Programowanie w elektronice: Wprowadzenie do elektroniki

Projekt „Matematyka dla Ciekawych Świata”,
Robert Ryszard Paciorek
<rrp@opcode.eu.org>

2024-10-03

Elektronika zajmuje się wytwarzaniem i przetwarzaniem sygnałów w postaci prądów i napięć elektrycznych. Zjawisko prądu związane jest z przepływem ładunku (z uporządkowanym ruchem nośników ładunku), aby wystąpiło konieczna jest różnica potencjałów (napięcie) pomiędzy końcami przewodnika, prowadzi ono do neutralizacji tej różnicy. Dlatego dla podtrzymania stałej różnicy potencjałów konieczne jest istnienie źródeł prądu, prowadzących do rozdzielania ładunków dodatnich od ujemnych.

1 Podstawowe pojęcia

1.1 Napięcie elektryczne

Napięcie elektryczne U pomiędzy punktem A i B (jakiegoś obwodu) jest to różnica potencjału elektrycznego w punkcie A i w punkcie B.

1.2 Potencjał elektryczny

Potencjał elektryczny V w punkcie A jest skalarną wielkością charakteryzującą pole elektryczne w danym punkcie. Odpowiada pracy którą trzeba by wykonać aby przenieść ładunek q z tego punktu do nieskończoności podzielonej przez wielkość tego ładunku (jest niezależny od wartości q). W elektronice używa się wartości potencjałów względem umownego potencjału zerowego GND (co umożliwia traktowanie ich jako różnic potencjałów - napięć elektrycznych), w efekcie tego określenia ”(stałe) napięcie” i ”potencjał” bardzo często stosowane są zamiennie.

1.3 Masa

Masa (oznaczana jako GND) jest to umowny potencjał zerowy, względem którego wyraża się inne potencjały w układzie (co umożliwia traktowanie ich jako różnic potencjałów - napięć elektrycznych). Potencjał ten może być równy potencjałowi ziemi (masie ochronnej PE), bądź może być z nim nie związany (układy izolowane). W sytuacji gdy w układzie występują części nie połączone ze sobą elektrycznie (na przykład zasilane z osobnych źródeł napięcia lub odizolowane transformatorem) możemy mówić o kilku odizolowanych masach.

Schematy elektryczne wg. elektronika

Typowo elektronicy na schematach nie rysują źródeł napięcia (np. w postaci symbolu baterii[a]), zamiast tego umieszczają znaczniki potencjałów zasilania (np. +5V, +3V3, Vcc, Vbus) względem masy i znaczniki masy (GND, ⏚).

Typowo potencjały wyższe umieszcza się na schemacie wyżej a niższe niżej (czyli 5V będzie na górze, a GND na dole), a przepływ prąd odbywa się w relacji od lewej do prawej i z góry na dół. Jest to ogólna reguła, ułatwiająca czytanie schematów, nie jest ona jednak wyrocznią i trafiają się od niej odstępstwa, podyktowane zwiększeniem czytelności schematu.

Schematy zamieszczane w tym skrypcie rysowane są według tych zasad.

a. chyba że chodzi o podkreślenie, iż dane zasilanie faktycznie odbywa się z baterii lub akumulatora

1.4 Natężenie prądu

Natężenie prądu elektrycznego I (określane skrótowo jako prąd) jest to stosunek przemieszczonego ładunku do czasu jego przepływu.

1.5 Prawo Ohma

Dla elementów liniowych (np. zwykły kawałek przewodu) zachodzi proporcjonalność natężenia prądu płynącego przez taki element do napięcia pomiędzy jego końcami: $R = \frac{U}{I}$. Zależność ta nosi nazwę prawa Ohma[1], a stosunek ten nazywamy oporem (rezystancję).

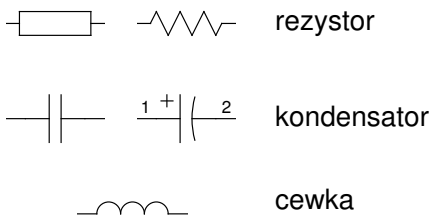
1.6 Prawa Kirchhoffa

Węzeł układu (sam w sobie, pomijając zjawiska pasożytnicze) nie jest w stanie gromadzić ładunku elektrycznego zatem: *Suma prądów wpływających do węzła jest równa sumie prądów wypływających z tego węzła.*

Jeżeli rozważamy obwód zamknięty od punktu A z potencjałem V_A to sumując napięcia na kolejnych elementach obwodu (oporach, źródłach napięciowych, etc) z uwzględnieniem ich znaku gdy wrócimy do punktu A to potencjał nadal musi wynosić V_A, zatem: *Suma spadków napięć w zamkniętym obwodzie jest równa zeru.*

2 Elementy bierne

2.1 Rezystor



Rezystor (opornik) wprowadza do układu rezystancję związaną z swoją wartością nominalną. Typowo służy do ograniczania wartości prądu przez niego przepływającego.

Powoduje wydzielanie się energii (cieplnej) związanej z stratami na rezystancji - moc wydzielana dana jest zależnościami: $P = UI = \frac{U^2}{R} = I^2R$, czyli przy stałym napięciu przyłożonym do rezystora im większy jego opór tym mniejsza moc się wydzieli (gdyż popłynie mniejszy prąd), ale przy stałym prądzie płynącym przez rezystor moc rośnie wraz ze wzrostem oporu.

Rezystor jest elementem spełniającym prawo Ohma[2].

2.1.1 inne parametry rezystora

Rzeczywisty rezystor oprócz samej wartości oporu elektrycznego charakteryzują też inne parametry, m.in. takie jak:

- maksymalna moc która może zostać wydzielona na danym elemencie,
- dokładność, czyli to jak bardzo opór danego elementu może być odległy od wartości nominalnej,
- stabilność oporu w funkcji w funkcji temperatury oraz w funkcji napięcia przyłożonego do elementu.

2.1.2 rezystancyjny dzielnik napięcia

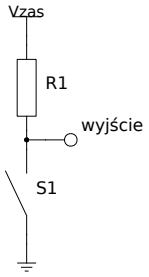
Jednym z najprostszych, użytecznych obwodów są dwa rezystory połączone szeregowo z źródłem napięcia. Układ taki nazywamy rezystancyjnym dzielnikiem napięcia. Pozwala on na uzyskanie napięcia niższego od napięcia źródła zgodnie z proporcją użytych rezystorów. Zobacz symulację: http://ln.opcode.eu.org/d

1. Prawo Ohma nie jest uniwersalnym prawem przyrody, a jedynie relacją empiryczną spełnioną w pewnym zakresie parametrów dla niektórych materiałów.
2. Jest to zasadniczo jedyny element elektroniczny, który podlega temu prawu. Niektóre z elementów (jak kondensatory i cewki) podlegają rozszerzeniu prawa Ohma dla prądu przemiennego. Wiele innych elementów (jak np. diody i tranzystory) nie podlegają prawu Ohma.

zielnik. Zwróć uwagę że napięcie wyjściowe z takiego układu jest bardzo zależne od pobieranego prądu / wielkości dołączonego obciążenia (w tym celu możesz użyć przełączników umieszczonych w symulowanym układzie), z tego powodu dzielnik rezystancyjny stosowany jest głównie w przypadkach gdy wiemy że obciążenie będzie pobierało niewielki prąd.

