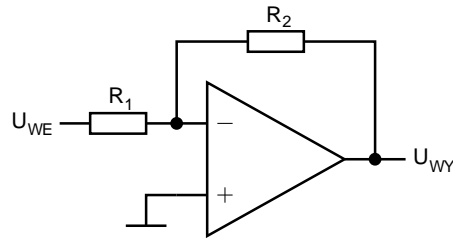


Jeżeli opór  $R_1$  w rozpatrywanym wyżej wzmacniaczu nieodwracającym będzie nieskończenie duży, czyli po prostu usuniemy połączenie wejścia (-) z masą przez  $R_1$ , otrzymujemy wtórnik napięciowy. Gdy podstawimy nieskończoność w miejsce  $R_1$  we wzorze na współczynnik wzmocnienia wzmacniacza nieodwracającego, otrzymujemy wzmocnienie wtórnika:

$$K = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{\infty} = 1.$$

Może się wydawać, że wzmacniacz taki jest bezużyteczny, gdyż na wyjściu powtarza on po prostu wartość napięcia wejściowego, jednak wtórnik znajduje szerokie zastosowanie, wynikające z tego, że ma bardzo duży opór wejściowy i niewielki wyjściowy. Znajduje zastosowanie tam, gdy napięcie z jakiegoś źródła trzeba doprowadzić do układu o małym oporze wejściowym, nie obciążając (zakłócając) jednocześnie sygnału źródłowego. Wtórnik powszechnie stosowane są chociażby w miernikach elektrycznych (np. woltomierze) czy innych przyrządach pomiarowych (np. oscyloskopy) jako elementy stopni wejściowych tych urządzeń.

#### c) wzmacniacz odwracający;



Ujemne sprzężenie zwrotne sprawia, że napięcie na wejściu (-) jest takie samo jak na wejściu (+), czyli wynosi 0 V. W związku z powyższym natężenie prądu płynącego przez opornik  $R_1$  zgodnie z prawem Ohma wynosi:

$$I = \frac{U_{WE}}{R_1}.$$

Ponieważ wejście (-) ma w przybliżeniu nieskończony opór, prąd o takim samym natężeniu, jak przez  $R_1$ , płynie także przez opór  $R_2$ . Stąd wyliczamy spadek napięcia na oporze  $R_2$ :

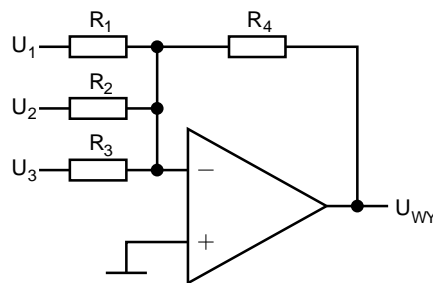
$$U_2 = IR_2.$$

Musimy pamiętać, że skoro pomiędzy oporami  $R_1$  i  $R_2$  jest 0 V, to napięcie na wyjściu wzmacniacza musi mieć przeciwny znak do napięcia wejściowego, stąd:

$$U_{WY} = -U_2 = -IR_2 = -\frac{R_2}{R_1} U_{WE}.$$

Opór wejściowy takiego wzmacniacza jest równy wartości oporu  $R_1$ .

**d) odwracający wzmacniacz sumujący;**



Dzięki pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego napięcie na wejściu (-) jest takie samo jak na wejściu (+), czyli 0 V. W związku z powyższym natężenie prądu płynącego przez każdy z oporników  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$  łatwo można wyliczyć, korzystając z prawa Ohma:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_2}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U_3}{R_3}.$$

Sumaryczny prąd o natężeniu  $I$  płynie dalej przez opór  $R_4$ , na którym odkłada się napięcie:

$$U_4 = IR_4.$$

Z uwagi na to, że na wejściu (-) jest 0 V, napięcie na wyjściu wzmacniacza musi mieć przeciwny znak do spadku napięcia na oporze  $R_4$ , stąd:

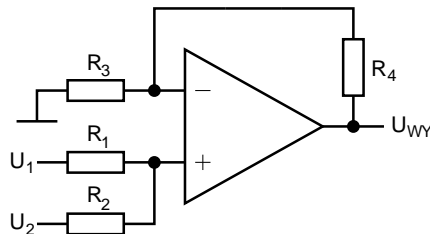
$$U_{WY} = -U_4 = -IR_4 = -\left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3}\right)R_4.$$

Gdy  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ , wówczas:

$$U_{WY} = -(U_1 + U_2 + U_3).$$

Opór wejściowy całego urządzenia dla napięć  $U_1$ ,  $U_2$  oraz  $U_3$  wynosi odpowiednio  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$ .

e) **nieodwracający wzmacniacz sumujący;**



Konfiguracja elementów tworzących pętlę sprzężenia zwrotnego jest w tym wzmacniaczu identyczna jak w omawianym już w podpunkcie a) wzmacniaczu nieodwracającym. Możemy więc od razu napisać równanie opisujące zależność napięcia wyjściowego od napięcia na wejściu nieodwracającym,  $U_+$ :

$$U_{WY} = U_+ \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right).$$

Pozostaje wyliczyć tylko napięcie na wejściu (+) i wstawić je do powyższego wzoru:

$$\begin{aligned} U_+ &= U_1 + \frac{(U_2 - U_1)R_1}{R_2 + R_1} = \\ &= U_1 \frac{R_2 + R_1}{R_2 + R_1} + U_2 \frac{R_1}{R_2 + R_1} - U_1 \frac{R_1}{R_2 + R_1} = \end{aligned}$$

$$= U_1 \frac{R_2}{R_2 + R_1} + U_2 \frac{R_1}{R_2 + R_1}.$$

Gdy  $R_1 = R_2$ , to wzór się upraszcza do postaci:

$$U_+ = \frac{1}{2}(U_1 + U_2).$$

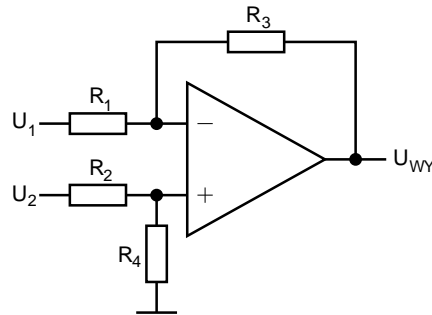
Po podstawieniu dostajemy:

$$U_{WY} = \frac{1}{2}(U_1 + U_2) \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right).$$

Jeżeli dodatkowo spełniony jest warunek  $R_4 = R_3$ , wówczas:

$$U_{WY} = U_1 + U_2.$$

f) **wzmacniacz różnicowy**;



Łatwo można policzyć napięcie  $U_+$  na wejściu (+), gdyż opory  $R_2$  i  $R_4$  stanowią po prostu dzielnik napięcia wpięty między  $U_1$  a masę (napięcie  $U_-$  na wejściu (-) będzie oczywiście identyczne):

$$U_+ = U_- = \frac{R_4}{R_2 + R_4} U_2.$$

Natężenie  $I$  prądu płynącego przez  $R_1$  (i dalej przez  $R_3$ ) wyliczymy z prawa Ohma:

$$I = \frac{U_1 - U_-}{R_1} = \frac{U_1 - \frac{R_4}{R_2 + R_4} U_2}{R_1}.$$

Napięcie wyjściowe  $U_{WY}$  jest niższe od napięcia na wejściu (-) o spadek napięcia na  $R_3$  czyli iloczyn wartości natężenia prądu  $I$  oraz oporu  $R_3$ :

$$U_{WY} = U_- - IR_3 = \left(\frac{R_1 + R_3}{R_2 + R_4}\right) \frac{R_4}{R_1} U_2 - \frac{R_3}{R_1} U_1.$$

Jeżeli  $R_1 = R_2$  oraz  $R_3 = R_4$ , wówczas:

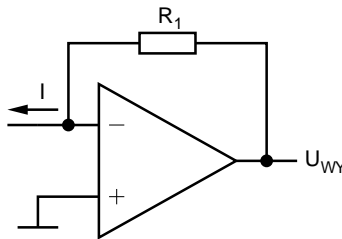
$$U_{WY} = \frac{R_3}{R_1} (U_2 - U_1)$$

**g) konwerter prądu na napięcie;**

Konwerter ten jest stosowany najczęściej do pomiaru prądu o małym natężeniu. Prąd taki trudno jest zmierzyć bezpośrednio, zwłaszcza dokładnie, więc mierzy się spadek napięcia na oporniku, przez który prąd ten przepływa. Korzystamy z tego, że na oporniku odkłada się napięcie zgodnie z prawem Ohma, a jednocześnie sprzężenie zwrotne we wzmacniaczu sprawia, że napięcie na (-) jest równe napięciu na (+), czyli wynosi 0 V. Zatem napięcie wyjściowe  $U_{WY}$  możemy wyrazić po prostu wzorem:

$$U_{WY} = IR_1.$$

Jeżeli prąd wpływa do przyrządu, napięcie ma polaryzację ujemną, gdy wypływa (tak jak na rysunku) – polaryzację dodatnią.



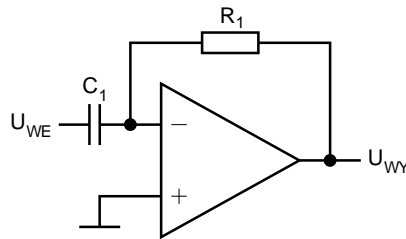
Technika ta stosowana jest powszechnie do pomiaru prądów jonowych w spektrometrach mas. Taki układ pomiarowy nosi wówczas nazwę elektrometru. Typowe natężenie prądu to np.  $10^{-12}$  A, więc aby na oporniku przy takim natężeniu prądu odłożyło się napięcie o wartości 1 V, wartość oporu musi wynosić  $10^{12}$   $\Omega$ . Stosuje się więc specjalne oporniki o dużych długościach (kilka cm), zabezpieczone przed zabrudzeniem poprzez zatopienie ich w rurkach szklanych. Same rurki muszą być suche i utrzymywane w dużej czystości, by prąd nie płynął po izolacji, a tylko przez opornik. Osłania się je zazwyczaj także od światła, by uniknąć niepożądanego zjawiska fotoelektrycznego.

W elektrometrach muszą być używane specjalne modele wzmacniaczy operacyjnych, o wyjątkowo dużym oporze wejściowym (rzędu  $10^{15}$   $\Omega$ , np. OPA129, ADA4530), by jak najmniejsza część mierzonego prądu przepływała przez wejście. Ponieważ wzmacniacz operacyjny musi mieć wyjątkowo duży opór wejściowy, to jego wejść w żaden sposób się nie zabezpiecza, chociażby przed wyładowaniami pochodzącym od ładunków elektrostatycznych. Podczas montażu (lutowania) takich układów, zarówno

stanowisko robocze, lutownica, jak i sam operator wymagają dobrego uziemienia, ponieważ inaczej układ łatwo mógłby zostać nieodwracalnie zniszczony. Wzmacniacze elektrometryczne są dość drogie, cena 1 sztuki w detalu to ok. 30\$ (nawet 1000 razy więcej niż najtańsze wzmacniacze scalone ogólnego zastosowania).