Rezystancyjny dzielnik napięcia jest bardzo często stosowany w celu proporcjonalnego podziału (obniżenia) napięcia wejściowego nieznanej (zmiennej) wielkości (np. celem jego pomiaru, przy użyciu miernika o ograniczonej skali), a nie w celu uzyskania napięcia wyjściowego o konkretnej wartości (co można uzyskać w lepszy - bardziej stabilny sposób).

2.1.3 Rezystor podciągający



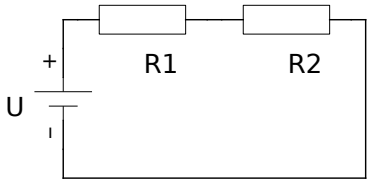
Rezystor jest też często używany w celu wymuszenia domyślnego poziomu napięcia na jakiejś linii. Jest to zasadniczo forma dzielnika w którym jeden z rezystorów został zastąpiony jakiegoś rodzaju przełącznikiem, czyli czymś co w zależności od swojego stanu ma prawie zerową albo (prawie) nieskończoną rezystancję. Zobacz symulację: http://ln.opcode.eu.org/pullup

Rozwiązanie takie ma zastosowanie głównie na jakiś liniach sygnalizacyjnych, z których nie jest pobierany żaden większy prąd. W efekcie, w układzie pokazanym obok jeżeli styk jest rozwarty to prąd nie płynie, zatem spadek na rezystorze wynosi zero i na wyjściu mamy napięcie zasilania. Jeżeli styk zostanie zwarty prąd płynie, ale ze względu na małą rezystancję styku praktycznie całe napięcie odkłada się na rezystorze i na wyjściu mamy zero voltów.

Układ taki pozwala na przykład stosowanie zwykłego styku zwieranego zamiast przełączalnego i jest bardzo często spotykany. Oczywiście możemy zamienić rezystor z przełącznikiem miejscami i wtedy domyślnym stanem (przy rozwartym styku) będzie zero woltów.

Zadanie 2.1.1

Rezystory R_1 i R_2 połączone zostały szeregowo i podłączone do źródła napięcia U, tak jak pokazano na powyższym schemacie.

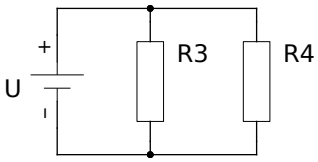


a) Zapisz zależność (wzór) określający spadek napięcia na rezystorze R_1.

b) Zapisz zależność (wzór) określający sumaryczną moc, która wydzieli się na obu tych rezystorach.

Zadanie 2.1.2

Rezystory R_3 i R_4 połączone zostały równolegle i podłączone do źródła napięcia U, tak jak pokazano na powyższym schemacie.

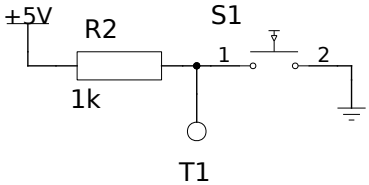


a) Zapisz zależność (wzór) określający prąd płynący przez rezystor R_3.

b) Zapisz zależność (wzór) określający łączną rezystancję obu rezystorów (czyli ich rezystancję zastępczą).

Zadanie 2.1.3

Podaj wartość napięcia (względem GND) w punkcie T1 w sytuacji gdy S1 jest wciśnięty (zwarty) oraz w sytuacji gdy jest rozwarty (nie przewodzi). Odpowiedź krótko uzasadnij.



2.2 Kondensator

Kondensator wprowadza do układu pojemność związaną z swoją wartością nominalną. Pojemność wyraża zdolność do gromadzenia ładunku przez dany element - im większa pojemność tym więcej ładunku (przy takim samym przyłożonym napięciu) zgromadzi element. $C = \frac{q}{U}$

Kondensator typowo służy do ograniczania zmian napięcia (poprzez gromadzenie energii w polu elektrycznym) lub wprowadzenia opóźnienia (stałej czasowej) związanej z jego ładowaniem / rozładowywaniem. Czas potrzebny do zmiany napięcia na kondensatorze dany jest zależnością: $\Delta T = \frac{C \cdot \Delta U}{I}$.

Zobacz symulację procesu ładowania / rozładowywania kondensatora: http://ln.opcode.eu.org/cap (klikając na przełącznik w górnej części schematu można wybierać pomiędzy rozładowywaniem a ładowaniem kondensatora, zwróć uwagę na różną wartość oporu użytego do tych operacji).

Innym częstym zastosowaniem jest kondensatora jest odcinanie składowej stałej – kondensator stanowi rozwarcie dla prądu stałego, ale przewodzi prąd zmienny (ze względu na prąd związany z jego ładowanie / rozładowywaniem). Zobacz symulację: http://ln.opcode.eu.org/cap_ac

Najistotniejszym parametrem rzeczywistych kondensatorów oprócz pojemności nominalnej jest maksymalne napięcie przy którym może pracować oprócz tego istotne mogą być parametry takie jak rezystancja wewnętrzna, maksymalna temperatura w której kondensator może pracować, żywotność tego elementu, itd.

2.3 Cewka

Cewka (dławik) wprowadza do układu indukcyjność związaną z swoją wartością nominalną. Samodzielnie występująca cewka typowo służy do ograniczania zmian prądu (poprzez gromadzenie energii w polu magnetycznym). Czas potrzebny zmiany prądu płynącego przez cewkę (dławik stawia opór takiej zmianie tak jak kondensator zmianie napięcia) dany jest zależnością: $\Delta T = \frac{L \cdot \Delta I}{U}$.

Głównym (ale nie jedynym) parametrem rzeczywistej cewki oprócz indukcyjności jest maksymalny prąd który może przewodzić.

2.3.1 Przekaźniki, styczniki i transformatory

Cewki możemy spotkać w urządzeniach takich jak przekaźniki, czy styczniki[3]. Nawinięte na odpowiednim rdzeniu pełnią one tam funkcję elektromagnesu odpowiedzialnego za zmianę fizycznej pozycji styków prowadzącą do ich zwarcia lub rozwarcia (przełączania).

Innym urządzeniem opartym o cewki są transformatory - wykorzystują one kilka cewek na wspólnym rdzeniu do przekazywania energii poprzez pole magnetyczne (jedna z cewek dzięki przepływowi zmiennego prądu elektrycznego wytwarza zmienne pole magnetyczne, inna dzięki zmiennemu polu magnetycznemu wytwarza przemienny prąd elektryczny). Transformator typowo służy do zmiany napięcia lub separacji galwanicznej obwodów.

2.3.2 Rozłączanie cewki

Jako że cewka jest elementem który dąży do zachowania płynącego przez niego prądu, to w przypadku rozwarcia obwodu zawierającego cewkę napięcie na niej będzie rosło i bez problemów może wielokrotnie przekroczyć napięcie zasilania. Zobacz symulację: http://ln.opcode.eu.org/cewka (rozłącz przełącznik i zaobserwuj co dzieje się z napięciem na cewce). Zjawisko to bywa użyteczne i jest wykorzystywane w niektórych układach (np. przetwornicach podnoszących napięcie), ale często bywa też niepożądane, a nawet bardzo szkodliwe – może prowadzić do uszkadzania innych elementów w obwodzie (w szczególności elementu przełączającego).

Aby przeciwdziałać temu zjawisku można dołączyć równolegle do cewki odpowiednio mały opór, który pozwoli na rozładowanie się cewki. Wadą takiego rozwiązania są straty związane z przewodzeniem przez ten rezystor w momencie gdy cewka jest zasilona. Warto zauważyć że pojawiające się na cewce napięcie ma odwrotny znak (kierunek) niż spadek napięcia na tym elemencie w trakcie pracy. Pozwala to na podłączenie

3. Zasadniczo przekaźnik i stycznik jest to to samo urządzenie. Przyjmuje się rozróżnienie w nazewnictwie - przekaźniki przełączają mniejsze prądy niż styczniki.