#### h) wzmacniacz różniczkujący;

Od wzmacniacza różniczkującego oczekuje się, że napięcie na jego wyjściu będzie proporcjonalne do szybkości zmian napięcia na wejściu (którą można wyrazić w V/s).



Zakładamy, że napięcie wejściowe  $U_{WE}$  zmienia się w czasie, w związku z tym przez kondensator płynie prąd o natężeniu  $I_1$ , którą to wartość można wyliczyć ze wzoru:

$$I_1 = C_1 \frac{d(U_{WE} - U_-)}{dt}.$$

Przez opór  $R_2$  płynie prąd  $I_2$ :

$$I_2 = \frac{U_- - U_{WY}}{R_1}.$$

Ponieważ przez wejście (-) prąd praktycznie nie płynie, to  $I_1 = I_2$ , zatem:

$$C_1 \frac{d(U_{WE} - U_-)}{dt} = \frac{U_- - U_{WY}}{R_1}.$$

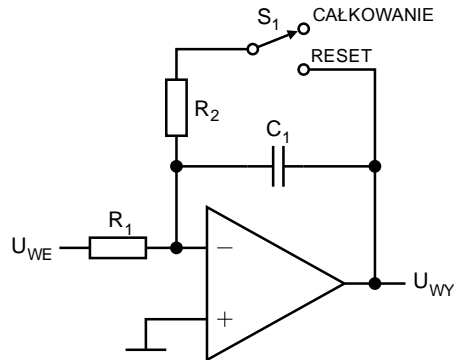
Ponieważ  $U_-$  jest niemal równe 0 V, to możemy je opuścić i po kolejnym przekształceniu otrzymujemy:

$$U_{WY} = -R_1 C_1 \frac{dU_{WE}}{dt}.$$

Znak minus w powyższym wzorze należy interpretować także jeżeli napięcie na wejściu rośnie w czasie, to napięcie wyjściowe ma wartość ujemną.

#### i) wzmacniacz całkujący;





Podobnie jak w przypadku wzmacniacza różniczkowego, teraz też możemy porównać prądy płynące przez opornik  $R_1$  (tym razem na wejściu układu) i przez kondensator  $C_1$  (w tym układzie znajdujący się w pętli sprzężenia zwrotnego):

$$\frac{U_{WE} - U_-}{R_1} = C_1 \frac{d(U_- - U_{WY})}{dt}.$$

Możemy zaniedbać bardzo bliską zeru wartość  $U_-$ , otrzymując wyrażenie:

$$\frac{U_{WE}}{R_1} = -C_1 \frac{dU_{WY}}{dt}.$$

Po przekształceniu otrzymujemy wzór opisujący wartość napięcia wyjściowego:

$$U_{WY} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int U_{WE} dt + U,$$

gdzie  $U$  jest stałą całkowania. Po przejściu do całki oznaczonej otrzymujemy:

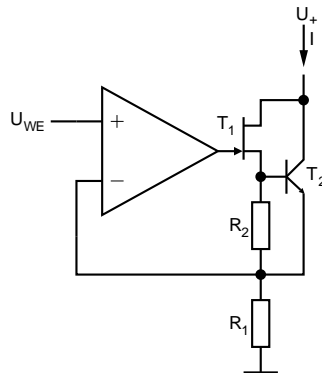
$$U_{WY} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int_0^t U_{WE} dt + U_0,$$

gdzie  $U_0$  jest wartością napięcia wejściowego w chwili początkowej.

W praktyce każdy wzmacniacz całkujący po jakimś czasie od uruchomienia nasyci się (na wyjściu pojawi się napięcie bliskie dodatniemu lub ujemnemu napięciu zasilającemu), bo praktycznie nie ma źródeł sygnału idealnie symetrycznych, pozbawionych składowej stałej, które by w równym stopniu ładowały i na zmianę rozładowywały kondensator  $C_1$ . Dlatego w praktycznym, rzeczywistym układzie dodaje się opornik o relatywnie dużym oporze, włączony równolegle do kondensatora w pętli sprzężenia

zwrotnego, ewentualnie z możliwością chwilowego odłączenia go wyłącznikiem (na schemacie wzmacniacza całkującego elementy  $R_2$  i  $S_1$ ).

**j) precyzyjny źródło prądowe I;**

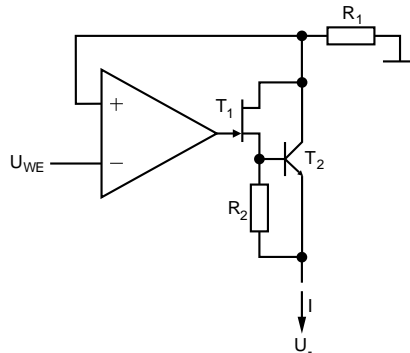


Źródło prądowe jest układem włączonym pomiędzy elementem obciążającym (czyli takim, przez który przepuszczamy prąd), zasilanym ze źródła zasilania o polaryzacji dodatniej a masą i służy do regulowania (kontrolowania) natężenia prądu, płynącego przez element obciążający. Głównym elementem wykonawczym jest tranzystor złączowy  $T_2$  typu npn, sterowany przez wyjście wzmacniacza operacyjnego, ale nie wprost, tylko za pośrednictwem tranzystora  $T_1$  (polowego tranzystora złączowego JFET) tak, aby sam wzmacniacz operacyjny nie stanowił dodatkowego źródła prądu w układzie.

Napięci odkładane na rezystorze  $R_2$  polaryzuje bazę tranzystora  $T_2$ . Cały prąd spływa do masy przez opornik  $R_1$ , zaś napięcie odkładane na tym oporniku stanowi sygnał ujemnego sprzężenia zwrotnego, porównywany przez wzmacniacz z napięciem sterującym  $U_{WE}$  ( $U_{WE} \geq 0$  V). Natężenie prądu płynącego przez zlew ( $i$  jednocześnie przez obciążenie) opisuje prosty wzór:

$$I = \frac{U_{WE}}{R_1}.$$

**k) precyzyjne źródło prądowe II;**



To źródło prądowe pełni podobną funkcję do poprzedniego, z tym że jest umieszczane pomiędzy masą a obciążeniem zasilanym ze źródła zasilania o polaryzacji ujemnej. Rozwiązanie sterowania jest podobne do opisanego powyżej, z tym że sygnał sprzężenia (spadek napięcia na oporniku  $R_2$ ) podawany jest na wejście (+) wzmacniacza operacyjnego. Tym razem spełniony musi być warunek  $U_{WE} \leq 0$  V, a wzór opisujący natężenie prądu jest taki sam, jak dla zlewu:

$$I = \frac{U_{WE}}{R_1}.$$

## Elementy logiczne

Cyfrowe układy logiczne, służące przetwarzaniu informacji, wykorzystują głównie elementy realizujące podstawowe funkcje logiczne, czyli tzw. bramki logiczne. Bramki te mają co najmniej jedno wejście informacyjne (na wejścia podajemy argumenty realizowanej przez bramkę funkcji logicznej) i jedno wyjście. W większości systemów cyfrowych „nośnikiem” informacji jest napięcie elektryczne, którego dwu różnym wartościom (w praktyce dwu różnym i rozdzielnym przedziałom wartości) odpowiadają dwa różne stany logiczne: *prawda* i *fałsz*. Kwestią umowną są zarówno same przedziały napięć, ustalone jednak zawsze dla danej technologii cyfrowej, jak i to, jaki stan logiczny odpowiada któremu przedziałowi napięć. Możemy mieć zarówno logikę dodatnią (przedział wyższych napięć to prawda czyli logiczna „1”, zaś przedział napięć niższych, czy wręcz ujemnych, to fałsz czyli logiczne „0”) jak też i logikę ujemną (sytuacja odwrotna). Większe różnice napięć między „0” a „1” stosowano zwykle w starszych technologiach, ale stosuje się je ciągle tam, gdzie informacja przekazywana jest na większe odległości i mogłaby przy niewielkiej różnicy napięć między stanami być zakłócana (zakłamywana) np. z powodu indukcyjności przewodów.

Urządzenia cyfrowe buduje się zarówno z prostych bramek, ale też (zwłaszcza te o większej złożoności i bardziej skomplikowanej funkcjonalności) z bloków, zwykle gotowych, bo produkowanych jako układy scalone. Te prostsze nazywane są często elementami logicznymi, ale nie wszystkie elementy logiczne to bramki.

Przypomnijmy sobie najpierw kilkanaście najbardziej podstawowych twierdzeń, obowiązujących w logice. Oto ich zestawienie („ $a$ ”, „ $b$ ”, „ $c$ ” to argumenty mające jakąś wartość logiczną; „0” oznacza fałsz, „1” oznacza prawdę; operator „+” to suma logiczna – czytamy ją „lub”; operator „ $\cdot$ ” to iloczyn logiczny – czytamy go „i”; kreska nad argumentem czy wyrażeniem oznacza zaprzeczenie):

$$a + 0 = a$$

$$a + 1 = 1$$

$$a + a = a$$

$$a + \bar{a} = 1$$

$$a + a \cdot b = a \cdot (1 + b) = a \cdot 1 = a$$

$$a + \bar{a} \cdot b = (a + \bar{a})(a + b) = a + b$$

$$\overline{(a + b)} = \bar{a} \cdot \bar{b}$$

$$\overline{(a + b + c)} = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c}$$

$$a \cdot 0 = 0$$

$$a \cdot 1 = a$$

$$a \cdot a = a$$

$$a \cdot \bar{a} = 0$$

$$a \cdot (a + b) = a + ab = a$$

$$a \cdot (\bar{a} + b) = a \cdot b$$

$$\overline{(a \cdot b)} = \bar{a} + \bar{b}$$

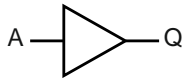
$$\overline{(a \cdot b \cdot c)} = \bar{a} + \bar{b} + \bar{c}$$

**Bramki logiczne** realizujące proste funkcje oznacza się na schematach właściwymi symbolami. Poniżej podano zestawienie symboli i tzw. tabele prawdy dla prostych, jedno- i dwuwejściowych bramek. Tabele prawdy opisują realizowane przez bramki funkcje logiczne.