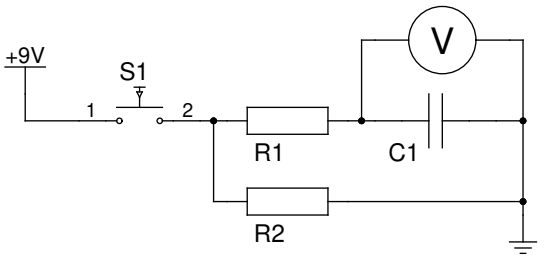
równolegle z cewką elementu który przewodzi tylko w jednym kierunku[4], w taki sposób aby w normalnym stanie nie przewodził, a po odłączeniu zasilania cewki pozwalał na jej rozładowanie. Takim elementem jest dioda.

2.4 Zadania praktyczne

Zadanie 2.4.1

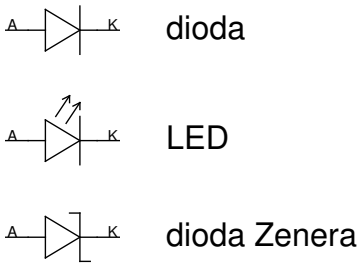
Zbuduj układ przedstawiony na schemacie i zaobserwuj zmianę napięcia na kondensatorze w momencie załączania, wyłączania zasilania.

Zobacz jak zmieni się działanie układu gdy zmienisz wartości elementów (np. wartość rezystora R2).



3 Dioda

Dioda idealna to element przewodzący prąd tylko w jednym kierunku. Symbole najpopularniejszych typów diod pokazane zostały obok. Dioda jest elementem nieliniowym – spadek napięcia na przewodzącej diodzie nie spełnia prawa Ohma i jest prawie stały (niezależny od prądu).



Rzeczywiste diody przewodzą prąd zdecydowanie chętniej w jednym kierunku niż w drugim (na ogół przewodzenie w kierunku zaporowym się pomija) ponadto charakteryzują je cechy zależne od technologi wykonania takie jak:

- spadek napięcia w kierunku przewodzenia (typowo dla diod krzemowych 0.6V - 0.7V, a dla diod Schottky'ego 0.3V)
- napięcie przebicia - napięcie, które przyłożone w kierunku zaporowym powoduje znaczące przewodzenie diody w tym kierunku - w większości przypadków parametr którego nie należy przekraczać, jednak wykorzystywane (i stanowiące ich parametr) w niektórych typach diod
- maksymalny prąd przewodzenia
- czas przełączania (związany głównie z pasożytniczą pojemnością złącza) - zdecydowanie krótszy (około 100 ps) w diodach Schottky'ego niż w diodach krzemowych,.

Ponadto stosowane są m.in.:

- diody Zenera - wykorzystuje się (charakterystyczną dla danego typu) wartość napięcia przebicia do uzyskania w układzie spadku napięcia o tej wartości,
- diody świecące (LED) - emitujące światło w trakcie przewodzenia (na elemencie występuje stały spadek napięcia, jasność zależy od natężenia prądu),
- fotodiody - będące detektorami oświetlenia (przewodzenie spolaryzowanej w kierunku zaporowym zależy od ilości padającego na element światła, niespolaryzowana pod wpływem oświetlenia staje się źródłem prądu).

4. Nawet jeżeli element ten fizycznie jest obok elementu przełączającego powinien być podłączany równolegle do cewki a nie do elementu przełączającego.

❣ PAMIĘTAJ ❣

Dioda jest elementem dla którego nie jest spełnione prawo Ohma. Dioda charakteryzuje się prawie stałym spadkiem napięcia w kierunku przewodzenia.

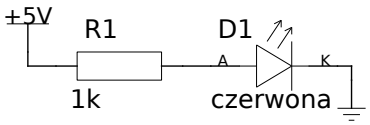
Dlatego, jeżeli do diody przyłożymy napięcie większe od jej napięcia przewodzenia (np. do czerwonej diody LED o spadku około 1.7V przyłożymy napięcie 5V) przez układ taki popłynie bardzo duży prąd (często równy prądowi zwarciowemu naszego źródła), co doprowadzi do zniszczenia diody.
Zobacz symulację: http://ln.opcode.eu.org/led

Z tego powodu diody LED podłączamy prawie zawsze[a] z szeregowym rezystorem służącym do ograniczenia prądu.

a. W przypadku innego typu diod prąd przez nie płynący też musi być limitowany w jakiś sposób - np. w prostownikach rolę tego rezystora pełni obciążenie.

Zadanie 3.0.1

Oszacuj wartość prądu płynącego przez R1. Odpowiedź krótko uzasadnij.



3.1 prostownik

Prostownik służy do zamiany napięcia przemiennego (zmieniającego znak) na napięcie zmienne o stałym znaku. Funkcję tą może pełnić nawet pojedyncza dioda – mamy wtedy do czynienia z prostownikiem jednopołówkowym, charakteryzującym się tym że napięcie na jego wyjściu spada przez połowę okresu wynosi zero – zobacz symulację http://ln.opcode.eu.org/prost1. Lepszym i częściej stosowanym rozwiązaniem jest prostownik pełnookresowy (dwupołówkowy). Najczęstszą jego realizacją jest tzw. mostek Graetza, czyli układ 4 diod połączonych w taki sposób iż dwie z nich zawsze (w każdym punkcie napięcia wejściowego) przewodzą – zobacz symulację http://ln.opcode.eu.org/prost2. Wadą takiego układu jest znaczny spadek napięcia na mostku, wynoszący dwukrotność spadku napięcia na pojedynczej diodzie.

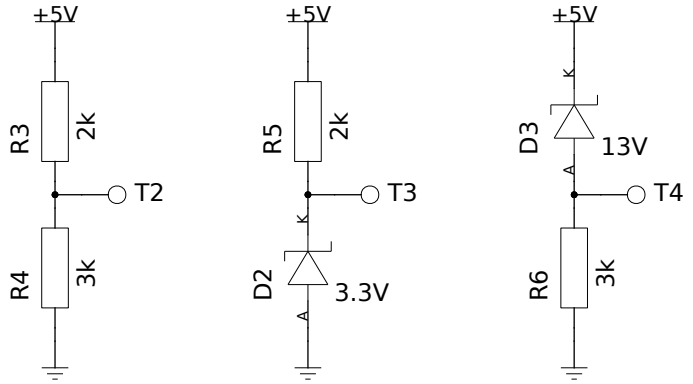
3.1.1 trójfazowe 😎

Istnieją również układy prostowników napięcia trójfazowego, charakteryzują się one m.in. niższymi tętnieniami napięcia wyjściowego – dla prostowników jednofazowych wacha się ono (pomijając spadki na diodach) od 0 do $V_{LN}\sqrt{2}$, a dla pełnookresowego trójfazowego od $V_{LL}\sqrt{2}\sin 60$ do $V_{LL}\sqrt{2}$ (gdzie V_{LN} to napięcie skuteczne pomiędzy fazą a przewodem neutralnym, a $V_{LL} = V_{LN}\sqrt{3}$ to napięcie skuteczne międzyfazowe). Zobacz symulację: http://ln.opcode.eu.org/prost3.