Najprostsze bramki logiczne to **bramki, które mają tylko jedno wejście**. Są dwie takie bramki:

a) **wzmacniacz logiczny** (wzmacniacz cyfrowy, bufor, wtórnik, FOLLOWER) podaje na wyjście dokładnie ten sam stan logiczny, który ma na wejściu. Z punktu widzenia samej logiki jest to element zbędny w układach logicznych, ale w cyfrowych układach elektronicznych stosuje się go powszechnie i służy do wzmocnienia i/lub regeneracji sygnału cyfrowego. W wielu technologiach wyjście bramki logicznej może być obciążone skończoną i często niewielką liczbą wejść kolejnych elementów logicznych (np. w technologii TTL przyjmuje się, że jest to 10). Jeżeli informację z wyjścia bramki trzeba podać na większą niż normalnie dopuszczalna liczba wejść, to doprowadza się ją najpierw do wejść kilku wzmacniaczy logicznych, a dopiero z ich wyjść do innych, kolejnych

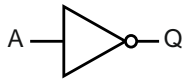
elementów tworzących cały układ. Funkcję regeneracyjną wykorzystują się najczęściej, gdy informacja doprowadzana jest ze źródła do bramki długimi przewodami, na których występuje istotny spadek napięcia lub na których mogą pojawiać się zakłócenia np. z powodu indukcyjności tych doprowadzeń.



A	Q
0	0
1	1

*Bramka FOLLOWER.  
Symbol i tabela prawdy.*

b) **zaprzeczenie logiczne** czyli **negator** (NIE lub NOT) podaje na swoje wyjście zaprzeczony stan z wejścia. Gdy na wejściu jest logiczne „0”, to na wyjściu „1”, gdy na wejściu „1”, to na wyjściu „0”.



A	Q
0	1
1	0

*Bramka NOT. Symbol  
i tabela prawdy.*

Istnieje kilka rodzajów **dwuwejściowych bramek logicznych**. Bramki te realizują funkcję:

a) iloczynu logicznego (bramka oznaczana I lub częściej AND). Na wyjściu tej bramki stan logiczny „1” jest wtedy i tylko wtedy, gdy na obu wejściach są logiczne „1”. We wszystkich pozostałych możliwych przypadkach kombinacji stanów na wejściach, na wyjściu jest logiczne „0”;



A	B	Q
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

*Bramka AND. Symbol  
i tabela prawdy.*

b) bramka sumy logicznej (LUB, częściej oznaczana OR). Na wyjściu tej bramki jest stan logiczny „1”, gdy taki właśnie stan występuje na przynajmniej jednym jej wejściu. Stan logicznego „0” jest na wyjściu tylko wtedy, gdy „0” jest na obu wejściach.



A	B	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

*Bramka OR. Symbol  
i tabela prawdy.*

c) bramka zaprzeczonego iloczynu logicznego (NIE-I, częściej NAND). Bramka jest niejako złożeniem bramki AND i negatora (NOT) na jej

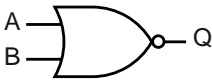
wyjsciu. Logiczne „0” na wyjściu jest tylko przy logicznych „1” na obu wejściach.



A	B	Q
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

*Bramka NAND. Symbol i tabela prawdy.*

d) bramka zaprzeczonej sumy logicznej (NIE-I lub NOR). Bramka realizującą taką funkcję, jak połączone w szereg bramki OR oraz NOT. „1” logiczną na wyjściu mamy tylko przy logicznych „0” na obu wejściach.



A	B	Q
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

*Bramka NOR. Symbol i tabela prawdy.*

e) bramka różnicy symetrycznej (ALBO, EX-OR). Bramka na wyjściu sygnalizują logiczną jedynką różne stany na obu wejściach („0” i „1” lub „1” i „0”). Gdy stany logiczne na obu wejściach są takie same, na wyjściu bramki XOR mamy „0”.



A	B	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

*Bramka EX-OR. Symbol i tabela prawdy.*

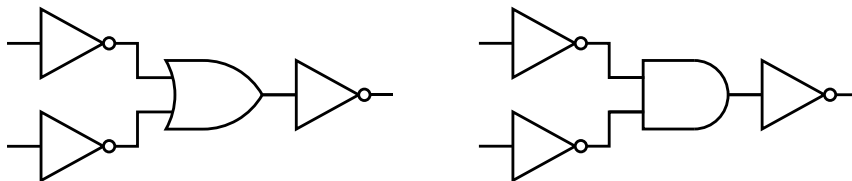
f) bramka zaprzeczonej różnicy symetrycznej (NIE-ALBO, EX-NOR), której wyjście znajduje się w stanie logicznej „1”, gdy na obu wejściach jest ten sam stan logiczny.



A	B	Q
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

*Bramka EX-NOR. Symbol i tabela prawdy.*

Bramki oczywiście można łączyć ze sobą w celu otrzymania bardziej złożonych układów. Przyjrzyjmy się układom logicznym, które powstają, gdy zarówno do wejść jak i wyjść bramek OR oraz AND dodamy negatory.



*Bramki OR i AND z negatorami na wejściach i wyjściach.*

W pierwszym przypadku otrzymaliśmy układ logiczny realizujący po prostu funkcję iloczynu logicznego (AND), w drugim układ realizujący funkcję sumy logicznej (OR).

Udowodniono, że każdy układ logiczny da się zbudować, łącząc odpowiednio ze sobą wyłącznie same dwuwejściowe bramki NAND, jak też łącząc ze sobą wyłącznie dwuwejściowe bramki NOR. Oczywiście, skoro jednak istnieją także inne rodzaje bramek, to należy także ich używać, chociażby po to by układ logiczny był prostszy, bardziej czytelny a w przypadku logicznych układów elektronicznych także tańszy, energooszczędny czy czasem szybszy.

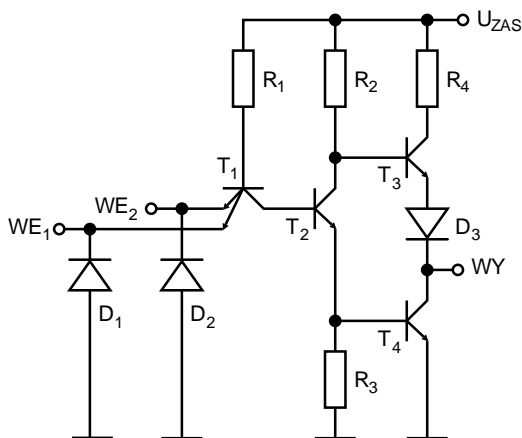
### **Układy logiczne TTL**

Przez wiele lat wśród wielu technologii cyfrowych dominowała technologia TTL (od ang. *Transistor-Transistor Logic*). Pierwsze układy scalone zawierające bramki wykonane w tej technologii pojawiły się na rynku na początku lat 60-ych XX wieku. Dość szybko układy produkowane w tej technologii zostały spopularyzowane przez firmę Texas Instruments wraz z wprowadzeniem przez nią masowo produkowanej serii układów 74XX, które są zresztą produkowane do dnia dzisiejszego, chociaż zakres ich zastosowań mocno został ograniczony (w wielu zastosowaniach układy TTL zostały wyparte przez inne, nowsze technologie). Układy cyfrowe w pełni zgodne z układami firmy Texas Instruments produkuje wiele firm na świecie (produkowano je także w Polsce, głównie w latach 70-ch i 80-ych ubiegłego wieku). Pierwotnie wytwarzano je w ceramicznych lub plastikowych dwurzędowych obudowach typu DIP, obecnie wytwarza się je także jako płaskie układy przeznaczone do montażu powierzchniowego. Rodzinie TTL zawdzięczamy masowy rozwój elektroniki cyfrowej, w tym szybkie rozpowszechnienie się komputerów. Obecnie układy te stosowane są najczęściej jako elementy łączące różne układy o dużej skali integracji, wykonane w innych technologiach i nadal używa się ich w urządzeniach cyfrowych o niewielkiej skali integracji. Układy TTL z biegiem czasu ewoluowały i pojawiały się nowe ich podrodziny, ulepszone pod względem szybkości działania, oszczędności energii itp. itd.

Układy logiczne TTL są oparte o tranzystory bipolarne i korzystają z napięcia zasilającego o wartości 5V ( $\pm 5\%$ ). Działają one w logice dodatniej. Stanowi niskiemu (logicznemu „0”) odpowiada przedział napięć od -0,5 V do +0,8, zaś wysokiemu (logiczna „1”) przedział napięć od +2,0 V do +5,5 V. Stan logiczny dla napięć z przedziału +0,8 V do +2,0 V uważa się za nieokreślony i napięcia te w praktyce mogą być dowolnie interpretowane (traktowane przez wejścia bramek logicznych TTL za logiczne „0” lub „1”), a w związku z tym nie powinny pojawiać się na wyjściach bramek tej rodziny w sytuacji ustalonego stanu na ich wejściach (pojawiają się oczywiście chwilowo w czasie zmiany stanu logicznego wyjść bramki).

Przyjrzyjmy się budowie i zasadzie działania dwuwejściowej bramki NAND (podstawowej bramki rodziny TTL – w układzie scalonym 7400 są 4 takie bramki). W układzie elektronicznym bramki wyróżniamy 3 stopnie:

- wejściowy: tranzystor  $T_1$ , opornik  $R_1$  i diody  $D_1$  i  $D_2$ ;
- pośredniczący: tranzystor  $T_2$  i oporniki  $R_2$  i  $R_3$ ;
- wyjściowy przeciwsoalny (ang. *totem pole*): tranzystory  $T_3$  i  $T_4$ , opornik  $R_4$  i dioda  $D_3$ .



*Dwuwejściowa bramka NAND.*

Stopień wejściowy z wieloemiterowym (tu dwuemiterowym tranzystorem typu npn) pełni zasadniczą rolę w realizacji funkcji logicznej.

Rozpatrując działanie tego układu wystarczy rozważyć 2 przypadki: gdy na obydwu wejściach jest stan wysoki oraz gdy na co najmniej jednym wejściu jest stan niski.

W pierwszym przypadku, gdy na obydwu wejściach jest logiczna „1”, złącze baza-emiter tranzystora  $T_1$  jest spolaryzowane zaporowo, zaś przez złącze baza-kolektor płynie prąd, który nasycza tranzystor  $T_2$  i sprawia, że dość duży prąd płynie przez oporniki  $R_2$  i  $R_3$ . W związku z tym potencjał na bazie

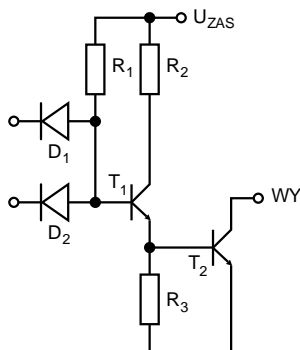


tranzystora  $T_3$  (czyli napięcie zasilające minus spadek napięcia na  $R_2$ ) jest na tyle niski, że tranzystor ten jest zatkany, natomiast potencjał na bazie tranzystora  $T_4$  (spadek napięcia na  $R_3$ ) jest na tyle wysoki, by tranzystor ten był nasycony (w pełni otwarty), a w związku z tym potencjał kolektora tego tranzystora, będący jednocześnie jego wyjściem, był bliski 0 V.