3.2 dzielnik napięcia z diodą Zenera

W rozdziale 2.1.2 omawialiśmy rezystancyjny dzielnik napięcia złożony z dwóch rezystorów. Wadą takiego układu była duża zależność napięcia wyjściowego od obciążenia. Zjawisko to można ograniczyć zastępując jeden z rezystorów (ten równolegle połączony z obciążeniem) diodą Zenera w polaryzacji zaporowej, która charakteryzuje się dość stałym spadkiem napięcia. Zobacz symulację http://ln.opcode.eu.org/zener, zauważ że nadal nie jest to rozwiązanie idealne, ale znacznie bardziej stabilne od poprzedniego.

Zadanie 3.2.1

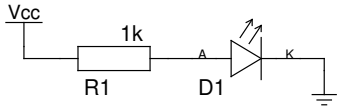


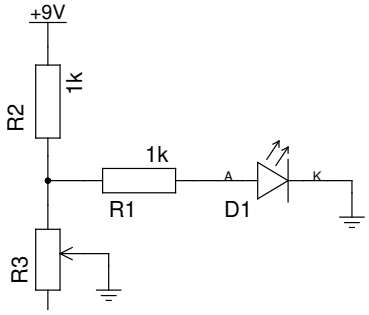
Podaj wartość napięcia (względem GND) w punkach T2, T3, T4. Odpowiedź krótko uzasadnij.

3.3 Zadania praktyczne

Zadanie 3.3.1

Zbuduj układ przedstawiony na schemacie i zaobserwować że dla różnych napięć wejściowych (z zakresu 5- 13V) na diodzie świecącej występuje stały spadek napięcia. Zaobserwuj że zmianie ulega wartość prądu płynącego w takim obwodzie oraz że wynika ona z napięcia odłożonego na rezystorze i wartości jego rezystancji.

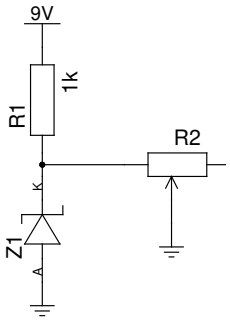




Jeżeli nie posiadasz regulowanego źródła napięcia możesz w jego roli użyć dzielnik z rezystorem nastawnym, tak jak pokazano na schemacie po lewej.

Zadanie 3.3.2

Zbuduj układ stabilizacji napięcia w oparciu o diodę Zenera przedstawiony na schemacie obok.
Zastanów się nad sposobem działania tego układu – w tym celu dokonaj pomiarów napięcia wyjściowego w zależności od napięcia wejściowego.
Zobacz jak na napięcie wyjściowe wpływa wielkość obciążenia symulowanego przez R2.



4 Tranzystory

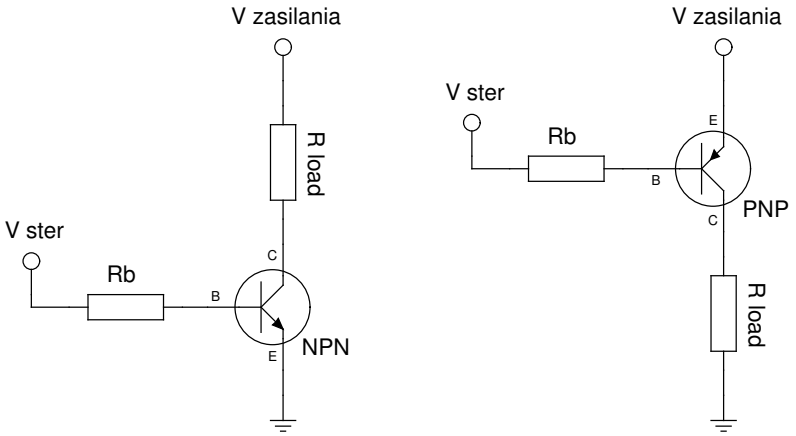
Tranzystor jest to element o regulowanym elektrycznie przewodzeniu prądu (oporze), często wykorzystywany do wzmacniania sygnałów lub jako przełącznik elektroniczny (klucz tranzystorowy). Klucz jest układem przełączającym wykorzystującym dwa skrajne stany pracy tranzystora - zatkania (tranzystor nie przewodzi), nasycenia (tranzystor przewodzi z minimalnymi ograniczeniami).

4.1 NPN

Prąd przepływający pomiędzy kolektorem a emiterem jest funkcją prądu przepływającego pomiędzy bazą a emiterem: $I_C = \beta I_B$. Napięcie pomiędzy kolektorem a emiterem wynosi: $U_{CE} = U_{zasilania} - I_C \cdot R_{load}$. Napięcie to nie może jednak spaść poniżej wartości minimalnej wynoszącej około 0.2V, gdy z powyższych zależności wynikałby taki spadek to tranzystor pracuje w stanem nasycenia i $U_{CE} \approx 0.2V$.

Aby wprowadzić tranzystor NPN w stan zatkania należy podać na jego bazę potencjał mniejszy lub równy potencjałowi emitera (zakładamy że potencjał kolektora jest nie mniejszy niż emitera - co ma miejsce w typowych warunkach polaryzacji tranzystora NPN), czyli $U_{BE} \leq 0$.

Aby wprowadzić tranzystor NPN w stan nasycenia należy na jego bazę wprowadzić potencjał większy od potencjałów emitera i kolektora, uzyskuje się to poprzez wprowadzenie do tranzystora prądu bazy $I_B \gg \frac{U_{zasilania}}{\beta R_{load}}$.



Zobacz symulację pokazującą pracę tranzystora NPN w trybie klucza: http://ln.opcode.eu.org/npn. Zwróć uwagę na wartości napięć i prądów.

Zobacz co dzieje się przy próbie podłączenia bazy tranzystora do potencjału znacznie wyższego niż potencjał emitera – złącze baza-emiter jest takim samym złączem z jakim mamy do czynienia w diodzie i tak jak w przypadku diody występuje na nim stały spadek napięcia (nie działa tu prawo Ohma). Dlatego aby ograniczyć prąd płynący tą gałęzią i zapobiec zniszczeniu tranzystora konieczne jest zastosowanie rezystora.

4.2 PNP

Podobnie jak w NPN tyle że prąd przepływający pomiędzy emiterem a kolektorem jest funkcją prądu przepływającego pomiędzy emiterem a bazą.

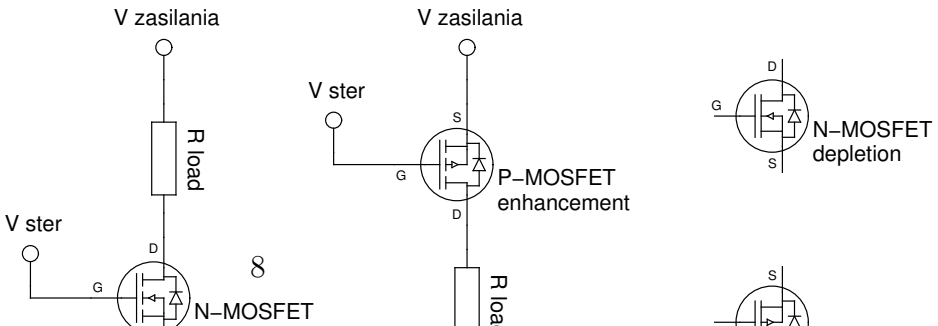
Aby wprowadzić tranzystor PNP w stan zatkania należy podać na jego bazę potencjał większy lub równy potencjałowi emitera (zakładamy że potencjał emitera jest nie mniejszy niż kolektora - co ma miejsce w typowych warunkach polaryzacji tranzystora PNP), czyli $U_{BE} \geq 0$.

Aby wprowadzić tranzystor PNP w stan nasycenia należy na jego bazę wprowadzić potencjał mniejszy od potencjałów emitera i kolektora, uzyskuje się to poprzez wyprowadzenie z tranzystora prądu bazy $I_B \gg \frac{U_{zasilania}}{\beta R_{load}}$.

Zobacz symulację pokazującą pracę tranzystora PNP w trybie klucza: http://ln.opcode.eu.org/pnp. Zwróć uwagę na podobieństwa i różnice w stosunku do tranzystora NPN – w obu wypadkach tranzystor przewodzi gdy płynie prąd bazy, ale ma on różne kierunki (w NPN wpływa on bazą do tranzystora, a w PNP wypływa z niego), w obu wypadkach tranzystor zostaje zatkany gdy potencjał bazy zrówna się z potencjałem emitera (ale w NPN potencjał emitera jest typowo najniższym z potencjałów w układzie, często równym masie, a w PNP najwyższym, często równym potencjałowi zasilania). Zauważ także, że tutaj również potrzebujemy rezystora ograniczającego prąd bazy.

4.3 N-MOSFET

Prąd przepływający pomiędzy drenem (*drain*) a źródłem (*source*) jest funkcją napięcia pomiędzy bramką (*gate*)



a źródłem (potencjału bramki względem źródła - U_{GS}), bramka jest izolowana (nie płynie przez nią prąd).

W kierunku dren → źródło tranzystor ten przewodzi gdy $U_{GS} > U_{GS(th)}$, natomiast w przeciwnym kierunku przewodzi zawsze. Dla tranzystorów N-MOSFET z kanałem wzbogacanym (*enhancement*) $U_{GS(th)} > 0$, a z kanałem zubożonym (*depletion*) $U_{GS(th)} < 0$.

Konkretna wartość $U_{GS(th)}$ zależna jest od konkretnego modelu tranzystora, innym istotnym parametrem związanym z sterowaniem tranzystorem jest maksymalna i minimalna dopuszczalna wartość napięcia U_{GS}.

Aby wprowadzić tranzystor N-MOSFET w stan zatkania należy podać $U_{GS} < U_{GS(th)}$. Dla tranzystorów:

- z kanałem wzbogaconym wystarczy obniżyć potencjał bramki do potencjału źródła (lub nawet wartości niewiele wyższej od niego)
- z kanałem zubożonym musi to być wartość poniżej potencjału źródła.

Aby wprowadzić tranzystor N-MOSFET w stan przewodzenia należy podać $U_{GS} \gg U_{GS(th)}$.

4.4 P-MOSFET

Podobnie jak N-MOSFET tyle że:

- regulowane jest przewodzenie w kierunku źródło → dren (a w kierunku dren → źródło przewodzi zawsze),
- przewodzenie w kierunku źródło → dren ma miejsce gdy $U_{GS} < U_{GS(th)}$,
- dla tranzystorów z kanałem wzbogacanym (*enhancement*) $U_{GS(th)} < 0$, a z kanałem zubożonym (*depletion*) $U_{GS(th)} > 0$.

Aby wprowadzić tranzystor P-MOSFET w stan zatkania należy podać $U_{GS} < U_{GS(th)}$. Dla tranzystorów:

- z kanałem wzbogaconym wystarczy podnieść potencjał bramki do wartości potencjału źródła (lub nawet wartości niewiele niższej od niego)
- z kanałem zubożonym musi to być wartość powyżej potencjału źródła.

Aby wprowadzić tranzystor P-MOSFET w stan przewodzenia należy podać $U_{GS} \gg U_{GS(th)}$.

Zobacz symulację pokazującą pracę tranzystorów MOSFET w trybie klucza: http://ln.opcode.eu.org/mosfet. Zauważ podobieństwo w sterowaniu do tranzystorów NPN i PNP (N-MOSFET przewodzi gdy potencjał bramki odpowiednio wyższy od drenu, P-MOSFET gdy odpowiednio niższy, obciążenie N-MOSFET włączane analogicznie jak NPN, a P-MOSFET jak PNP), zauważ różnice (bramka jest izolowana, nie płynie nią prąd[5], nie ma zatem potrzeby używania tam rezystora).

5. z pominięciem prądu związanego z przeładowaniem pojemności (pasożytniczego kondensatora)

Wzory na wartość prądu drenu ☹

Podobnie jak dla tranzystorów bipolarnych maksymalny prąd drenu jaki tranzystor MOSFET chce przepuścić przy danych parametrach określony jest odpowiednimi wzorami. Jest to jednak bardziej skomplikowane niż w przypadku tranzystorów bipolarnych i wyróżnia się tutaj dwa zakresy pracy:

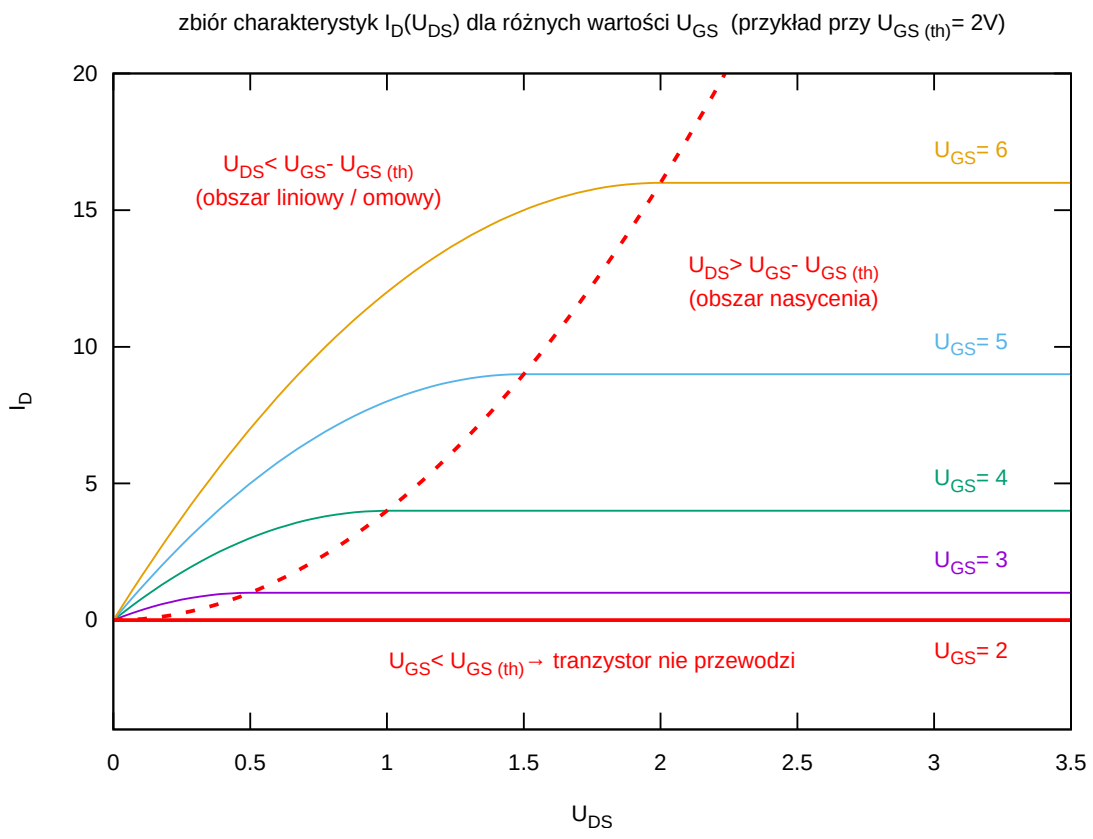
- dla $U_{DS} < U_{DS(sat)}$ prąd ten przybliża się zależnością:

$$I_D \approx \beta \left((U_{GS} - U_{GS(th)})U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right)$$