W drugim przypadku, gdy jedno wejście lub oba jednocześnie są w stanie niskim, prąd płynący przez  $R_1$  do bazy tranzystora  $T_1$  jest odprowadzany przez emiter (lub emitery), a na bazie tranzystora  $T_2$  jest wówczas zbyt niskie napięcie, by  $T_2$  był otwarty. W związku z tym nie płynie duży prąd przez  $R_2$  i  $R_3$ , zatem i spadki napięć na tych opornikach są niewielkie, co za tym idzie, tranzystor  $T_3$  jest otwarty, zaś tranzystor  $T_4$  odcina wyjście od masy i na wyjściu stosunkowo wysokie mamy napięcie (ok. 3,5 V), odpowiadające logicznej „1”.

Diody  $D_1$  i  $D_2$  zabezpieczają wejścia bramki (blokują ewentualne ujemne impulsy napięcia, które mogą pojawiać się na tych wejściach np. z powodu indukcyjności doprowadzeń. Dioda  $D_3$  jest wymagana, by podnieść napięcie na emiterze tranzystora  $T_3$ . Gdyby jej nie było, to tranzystor  $T_3$  byłby otwarty jednocześnie z  $T_4$ , gdy na wyjściu mamy logiczne „0”, co doprowadziłoby do przepływu przez nie zbyt dużego prądu i zniszczenia co najmniej jednego z tych tranzystorów.

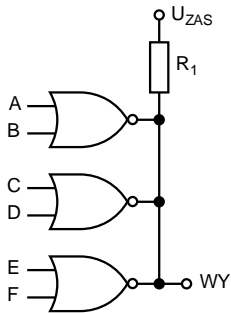
Nie wszystkie produkowane bramki TTL mają przeciwsobny stopień wyjściowy. Produkuje się także układy, mające tzw. wyjścia z otwartym kolektorem. W takim wyjściu, jak na poniższym rysunku, gdy  $T_2$  jest otwarty, to na wyjściu mamy napięcie bliskie 0 V i logiczne „0”, zaś gdy jest zamknięty – napięcie przykładane do wejścia z zewnątrz, niekoniecznie np. 5 V (tranzystory wyjściowe układów z otwartym kolektorem w bramkach TTL wytrzymują zwykle napięcie co najmniej +15 V), więc bramki mogą pełnić rolę pośrednika, gdy w układzie sterowanym z bramek TTL potrzebna jest logiczna „1” o wartości napięcia innej niż 5 V.



*Bramka z otwartym kolektorem.*

Wyjścia bramek z otwartym kolektorem, w przeciwieństwie do standardowych wyjść bramek z układem przeciwsobnym można łączyć, tworząc tzw. iloczyn montażowy (lub iloczyn na „na drucie”). Punkt wspólny zasila się przez (odpowiednio dobrany) rezystor i mamy w nim stan wysoki, gdy wyjścia wszystkich połączonych bramek są w stanie wysokim, lub niski, gdy wyjście chociaż jednej bramki jest w stanie niskim.

W przedstawionym na rysunku poniżej układzie logicznym wyjście *WY* będzie w stanie niskim („0”), gdy na którymkolwiek z wejść będzie stan wysoki („1”).



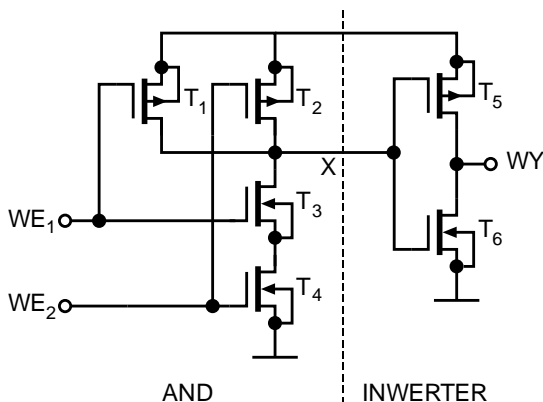
*Iloczyn montażowy.*

## Układy logiczne CMOS

Bramki logiczne CMOS (ang. *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) wyparły ze względu na swoje zalety z większości zastosowań bramki TTL. Bramki te zawierają tranzystory polowe z izolowaną bramką (nie wolno mylić znaczenia dwu różnych pojęć słowa „bramka” – podstawowego elementu układów logicznych oraz jednej z elektrod tranzystorów polowych). Pełnią funkcje podobne do funkcji bramek TTL.

Przyjrzyjmy się budowie i zasadzie działania dwuwejściowej bramki NAND. W układzie elektronicznym bramki wyróżniamy 2 stopnie:

- wejściowy, realizujący funkcję AND: tranzystory  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  i  $T_4$ ;
- inwerter z tranzystorów  $T_5$  i  $T_6$ .



*Dwuwejściowa bramka NAND  
w technologii CMOS.*

Tranzystory  $T_1$ ,  $T_2$  i  $T_5$  to tzw. tranzystory zubożone typu p (zamknięte tylko wtedy, gdy potencjał na bramce tranzystora jest niższy niż na jego źródle), zaś tranzystory  $T_3$ ,  $T_4$  i  $T_6$  to tranzystory zubożone z kanałem n (otwarte tylko wtedy, gdy potencjał na bramce jest większy niż na źródle).

Rozpatrzyć trzeba 3 przypadki: gdy na obu wejściach jest logiczne „0”, gdy na obu jest logiczna „1” oraz trzeci, gdy stany na wejściach są różne.

W przypadku stanów niskich na obu wejściach otwarte są tranzystory  $T_1$  i  $T_2$ , więc opór między zasilaniem, a punktem  $X$  jest bliski zeru, natomiast zamknięte są obydwa połączone szeregowo tranzystory  $T_3$  i  $T_4$  i prąd nie może płynąć z punktu  $X$  do masy. W związku z powyższym napięcie w punkcie  $X$  jest praktycznie równe napięciu zasilającemu. Napięcie to sprawia zaś, że w inwerterze zamknięty jest tranzystor  $T_5$  a otwarty tranzystor  $T_6$ , zatem na wyjściu bramki mamy logiczne „0”.

W przypadku stanów wysokich na obu wejściach otwarte są obydwa połączone szeregowo tranzystory  $T_3$  i  $T_4$ , zaś zamknięte tranzystory  $T_1$  i  $T_2$ , łączące punkt  $X$  z dodatnim zasilaniem, w związku z tym w punkcie  $X$  jest napięcie bliskie 0 V, zaś na wyjściu bramki, po odwróceniu stanu inwerterem mamy logiczną „1”.

Trzeci przypadek (a w zasadzie 2 różne), to sytuacja, gdy na wejściach mamy różne stany logiczne. Załóżmy, że na  $WE_1$  jest logiczne „0”, zaś na  $WE_2$  „1”, więc otwarty jest co prawda tranzystor  $T_4$ , ale zamknięty połączony z min w szereg  $T_3$  i prąd z  $X$  do masy płynąć nie może. Tranzystor  $T_2$  jest co prawda zamknięty, ale otwarty jest połączony z nim równolegle tranzystor  $T_1$ , więc prąd z dodatniego zasilania do punktu  $X$  płynąć może. W sytuacji takiej w punkcie  $X$  jest logiczna „1”, zaś na wyjściu  $WY$  logiczne „0”. Przypadek, gdy ze na  $WE_1$  jest logiczna „1”, zaś na  $WE_2$  „0”, łatwo już może Czytelnik rozważyć samodzielnie.

Jak można zauważyć, w sytuacji, gdy stan logiczny wejść omawianej bramki jest ustalony, zawsze zamknięty jest przepływ prądu między dodatnim

zasilaniem i masą. Oznacza to, że w sytuacji ustalonej bramka CMOS w ogóle nie obciąża zasilania (w przypadku bramek TTL prąd zawsze przez bramkę przepływał). W momencie zmiany stanu logicznego na wejściu, gdy napięcie na min jest bliskie połowy napięcia zasilającego, bramka CMOS prąd jednak pobiera, bo częściowo otwarte wówczas są tranzystory z kanałem p, jak i tranzystory z kanałem n. Żeby pobór prądu przez bramki CMOS ograniczyć, zmiana stanu logicznego na wejściu powinna być jak najszybsza. Konsekwencją poboru prądu przy przełączaniu bramki jest też oczywiście fakt większego średniego poboru mocy przez bramki przełączane z większą częstością. Pewien, niewielki pobór prądu związany jest też z tym, że bramki tranzystorów mają niezerową pojemność elektryczną, a więc przy przełączaniu tranzystorów są ładowane lub rozładowywane.

### Układy kombinacyjne a sekwencyjne

Generalnie elektroniczne układy logiczne dzielimy na 2 zasadnicze grupy, tj.:

- **układy kombinacyjne**, czyli takie, w których logiczne stany wyjść zależą tylko i wyłącznie od aktualnego stanu ich wejść;
- **układy sekwencyjne**, w których stan wyjść zależy nie tylko od aktualnych stanów wejść, ale także od stanów tych wejść, jakie były wcześniej (układy te mają „pamięć”).

### Wybrane kombinacyjne układy logiczne:

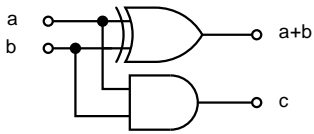
#### a) Półsumator i sumator.

Niemal wszystkie układy cyfrowe używają do zapisu liczb naturalnego kodu dwójkowego (binarnego). W kodzie tym mamy do dyspozycji tylko cyfry 1 i 0. Wagi kolejnych pozycji cyfr w liczbie, licząc od prawej strony, to: 1, 2, 4, 8, 16... . Dwie liczby w zapisie binarnym dodajemy podobnie jak w dziesiętnym, zaczynając od cyfr o najmniejszej wadze. Pamiętajmy:  $0 + 0 = 0$ ;  $0 + 1 = 1 + 0 = 1$ ;  $1 + 1 = 0$  i 1 w przeniesieniu. Popatrzmy na przykład:

$$\begin{array}{r} \text{przeniesienia} \quad 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \\ \text{składnik} \quad \quad 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \\ \text{składnik} \quad \quad 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \\ \text{suma} \quad \quad \quad 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \end{array}$$

Gdy dodajemy 2 cyfry o najmniejszej wadze, dostajemy sumę (w przykładzie 1) i przeniesienie (0). Później dodajemy już zawsze 3 cyfry: 2 ze składników i 1 z przeniesienia.

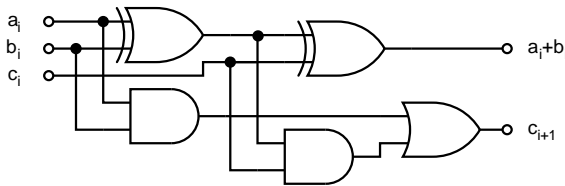
Dodawanie binarne 2 cyfr realizuje układ zwany **półsumatorem**:



*Półsumator.*

Bramka różnicy symetrycznej EX-OR daje sumę równą 1, tylko gdy  $a$  i  $b$  mają wartości 0 i 1 lub 1 i 0. Bramka iloczynu logicznego AND daje przeniesienie równe 1 tylko gdy obie cyfry równe są 1.