- dla $U_{DS} \geq U_{DS(sat)}$ prąd ten przybliża się zależnością:

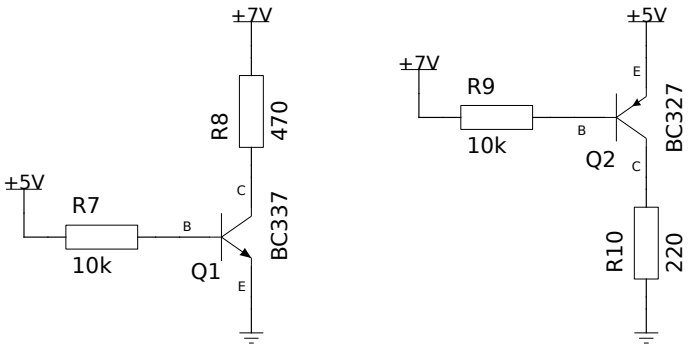
$$I_D \approx \frac{\beta}{2}(U_{GS} - U_{GS(th)})^2$$

gdzie $U_{DS(sat)}$ na ogół przybliża się w nastepujący sposób: $U_{DS(sat)} \approx U_{GS} - U_{GS(th)}$, natomiast $U_{GS(th)}$ i β są parametrami tranzystora.
W dokumentacji poszczególnych modeli tranzystorów jest to często obrazowane w postaci charakterystyki wyjściowej (zbioru tych charakterystyk dla różnych wartości napięcia polaryzującego bramkę) takiej jak poniżej:

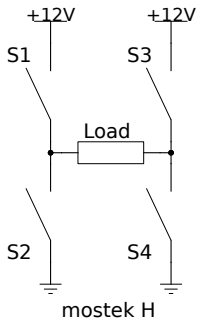


Zadanie 4.4.1

Oszacuj wartość prądu płynącego przez R8 oraz wartość prądu płynącego przez R10. Odpowiedź krótko uzasadnij.



4.5 Mostek H



Mostek H jest to układ (oparty o 4 przełączniki, których rolę mogą pełnić klucze tranzystorowe) pozwalający na zmianę polaryzacji zasilania podłączonego do niego odbiornika. Układ taki złożony jest z dwóch identycznych gałęzi (S1 + S2 oraz S3 + S4, każda włączona pomiędzy dwoma biegunami zasilania). Pojedyncza taka gałąź nazywana jest pół-mostkiem i składa się z dwóch kluczy które powinny być sterowane przeciwstawnie (aby wyeliminować możliwość zwarcia zasilania z masą). Układ pół-mostka może być wykorzystywany także samodzielnie jako uniwersalny układ klucza pozwalającego na załączanie odbiornika zarówno od strony napięcia dodatniego jak i od strony masy (w zależności od sposobu jego podłączenia) lub przełączania dwóch odbiorników (jednego umieszczonego pomiędzy zasilaniem a wyjściem mostka, a drugiego pomiędzy wyjściem a masą).

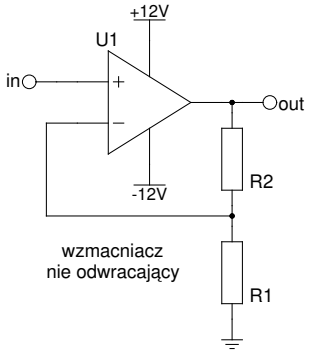
Rolę kluczy (przełączników) w ramach mostka mogą pełnić tranzystory PNP (jako S1, S3) i NPN (jako S2, S4) albo analogicznie tranzystory P-MOSFET i N-MOSFET.

Zadanie 4.5.1

Narysuj schemat układu półmostka H z zastosowaniem tranzystorów bipolarnych (NPN i PNP) jako elementów przełączających.

4.6 Wzmacniacz

Omawiając poszczególne typy tranzystorów skupialiśmy się na ich pracy w roli przełącznika (klucza), działającego w dwóch stanach – przewodzenia (nasycenia) i zatkania. Jednak tranzystor będąc elementem o regulowanym przewodzeniu może zostać wykorzystany także do wzmacniania sygnałów, czyli wytworzenia na swoim wyjściu sygnału proporcjonalnego do sygnału wejściowego tyle że wzmocnionego. Wzmacnianiu może ulegać sygnał napięciowy lub prądowy (najprostszym przypadkiem jest wzmocnienie prądu bazy jako prądu kolektora $I_C = \beta I_B$ w tranzystorze bipolarnym). Więcej o różnych układach pracy tranzystora w roli wzmacniacza można przeczytać na http://vip.opcode.eu.org/#Wzmacniacz_sygnału.



Często do wzmacniania sygnału zamiast pojedynczego tranzystora wykorzystujemy układy scalone (złożone z wielu tranzystorów) nazywane wzmacniaczami operacyjnymi. Cechują się one bardzo dużym wzmocnieniem różnicy napięcia pomiędzy swoimi wejściami, pożądane wzmocnienie uzyskuje się dobierając zewnętrzne elementy pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego (w najprostszym przypadku na jedno wejście podajemy sygnał wejściowy, a na drugie odpowiednio przeskalowany przy pomocy dzielnika rezystancyjnego sygnał wyjściowy). Zobacz symulację: http://ln.opcode.eu.org/opamp i http://ln.opcode.eu.org/opamp_loop. Więcej na ich temat można przeczytać na http://vip.opcode.eu.org/#Wzmacniacz_operacyjny.

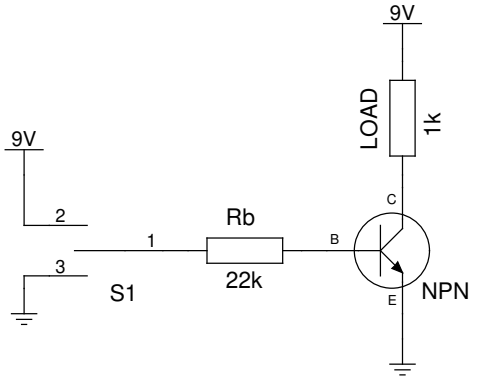
4.7 Przełączanie AC

Tranzystory stosowane są powszechnie do przełączania w obwodach prądu stałego. Istnieją także elementy półprzewodnikowe mogące pełnić funkcję przełączającą w obwodach prądu przemiennego - są to przede wszystkim triaki.

4.8 Zadania praktyczne

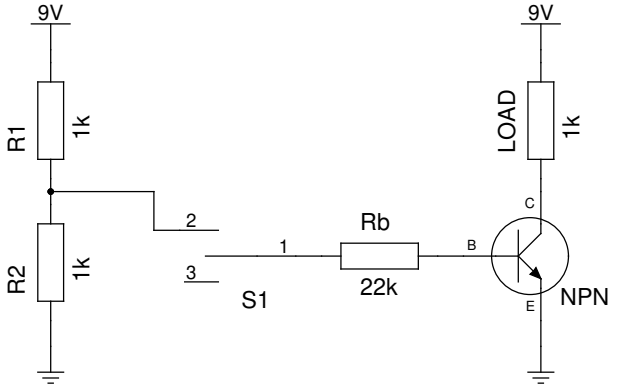
Zadanie 4.8.1

Zastanów się co przedstawia układ przedstawiony na schemacie obok. Skonstruuj go i zobacz jak działa.
Czy przez obciążenie (rezystor *LOAD* o wartości 1k) płynie prąd gdy rezystor *Rb* poprzez przełącznik *S1* podłączony jest do napięcia zasilającego, a czy płynie gdy podłączony jest do masy?
Zmierz wartość prądu płynącego przez *Rb* i płynącego przez *LOAD* w obu wypadkach. Zastanów się do czego może być użyty taki układ?
Wskazówka: Zamiast użyć przełącznika możesz po prostu przełączać kabelek na płytce stykowej.