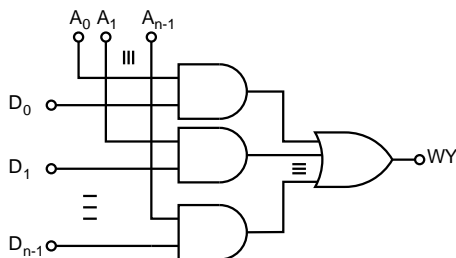
**Pelny sumator**, dodający 3 cyfry, można zestawzić z 2 półsumatorów uzupełnionych bramką sumy logicznej OR:



*Sumator.*

## b) multipleksery

Multipleksjer to taki układ logiczny, który kopiuje stan jednego z wielu, wybranego wejścia informacyjnego na wyjście. Wyboru wejścia informacyjnego dokonuje się za pomocą wejść adresowych. Prosty multipleksjer o  $n$  wejściach informacyjnych i adresowych przedstawiony jest na poniższym rysunku.



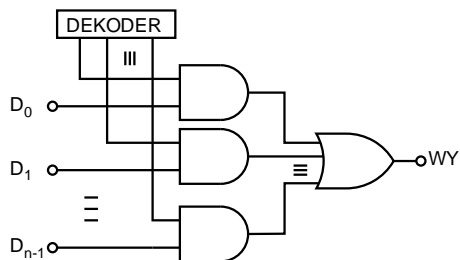
*Multipleksjer.*

Układ składa się z szeregu dwuwejściowych bramek AND i jednej wielowejsiowej bramki OR. W układzie takim informacja będzie przenoszona z wybranego wejścia informacyjnego  $D_i$  na wyjście pod warunkiem, że odpowiednie wejście adresowe  $A_i$  będzie w stanie wysokim, natomiast na pozostałych wejściach adresowych będzie stan niski.

Gdy niezgodnie z powyższym założeniem na więcej niż jednym wejściu adresowym będzie stan wysoki, na wyjściu układu dostaniemy sumę logiczną z odpowiednich wejść informacyjnych.

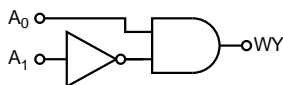
Aby zmniejszyć liczbę doprowadzonych do układu sygnałów adresowych można zastosować dekodery adresowe. Zamiast podawania  $n$  stanów logicznych na  $n$  doprowadzeni adresowych można podać kombinację stanów

logicznych, reprezentującą liczbę (numer) wybranego wejścia informacyjnego. Oczywiście multiplekser musi zostać uzupełniony o odpowiedni dekodery.



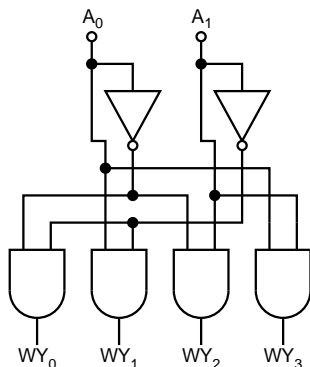
*Multiplexer z dekoderym.*

Dekoderym adresu będzie np. taki układ logiczny, który składa się z  $n$  podukładów, do których doprowadzone są sygnały adresowe i które na swe wyjścia podają logiczną jedynkę wtedy i tylko wtedy, gdy kombinacja stanów na wejściach adresowych (np. liczna w zapisie binarnym) odpowiada numerowi podukładu (od 0 do  $n-1$ ). Przykład takiego podukładu o 2 wejściach, reagującego jedynką tylko na kombinację  $A_1 = 0$  i  $A_0 = 1$  przedstawiony jest na poniższym rysunku.



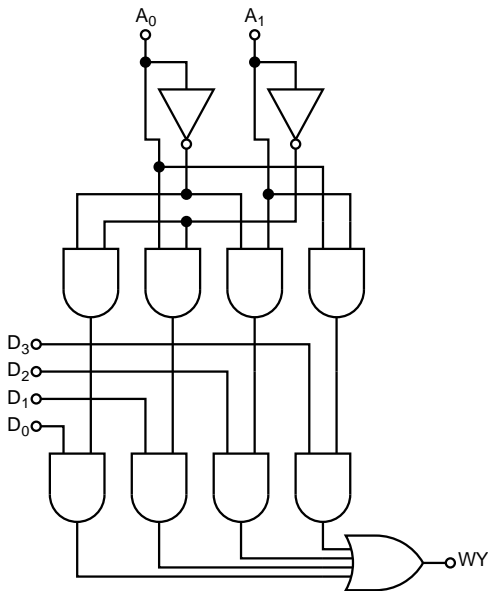
*Detektor kombinacji 01.*

Kolejny rysunek przedstawia kompletny już dekodery o 2 wejściach  $A_1$  i  $A_0$  oraz 4 wyjściach  $WY_3$ ,  $WY_2$ ,  $WY_1$  i  $WY_0$ . Układ zawiera 4 bramki AND i 2 bramki NOT.



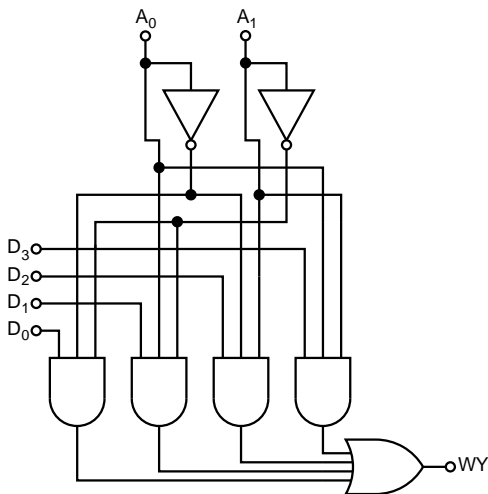
*Dekodery o 2 wejściach.*

Dekodery taki może być wykorzystany do zbudowania multipleksera o (maksymalnie) 4 wejściach informacyjnych. Kompletny multiplekser przedstawia następny rysunek.



*Multiplexer z dekodерem.*

Jeżeli zamiast 2-wejściowych bramek AND użyjemy 3-wejściowych, to układ będzie zawierał 4 bramki mniej:

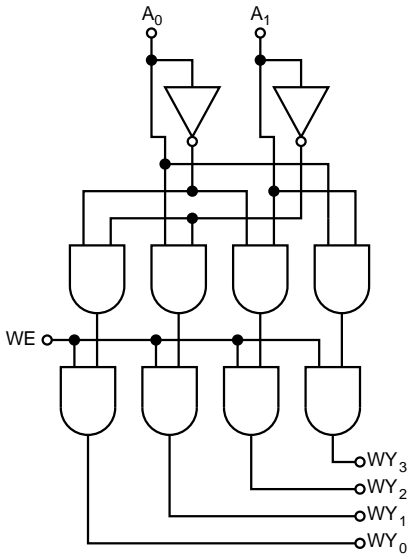


*Multiplexer z dekodерem na bramkach 3-wejściowych.*

### c) demultipleksery

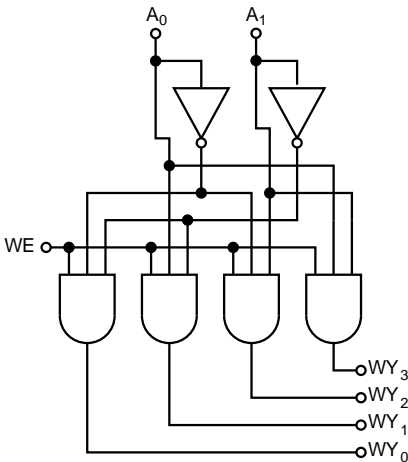
Demultipleksер to układ o odwrotnej funkcji niż multipleksер. W urządzeniu tym informacja z 1 wejścia przenoszona jest na 1 wyjście wybrane z pośród wielu, zaś na pozostałych wyjściach mamy ustalony stan logiczny (zazwyczaj 0).

W demultiplekserach także stosuje się zazwyczaj dekodery adresu, by zredukować ilość linii adresowych. Przykład 4-wyjściowego demultipleksera z prezentowanym już wcześniej dekodernem pokazuje poniższy rysunek:



*Demultiplekser z dekodernem.*

Taki układ także można uprościć, używając trójwejściowych bramek AND. Redukujemy tym sposobem liczbę bramek o 4.



*Demultiplekser z dekodernem na bramkach 3-wejściowych.*



## Wybrane sekwencyjne układy logiczne:

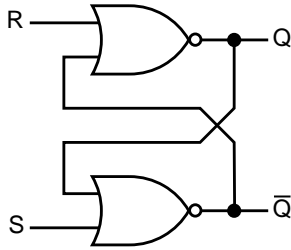
### 1) przerzutniki bistabilne

Układy sekwencyjne zwane przerzutnikami posiadają co najmniej 2 wejścia i 1 wyjście. W przerzutnikach stan wyjść zmienia się pod wpływem impulsu (impulsów) podawanego na wejście. Po impulsie stan wyjść może być inny niż przed impulsem i może wówczas być zmieniony tylko impulsem na innym wejściu. Na rysunku pokazano ogólny symbol przerzutnika. W konkretnych typach przerzutników część wyprowadzeń pokazanych na symbolu może nie występować lub może mieć inne nazwy (oznaczenia). Wejścia PR (*preset*) i CLR (*clear*) to tzw. wejścia przygotowujące. Stan wysoki na tylko jednym z nich determinuje stan wyjścia Q i dodatkowego, zaprzeczonego wyjścia /Q. Wejścia I1 i I2 to wejścia informacyjne. Od stanu tych wejść zależy stan przerzutnika. Wejście CK (taktujące) występuje wyłącznie w tzw. przerzutnikach synchronicznych. Przerzutniki z takim wejściem nie przerzucają natychmiastowo po zmianie stanu na wejściu informacyjnym, lecz później, dopiero po impulsie taktującym.

Przerzutniki inne niż najprostsze asynchroniczne przerzutniki RS rzadko są wykonywane z „dyskretnych” bramek logicznych. Przerzutniki te są dostępne w postaci układów scalonych, gdzie najczęściej w jednej obudowie mamy ich do dyspozycji 2 lub 3.