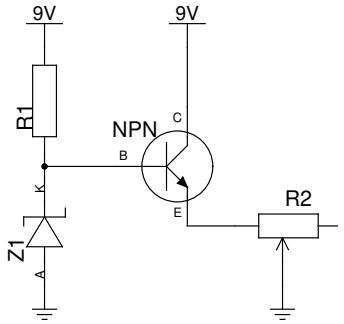
Zadanie 4.8.2

Zmodyfikuj układ z zadania 4.8.1 aby wyglądał jak na schemacie obok (obecnie S1 przełącza pomiędzy napięciem z dzielnika R1/R2 oraz stanem niepodłączonym).
Oblicz ile powinno wynosić napięcie wyjściowe z dzielnika R1/R2? Czy rzeczywiste napięcie zgadza się z tym co obliczyłeś?
Wykonaj ponownie pomiary prądu płynącego przez *Rb* i płynącego przez *LOAD* w obu stanach S1. Jak wprowadzone zmiany wpłynęły na zachowanie układu?



Zadanie 4.8.3

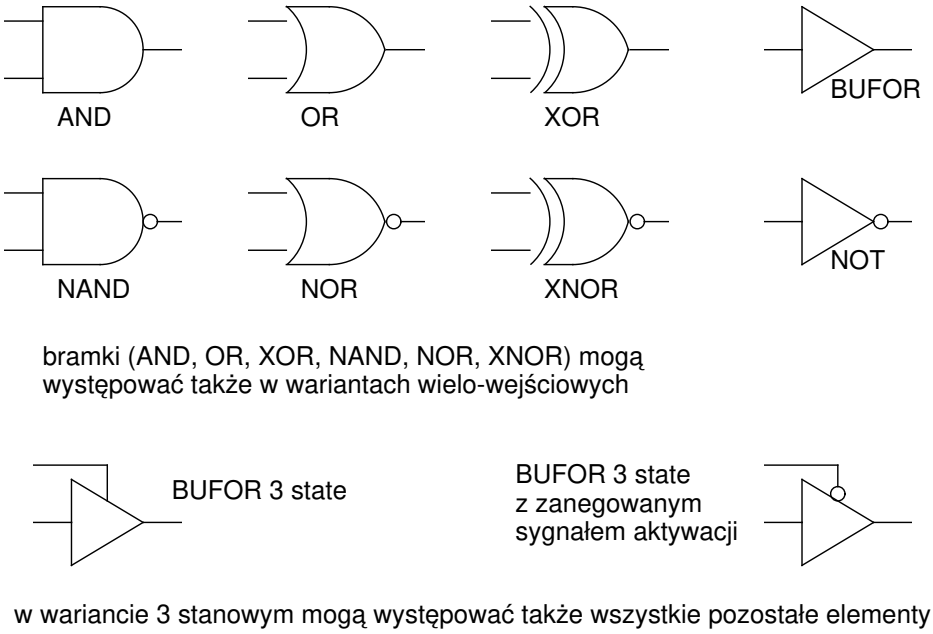
Zbuduj układ stabilizacji napięcia w oparciu o diodę Zenera i tranzystor przedstawiony na schemacie obok.
Zastanów się nad sposobem działania tego układu – w tym celu dokonaj pomiarów napięcia wyjściowego oraz napięcia na bazie tranzystora w zależności od napięcia wejściowego.
Zobacz jak na napięcie wyjściowe wpływa wielkość obciążenia symulowanego przez R2 (pamiętaj aby nie ustawiać zbyt małej rezystancji, bo przekroczysz maksymalny prąd dozwolony dla użytego tranzystora).
W czym układ ten jest lepszy od układu z zadania 3.3.2? Zastanów się dlaczego.



Zadanie 4.8.4

Zapoznaj się z dokumentacją otrzymanego wzmacniacza operacyjnego i użyj go do skonstruowania wzmacniacza o wzmocnieniu 2. Sprawdź jego działanie podając (z dzielnika opartego na potencjometrze) na jego wejście różne wartości napięcia. Dokonaj w tym czasie pomiarów napięcia wejściowego i wyjściowego.
Wskazówka: Pamiętaj o podłączeniu zasilania do wzmacniacza operacyjnego, jest ono często pomijane w jego symbolu, ale konieczne do działania.

5 Bramki



Bramki są układami elektronicznymi realizującymi podstawowe funkcje logiczne. Obok zostały przedstawione podstawowe symbole poszczególnych bramek w wariancie dwu wejściowym, spotkać się można także z symbolami z zanegowanymi wejściami - w takiej konwencji np. bramka AND reprezentowana jest przez NOR z zanegowanymi wejściami. Bramki (z wyjątkiem buforów oraz bramki NOT), mogą występować także w wariantach wielo-wejściowych (ze względu na łączność podstawowych operacji nie ma wątpliwości co don wyniku jaki powinna dawać np. 8 wejściowa bramka OR). Na ogół w pojedynczym układzie scalonym znajduje się kilka jednakowych bramek.

Zobacz symulację działania różnych bramek logicznych: http://ln.opcode.eu.org/bramki (H oznacza stan wysoki, czyli prawdę, L stan niski czyli fałsz, klikając na H/L przy wejściach można zmieniać ich stan).

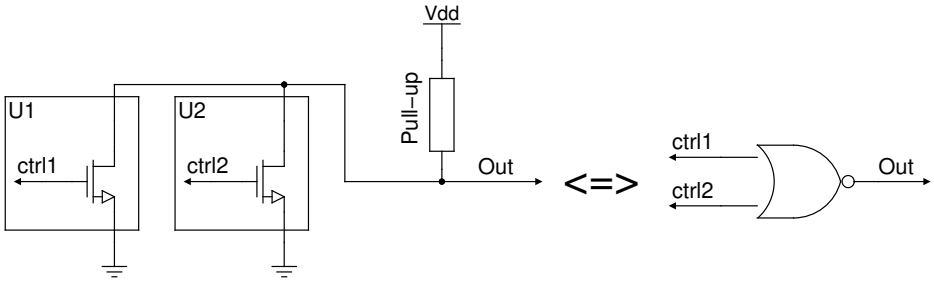
5.1 trój-stanowe

Typowa bramka wymusza (w sposób silny) na swoim wyjściu stan wysoki lub niski, co uniemożliwia bezpośrednie łączenie wyjść bramek. Bramki trój-stanowe mają możliwość skonfigurowania wyjścia w stan *wysokiej impedancji* czyli nie wymuszania żadnej jego wartości. Sterowanie załączeniem bądź wyłączeniem wyjścia (przełączeniem w stan wysokiej impedancji) odbywa się przy pomocy zewnętrznego sygnału sterującego "output enabled" ("OE"), sygnał ten może występować w postaci prostej i zanegowanej. Pozwala to na podłączanie do jednej linii wielu bramek i decydowaniu która z nich będzie nią sterować.