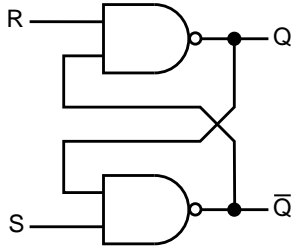
#### a) asynchroniczne przerzutniki bistabilne RS („Reset/Set”)

Przerzutniki te mają 2 wejścia (ustawiające S i kasujące R) oraz co najmniej 1 wyjście (w praktyce w większości przerzutników RS udostępnione jest na zewnątrz także dodatkowe wyjście, będące zaprzeczeniem głównego). Mogą być stosowane w charakterze układów pamiętających. Przerzutniki te mogą być zbudowane z 2 bramek NOR albo 2 bramek NAND. W przerzutnikach tych zmiana stanu wyjścia następuje tuż po zmianie stanu wejść. Opóźnienie wynika tylko z czasu propagacji sygnału w bramkach. Przerzutniki w obu wersjach reagują tak samo, gdy w stanie wysokim jest tylko jedno z wejść: gdy w stanie wysokim jest R, wówczas wejście jest w stanie niskim, gdy wysokim jest S, wówczas wyjście jest w stanie wysokim. Zera podawane jednocześnie na wejścia przerzutnika RS z bramek NOR lub jedynki podawane jednocześnie na wejścia przerzutnika RS z bramek NAND nie powodują zmiany stanów wyjściowych. Jedynek podawane jednocześnie na wejścia przerzutnika z bramek NOR lub zera podawane jednocześnie na wejścia przerzutnika z bramek NAND to stany zabronione – nie wiadomo jakie będą stany wyjść i należy takich kombinacji stanów wyjściowych unikać.



R	S	$Q_n$
0	0	$Q_{n-1}$
0	1	1
1	0	0
1	1	zabr.

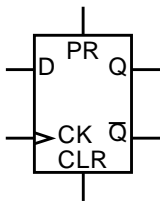
Przerzutnik asynchroniczny RS, zbudowany z bramek NOR. Schemat i tabela prawdy.



R	S	$Q_n$
0	0	zabr.
0	1	1
1	0	0
1	1	$Q_{n-1}$

Przerzutnik asynchroniczny RS, zbudowany z bramek NAND. Schemat i tabela prawdy.

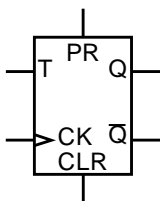
**b) synchroniczny przerzutnik D** (*delay*) zwany także przerzutnikiem opóźniającym; w najczęściej stosowanej wersji zmienia swój stan w reakcji na narastające lub (w innych wersjach) opadające zbocze sygnału zegarowego. W jeszcze innych wersjach przerzutnik ten działa tak, że w czasie trwania jednego stanu (np. 1) na wejściu zegarowym informacja przenoszona jest natychmiast z wejścia D na wyjście (wyjścia), zaś przy drugim stanie (np. 0) stan wyjść się nie zmienia. Ta ostatnia wersja przerzutnika D zwana jest zatrzaskiem (*latch*).



D	$Q_{n-1}$	$Q_n$
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	1

Przerzutnik synchroniczny D. Symbol i tabela przejść.

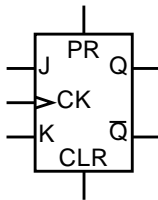
**c) synchroniczny przerzutnik T** zmienia swój stan na przeciwny w reakcji na odpowiednie zbocze sygnału zegarowego, gdy na wejściu T jest jedynka. Gdy na wejściu T jest zero, stan wyjścia (wyjść) pozostaje niezmienny. Przerzutnik taki może pełnić funkcję układu dzielącego częstość przez 2.



T	$Q_{n-1}$	$Q_n$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Przerzutnik synchroniczny T. Symbol i tabela przejść.

**d) synchroniczny przerzutnik JK** ma 2 wejścia informacyjne (J – ustawiające i K – kasujące), wejście zegarowe CK i czasem asynchroniczne wejścia ustawiające PR i kasujące CLR o priorytecie większym niż pozostałe wejścia. Zbocze zegarowe przy jedynkach tylko na J lub tylko na K odpowiednio ustawia/kasuje wyjście, natomiast przy jedynkach jednocześnie na J i K stan wyjścia (wyjść) zmieniający jest na przeciwny, zaś przy zerach jednocześnie na J i K stan wyjść pozostaje niezmienny.



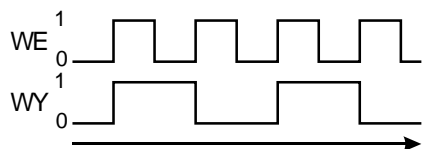
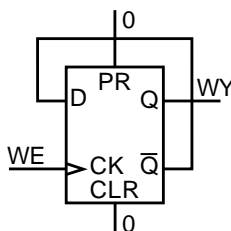
J	K	$Q_n$
0	0	$Q_{n-1}$
0	1	0
1	0	1
1	1	$\sim Q_{n-1}$

*Przerzutnik  
synchroniczny JK.  
Symbol  
i tabela przejść.*

## 2) liczniki impulsów

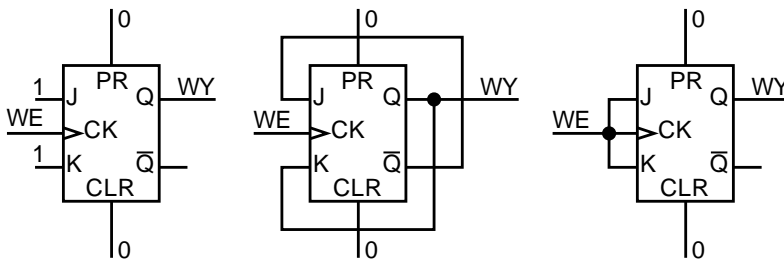
Cyfrowe układy liczników impulsów są zbudowane najczęściej w postaci połączonych ze sobą szeregowo tzw. dwójek liczących.

Dwójka licząca to układ, który ma 1 wejście traktowane jako informacyjne i 1 wyjście oraz ewentualnie dodatkowe asynchroniczne wejścia ustawiające i/lub kasujące, umożliwiające ustalenie początkowego stanu dwójki liczącej. W praktyce funkcję dwójek liczących pełnią w licznikach odpowiednio skonfigurowane przerzutniki, np. przerzutnik typu D, w którym wyjście zanegowane połączone zostało z wejściem D. Jeżeli nie są aktywne wejścia ustawiające/kasujące i jeżeli w chwili początkowej na wyjściu Q był stan niski (czyli wysoki na /Q), to po impulsie zegarowym (dokładnie: po odpowiednim jego zboczu) stan wysoki z /Q zostanie przepisany na Q; w następnym cyklu stan niski z /Q będzie przepisany na Q itd. Efektem działania dwójki jest więc dwukrotne zmniejszenie częstości impulsów na wyjściu w porównaniu z wejściem.



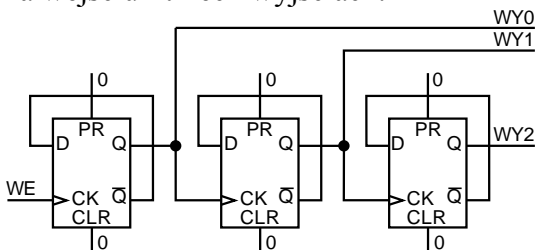
*Dwójka licząca  
z synchronicznego  
przerzutnika typu D.  
Schemat i przebiegi.*

Dwójkę liczącą można także uzyskać z przerzutników JK i to na kilka różnych sposobów.

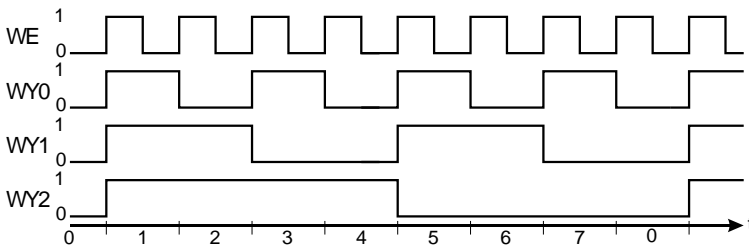


*Dwójki liczące z przerzutnika JK.*

Jeżeli połączymy wyjście dwójki liczącej z wejściem kolejnej, to otrzymamy układ dzielący częstość impulsów wejściowych przez 4 czyli, inaczej mówiąc, licznik zliczający do 4. Każda kolejna dwójka licząca podwaja pojemność takiego licznika. Jeżeli chcemy, by licznik udostępniał informację o liczbie zliczonych impulsów na zewnątrz, to wystarczy wyprowadzić na zewnątrz wyjścia poszczególnych dwójek liczących. Na rysunku przedstawiono licznik dzielący przez 8 (modulo 8) i stany logiczne na wejściu i trzech wyjściach.

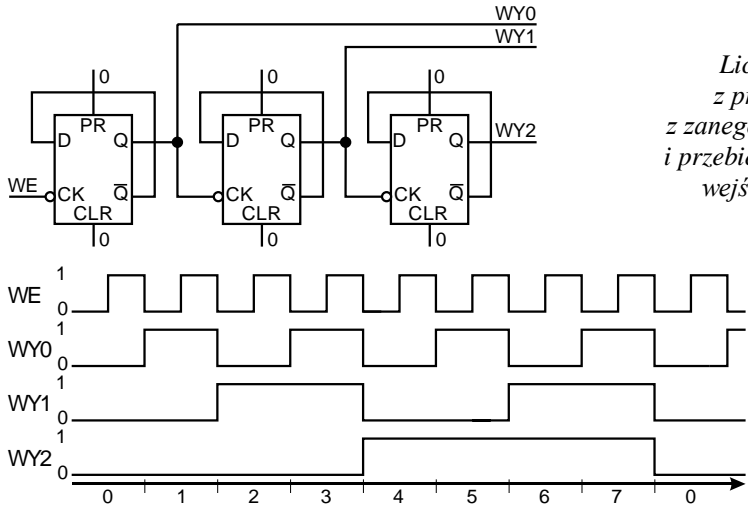


*Licznik modulo 8 z przerzutników D i przebiegi logiczne na jego wejściu i wyjściach.*



Otrzymany tak licznik to **licznik asynchroniczny**, gdyż to zmiana stanu na wyjściu jednej dwójki liczącej powoduje dopiero zmianę stanu na kolejnej itd.

Jeśli podobny licznik wykonamy z przerzutników z zanegowanymi wejściami, czyli reagującymi na opadające, a nie rosnące zbocze sygnału zegarowego, wówczas przebiegi stanów będą wyglądały inaczej.



*Licznik modulo 8  
z przerzutników D  
z zanegowanymi wejściami  
i przebiegi logiczne na jego  
wyjściu i wyjściach.*

W tak uzyskanym liczniku stany kolejnych wyjść możemy interpretować jako cyfry (o coraz większych wagach, czyli 1, 2, 4, 8 ...) liczby w zapisie binarnym. Stan wszystkich wyjść łącznie odpowiada po prostu liczbie zliczonych impulsów.

Możliwe jest zbudowanie licznika z dwójek liczących o pojemności mniejszej niż jego naturalna pojemność, czyli potęga liczby 2. Jeżeli chcemy ograniczyć pojemność licznika z 3 dwójek liczących do np. 5, należy dodać układ wykrywający taką liczbę (czyli stany wysokie na wyjściach WY0, o wadze 1 oraz WY2, o wadze 4 – tu wystarczy bramka AND) i wyjście takiego układu połączyć z wejściami zerującymi CLR wszystkich dwójek liczących w liczniku. Gdy pojawi się liczba 5, cały licznik zostanie natychmiast wyzerowany.

Zestawy dwójek liczących produkowane są w postaci układów scalonych. Przykładowo układ 7493 zawiera 4 przerzutniki JK z wejściami J i K ustawionymi na stałe na 1, przy czym większość wyjść dwójek liczących z wejściami kolejnych dwójek ma gotowe połączenia; układ posiada także 2 wejścia zerujące. Łącząc w szereg 2 liczniki 7493 dostajemy już licznik o pojemności 256 (16 razy 16).

## Budowa i działanie mikrokontrolera

Szybki rozwój technologiczny i spadek cen elektroniki, w tym też scalonych układów cyfrowych w ciągu ostatnich kilkunastu lat sprawił, że ogromna większość produktów m.in. z grupy tzw. elektroniki konsumenckiej zawiera programowalne układy, wykonujące mniej czy bardziej skomplikowane programy, które upraszczają w znacznym stopniu te urządzenia (trzeba używać mniejszej liczby elementów, np. układów scalonych) jednocześnie udostępniając konstruktorom ogromne możliwości uatrakcyjnienia budowanych urządzeń elektronicznych, które wcześniej, bez elementów programowalnych, były niedostępne.

W powszechnym użyciu są jednoukładowe mikrokomputery, zwane mikrokontrolerami ( $\mu\text{C}$ ), produkowane w postaci układu scalonego i zawierające w tym układzie wszystkie elementy wchodzące w skład typowego komputera: jednostkę centralną (CPU), zawierającą w sobie m.in. jednostkę-arytmetyczno-logiczną (ALU - układ wykonujący proste operacje arytmetyczne i logiczne na liczbach całkowitych, zwykle operujący na 2 argumentach (liczbach z 2 rejestrów) i umieszczający wynik w jednym rejestrze, pamięć ulotną o swobodnym dostępie (RAM), układy wejścia-wyjścia, czasem nawet bardzo rozbudowane, elementy pamięci stałej (ROM), pamięć programu (np. pamięć typu Flash), która może być wielokrotnie (dziesiątki tysięcy razy) modyfikowana, pamięć nieulotna do przechowywania danych pomiędzy kolejnymi uruchomieniami urządzenia (np. pamięć typu EEPROM – stosunkowo wolna, ale mogąca być setki tysięcy razy przeprogramowywana). W odróżnieniu od mikroprocesora, który musi współpracować z zewnętrznymi układami, np. zewnętrznymi pamięciami, układami wejścia-wyjścia, mikrokontroler jest jednostką autonomiczną, która sama w sobie zawiera wszystkie elementy niezbędne do działania, wyposażoną zazwyczaj w wiele różnego rodzaju wbudowanych interfejsów, umożliwiających bezpośrednią komunikację z bardzo różnymi urządzeniami zewnętrznymi.

Co najmniej kilkadziesiąt konkurujących firm na świecie masowo produkuje mikrokontrolery, nie ograniczając się do jednego modelu, a najczęściej produkując całe rodziny kontrolerów różniących się między sobą m.in. długością słowa jednostki obliczeniowej (zwykle 8 lub 16 bitów, ale czasem 32 lub nawet 64), rodzajami i wielkością wbudowanych pamięci, ilością wyprowadzeń (pogrupowanych zwykle w 8-bitowe porty), układami czasowo-zliczającymi (tzw. *timery*), częstością taktowania zegara (nawet do kilkuset MHz), rodzajami wbudowanych interfejsów komunikacyjnych,

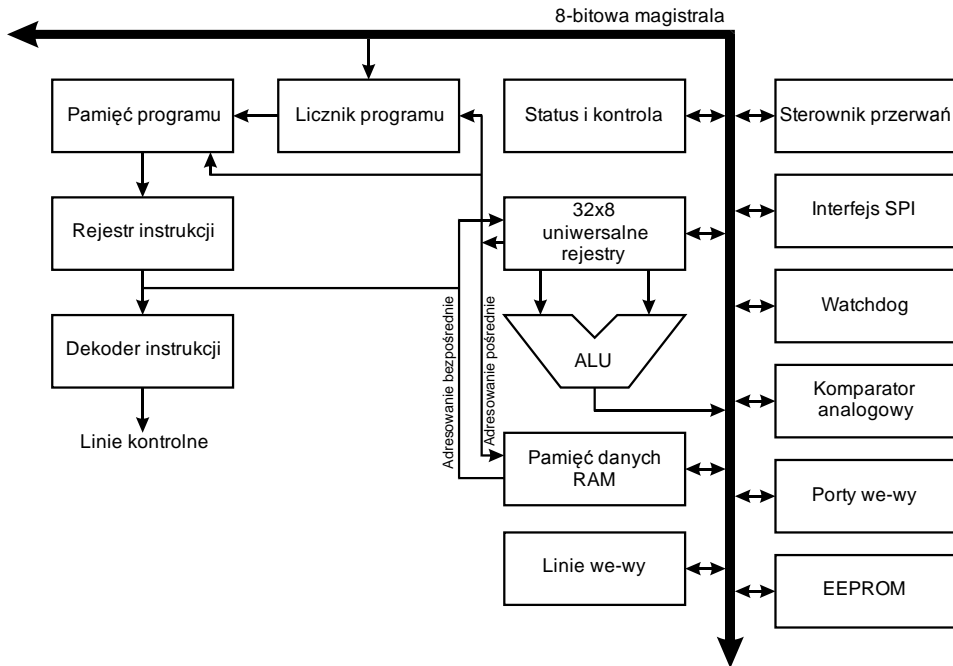
przetworników analogowo-cyfrowych i cyfrowo-analogowych, obecnością zegara czasu rzeczywistego (RTC), układu nadzorującego poprawną pracę (*watchdog*), który w pewnych okolicznościach może uruchomić program od nowa (restart), złożonością systemu przerwań czy wewnętrznymi czujnikami, np. temperatury czy też chociażby zakresem napięć zasilających, rodzajem obudowy (w tym różne techniki montażu) itd.

Niektóre rodziny mikrokontrolerów zdobyły bardzo dużą popularność, czy to z powodu lepszej dokumentacji, darmowych środowisk do pisania oprogramowania, prostoty (i dzięki temu niskiej ceny) programatorów umożliwiających zaprogramowanie układu napisanym programem czy np. z powodu wykorzystania danej rodziny w produkowanych masowo płytkach prototypowych, zawierających wlutowane mikrokontrolery, układy taktujące i zasilające, wygodne złącza do których doprowadzono porty mikrokontrolera i popularne interfejsy komunikacyjne (np. USB), umożliwiające wgranie oprogramowania bez konieczności posiadania programatora.

Jedną z najbardziej popularnych rodzin mikrokontrolerów, zwłaszcza wśród elektroników-amatorów (w tym wyjątkowo popularną od kilkunastu lat w Polsce) jest rodzina 8-bitowych mikrokontrolerów AVR, opracowana przez firmę Atmel (w 2016 roku przejętą przez konkurencję – Microchip). Rodzina ta, we wszystkich kilkudziesięciu produkowanych modelach, zawiera (niemal) identyczną jednostkę centralną, wykonująca (niemal) te same zestawy rozkazów, a pozostałe elementy już się mogą bardzo różnić między modelami (najprostsze układy mają tylko kilka wyprowadzeń, niewielką pamięć RAM i pamięć programu, najbardziej rozbudowane – ponad 100 wyprowadzeń, wiele rodzajów pamięci o dużej pojemności, dziesiątki różnych interfejsów i inne elementy). Zwykle program napisany na mniejszy, prostszy model może być, po co najwyżej drobnych modyfikacjach, uruchomiony na większym, bardziej skomplikowanym mikrokontrolerze z tej rodziny.

Na poniższym rysunku przedstawiono schemat blokowy mikrokontrolera z rodziny AVR.

Przykładowym mikrokontrolerem z rodziny AVR jest ATmega16. Wyprowadzenia tego mikrokontrolera dla wersji produkowanej w 2-rzędowej, 40-pinowej obudowie typu DIP do montażu przewlekane pokazane są schematycznie na kolejnym rysunku.



Schemat blokowy typowego mikrokontrolera z rodziny AVR.

(XCK/T0) PB0	1	40	PA0 (ADC0)
(T1) PB1	2	39	PA1 (ADC1)
(INT2/AIN0) PB2	3	38	PA2 (ADC2)
(OC0/AIN1) PB3	4	37	PA3 (ADC3)
(SS) PB4	5	36	PA4 (ADC4)
(MOSI) PB5	6	35	PA5 (ADC5)
(MISO) PB6	7	34	PA6 (ADC6)
(SCK) PB7	8	33	PA7 (ADC7)
RESET	9	32	AREF
VCC	10	31	GND
GND	11	30	AVCC
XTAL2	12	29	PC7 (TOSC2)
XTAL1	13	28	PC6 (TOSC1)
(RXD) PD0	14	27	PC5 (TDI)
(TXD) PD1	15	26	PC4 (TDO)
(INT0) PD2	16	25	PC3 (TMS)
(INT1) PD3	17	24	PC2 (TCK)
(OC1B) PD4	18	23	PC1 (SDA)
(OC1A) PD5	19	22	PC0 (SCL)
(ICP1) PD6	20	21	PD7 (OC2)

Wyprowadzenia ATmega16.

Zasilanie podawane jest na piny VCC i AVCC (+, od 4,5V do 5,5 V) oraz GND (masa, 0V). Wyprowadzenia XTAL1 i XTAL2 to podłączenia zewnętrznego kwarcu (opcja), służącego do generowania sygnału taktującego, RESET to wyprowadzenie, służące resetowaniu układu (gdy jest w stanie niskim), AREF to wyprowadzenie służące do podłączania np. zewnętrznego źródła napięcia odniesienia, wykorzystywanego przez przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC, woltomierz).

Pozostałe wyprowadzenia to cztery 8-bitowe porty wejścia/wyjścia, przy czym te wyprowadzenia mogą alternatywnie pełnić inną funkcję niż cyfrowe wejście lub wyjście, w zależności od tego jak skonfigurowane zostaną przez uruchomiony program wbudowane do ATmega16 urządzenia wejścia-wyjścia.

Główne cechy układu ATmega16 to:

- 8-bitowa architektura jednostki arytmetyczno-logicznej (ALU);



- 131 instrukcji (większość wykonuje się w 1 cyklu sygnału zegarowego);
- 32 (aż!) 8-bitowe rejestry ogólnego przeznaczenia, na których ALU może wykonywać operacje;
- możliwość pracy statycznej (czasowego zatrzymania programu przy braku sygnału zegarowego);
- wbudowany układ wykonujący mnożenie (2 cykle zegara);
- 16 kilobajtów pamięci programu typu Flash (wytrzymuje minimum 10000 operacji ponownego zapisu);
- 512 bajtów nieulotnej pamięci EEPROM (minimum 100000 operacji zapisu);
- 1 kilobajt statycznej pamięci RAM;
- zaawansowany interfejs JTAG, umożliwiający m.in. programowanie i testowanie programu przez jego wykonywanie po 1 kroku;
- 2 8-bitowe i 1 16-bitowy liczniki/zegary z programowalnym dzielnikiem częstości (*prescaler*);
- licznik czasu rzeczywistego;
- 4 kanały PWM (generatory przebiegów prostokątnych o regulowanej częstości i wypełnieniu, mogące w niektórych zastosowaniach zastępować przetworniki cyfrowo-analogowe);
- sprzętowy interfejs popularnej odmiany transmisji szeregowej I2C (ze względów licencyjnych nazywany w dokumentacji firmy Atmel TWI);
- programowalny układ szeregowej komunikacji asynchronicznej (USART), zgodnej ze standardem RS-232 (w stopniu umożliwiającym komunikację w najczęściej stosowanej odmianie tego interfejsu);
- szeregowy interfejs SPI;
- układ watchdog;
- komparator analogowy;
- programowalny kontroler poprawnego zasilania;
- kalibrowany oscylator (źródło sygnału zegarowego);
- zewnętrzne i wewnętrzne źródła przerw;
- 6 różnych trybów oszczędzania energii i uśpienia;
- częstotliwość taktowania do 16 MHz;
- niski pobór prądu.

Zwrócić trzeba uwagę na to, że stosunkowo duża ilość wbudowanych urządzeń i interfejsów sprawia, że nie wszystkie mogą być jednocześnie aktywne, bo różne z nich korzystają często z tych samych wyprowadzeń (pinów), a wszystkie wyprowadzenia 4 portów mają jakieś alternatywne funkcje.

Pracujący mikrokontroler pobiera sekwencyjnie, w takt zegara systemowego rozkazy z pamięci Flash i wykonuje je jeden po drugim, większość

w 1 takcie zegara. Rozkazy można podzielić na kilka grup i są wśród nich m.in.:

- arytmetyczne (dodawanie, odejmowanie, inkrementacja, dekrementacja, mnożenie itp.);
- logiczne (operacje na bitach, jak AND, OR, Ex-OR, przesunięcia bitów w lewo lub prawo, negacja, ustawianie i kasowanie bitów itp.);
- skoki (zmiana naturalnego przebiegu programu) zarówno warunkowe jak i bezwarunkowe, skoki bezpośrednie i pośrednie, wywołanie i powrót z podprogramu itp.);
- przesyłanie danych (kopiowanie rejestrów, wpisanie liczby do rejestru, przenoszenie danych między różnymi rodzajami pamięci, odczyt i zapis portów itp.)
- operacje na bitach;
- instrukcje kontrolujące pracę mikrokontrolera (usypianie ATmega16, reset układu *watchdog* itp.);

Program źródłowy dla mikrokontrolerów AVR można pisać w assemblerze (języku, w którym każdemu rozkazowi maszynowemu, jaki może wykonać CPU, odpowiada mnemonik czyli kilkuliterowy, symboliczny opis instrukcji do wykonania). Zobaczmy przykład fragmentu programu, który pobiera z portów A oraz B dwie 8-bitowe liczby, dodaje je do siebie zaś sumę udostępnia na wyprowadzeniach portu C. Przed odczytaniem liczb z portów A i B są one ustawiane jako wejściowe, a port C jako wyjściowy:

```
; ustaw PORTA i PORTB jako wejściowe, PORTC jako wyjściowy
clr r16                ; zeruj rejestr r16
out DDRA, r16         ; skopiuj r16 do DDRA
out DDRB, r16         ; skopiuj r16 do DDRB
ldi r16, 0b11111111  ; ustaw wszystkie bity w r16
out DDRC, r16         ; skopiuj r16 do DDRC

; wczytaj 2 liczby z PORT A i PORTB
in r16, PORTA         ; wczytaj do r16 liczbę z PORTA
in r17, PORTB         ; wczytaj do r17 liczbę z PORTB

; dodaj je do siebie
add r16, r17          ; dodaj r16 i r17; suma w r16

; wystaw wynik w PORTC
out PORTC, r16        ; wystaw wynik z r16 w PORTC
```

W powyższym przykładzie instrukcje assemblera (mnemoniki) oznaczono kolorem niebieskim, parametry, czyli np. nazwy rejestrów ogólnego przeznaczenia (r16, r17), nazwy rejestrów, którym odpowiadają urządzenia wejścia/wyjścia (PORTA, DDRA...), liczby (0b11111111 – binarnie

zapisana liczba 255) oznaczono kolorem czarnym, zaś komentarze (od średnika do końca wiersza) są zielone.

Istnieje szereg języków wyższego poziomu niż assembler (np. C, BASIC), w których także pisze się programy dla AVR. Zwolennicy tych języków podnoszą argument szybszego pisania w nich programów, bo nie trzeba wypisywać „atomowych” instrukcji, a można korzystać z instrukcji, składni języka i bibliotek zastępujących czasem wiele instrukcji assemblera. Zwolennicy pisania programów w assemblerze podnoszą argument możliwości napisania w nim kodu zoptymalizowanego, np. pod względem zależności czasowych i/lub objętości kodu oraz pełną kontrolę nad powstającym programem, trudną lub wręcz niemożliwą do uzyskania w językach wyższego poziomu.

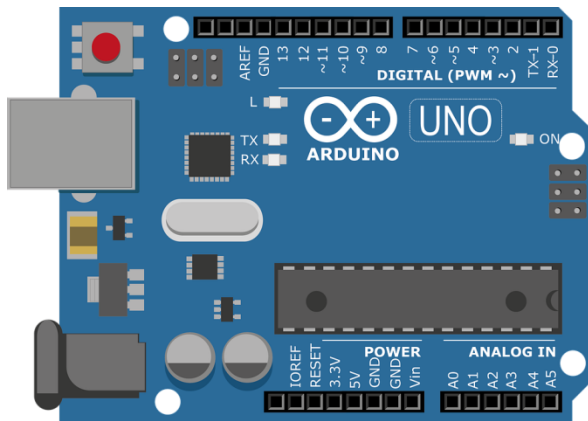
Po skompilowaniu programu napisanego w języku wysokiego poziomu lub asemblacji programu w assemblerze wynikowy kod maszynowy i ewentualne dane wgrywa się, np. za pomocą odpowiedniego programatora, do pamięci Flash kontrolera.

Po uruchomieniu (zasileniu) mikrokontrolera wykonywany jest reset CPU, m.in. licznik programu ustawiany jest na 0, wszystkie porty ustawiane są na wejściowe, w rejestrach wewnętrznych ustawiane są domyślne wartości). Pierwszy rozkaz do wykonania (i parametry dla tego rozkazu) CPU pobiera spod adresu 0 w pamięci Flash, następnie sekwencyjnie z kolejnych komórek pamięci. Ten naturalny bieg programu mogą zmienić np. rozkazy skoków (warunkowe i bezwarunkowe) czy inne rozkazy sterujące przebiegiem programu. Program jest wykonywany aż do wyłączenia zasilania, chyba że jednym z rozkazów w programie jest rozkaz uśpienia mikrokontrolera (mnemonik „sleep”). Z uśpienia (mamy do dyspozycji kilka jego różnych trybów) mikrokontroler może być wybudzony do dalszego wykonywania programu za pomocą odpowiedniego zdarzenia sprzętowego (przed uśpieniem poprzez konfigurację odpowiednich rejestrów należy ustawić, jakie zdarzenie może wybudzić mikrokontroler; zdarzeniem może być np. zmiana stanu logicznego na wybranym wyprowadzeniu mikrokontrolera).

W mikrokontrolerach AVR zaimplementowany jest mechanizm obsługi przerwania sprzętowych. Niektóre zdarzenia sprzętowe, jeśli zostały odpowiednio skonfigurowane programowo, mogą wymuszać przerwanie głównego programu w dowolnym jego miejscu i wykonywanie w odpowiedzi na zdarzenie sprzętowe podprogramu przewidzianego do jego obsługi. Po zakończeniu wykonywania podprogramu obsługi zdarzenia mikrokontroler powraca do rozkazu następnego po ostatnim rozkazie wykonanym przed przerwaniem.

Efektywne wykorzystanie wszystkich możliwości danego modelu mikrokontrolera wymaga dogłębnego przeanalizowania jego budowy i opanowania języka niskiego poziomu - asemblera. Typowa dokumentacja sprzętowa mikrokontrolera ma objętość kilkuset do tysiąca stron, zaś szczegółowy opis rozkazów to kolejny, kilkusetstronicowy dokument, więc żeby ułatwić korzystanie z mikrokontrolerów tym, którzy nie mają możliwości czy chęci poświęcenia dużej ilości czasu na żmudną naukę, stworzono pewne rodziny płytek prototypowych z mikrokontrolerem i innymi niezbędnymi/przydatnymi elementami. Do tych płytek powstały środowiska programistyczne, umożliwiające pisanie kodu w językach wysokiego poziomu i ogromne ilości bibliotek zawierających m.in. funkcje pozwalające tym urządzeniom komunikować się z dołączonymi urządzeniami zewnętrznymi, praktycznie dowolnego rodzaju.

Najpopularniejsza rodzina płytek prototypowych opartych głównie na mikrokontrolerach Atmel AVR nosi nazwę Arduino. Na poniższym rysunku przedstawiona jest płytka Arduino Uno z mikrokontrolerem ATmega328.



*Płytko Arduino Uno  
z mikrokontrolerem ATmega328.*

Arduino jest projektem typu open hardware. Każdy może produkować klony Arduino i je dowolnie modyfikować. Jedynym wymogiem prawnym jest, by klony były rozprowadzane pod inną niż Arduino nazwą. Programy pisze się w języku opartym na C/C++, zazwyczaj w środowisku Arduino IDE, zawierającym edytor koloryzujący składnię, automatyczne wcięcia i umożliwiający kompilowanie i wysyłanie programu do płytki Arduino. Programiści piszący pod Arduino muszą zdefiniować 2 funkcje:

- `setup()` – funkcja wykonywana 1 raz na starcie programu, w której powinna być umieszczona konfiguracja samego Arduino jak i dołączonych urządzeń zewnętrznych;

- loop() – funkcja wywoływana w nieskończonej pętli (w praktyce – do wyłączenia zasilania), w której realizowany jest właściwy program;

Prosty program dla płytki Arduino Uno, który naprzemiennie zapala i gasi diodę podłączoną do wyprowadzenia nr 13 z częstotliwością 1 Hz i wypełnieniem 50%, może wyglądać następująco:

```
#define LED 13

void setup() {
  pinMode(LED, OUTPUT);      // pin 13 jako wyjście
}

void loop() {
  digitalWrite (LED, HIGH);  // włączenie diody LED
  delay(500);                // pauza 500 ms
  digitalWrite (LED, LOW);   // wyłączenie diody LED
  delay(500);                // pauza 500 ms
}
```

Główna strona projektu Arduino dostępna jest pod adresem internetowym:  
<https://www.arduino.cc>.