5.2 open collector / drain

Są kolejnym rodzajem bramek których wyjścia można podłączać do wspólnej linii. Układy te posiadają wyjście w postaci tranzystora zwierającego linię wyjściową do masy, z tego względu samodzielnie zapewniają jedynie stan niski wyjścia (są w stanie wymusić stan niski, ale nie mają możliwości wymuszenia stanu wysokiego).

Stan wysoki musi zostać zapewniony zewnętrznym rezystorem podciągającym. Pozwala to stosować na takiej linii inny poziom stanu wysokiego niż na wejściach takiej bramki oraz pozwala na sterowanie wspólnej linii przez wiele bramek (czyli łączenie wyjść bramek, jednak w odróżnieniu od bramek trój-stanowych nie wymaga dodatkowych sygnałów sterujących).

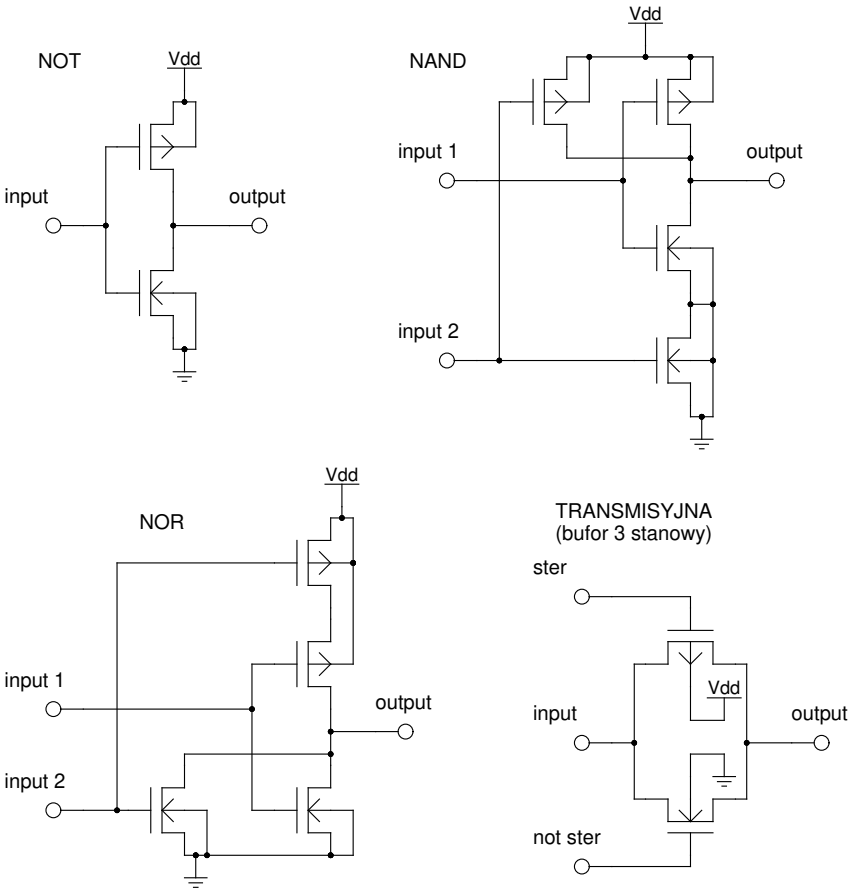


Na schemacie obok przedstawiono dwa układy (U1 i U2) typu open-drain sterujące wspólną linią wyjściową w układzie *suma na drucie*. Jeżeli jeden z podłączonych do linii układów będzie miał wewnętrzne wyjście ("ctrl$X$")

w stanie wysokim to jego wyj-
ście OC będzie zwarte do masy (negacja na tranzystorze N-MOS lub NPN), wtedy też cała linia będzie w stanie niskim.

Zobacz symulację lininii z bramkami trójstanowymi (stan wysokiej impedancji symulowany za pomocą przełącznika) oraz linii open-colektor: http://ln.opcode.eu.org/ster

5.3 budowa wewnętrzna



Przedstawiony powyżej układ sumy na drucie jest bardzo prostą (jedno tranzystorową) realizacją bramki logicznej realizującą funkcję logiczną NOT OR (z punktu widzenia wejść *ctrl1* i *ctrl2* oraz wyjścia *Out*). W podobny sposób można zrealizować bramkę AND (negując wejścia, np. przy pomocy jednego traznzystora). Jeszcze bardziej uproszczoną realizację można uzyskać stosując diody pozwalające na wpływanie prądu do węzła (funkcja OR) lub wypływanie z niego (funkcja AND).

Po prawej przedstawione zostały schematy ideowe inwertera, dwóch podstawowych bramek (NOR i NAND) oraz bramki transmisyjnej (bufora 3 stanowego) w technologii CMOS.

Działanie tych bramek (za wyjątkiem transmisyjnej) polega na otwieraniu tranzystorów podłączonych do napięcia które chcemy otrzymać na wyjściu, a zamykaniu prowadzących do napięcia przeciwnego. W szczególności bramka NOT stanowi pół-mostek H pomiędzy stanem wysokim a stanem niskim.

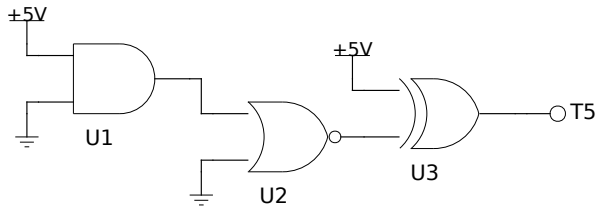
Dzięki zastosowaniu tranzystorów PMOS polaryzowanych Vdd oraz NMOS polaryzowanych GND obie gałęzie operują na tym samym sygnale wejściowym (nie jest wymagana jego negacja). Szeregowe łączenie tranzystorów zapewnia że należy otworzyć oba aby otworzyć daną drogę, a równoległe że otwarcie danej drogi powodowane jest otwarciem pojedynczego tranzystora. Dzięki zastosowaniu technologi MOS i podłączaniu wejść bramki tylko do bramek tranzystorów wejścia praktycznie nie pobierają prądu (istotnym wyjątkiem jest chwila zmiany sygnału).

Działanie bramki transmisyjnej polega na przepuszczaniu lub nie (w zależności od stanu wejścia sterującego) sygnału z wejścia na wyjście. Bramka taka nie regeneruje sygnału. Ponadto w uproszczonym (jedno tranzystorowym) rozwiązaniu prowadzi ona do degradacji sygnału wartość w przybliżeniu równą napięciu progowemu tranzystora. Dlatego też na ogół występuje wraz z bramką NOT (bufor 3 stanowy z negacją) lub dwiema szeregowo połączonymi bramkami NOT (bufor 3 stanowy bez negacji).

Zobacz symulację budowy bramek: NOT (http://ln.opcode.eu.org/not), NAND (http://ln.opcode.eu.org/nand) i NOR (http://ln.opcode.eu.org/nor).

Zadanie 5.0.1

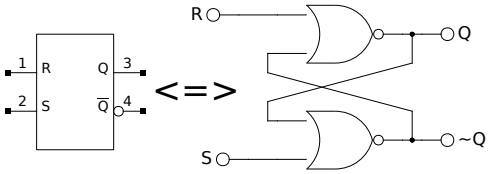
Podaj wartość napięcia (względem GND) w punkcie T5. Przyjmujemy iż użyte bramki działają na poziomie napięć 5V (prawda) / 0V (fałsz). Odpowiedź krótko uzasadnij.



5.1 Zadania praktyczne

Zadanie 5.1.1

Na schemacie przedstawiono dwubramkową budowę przerzutnika RS w wariancie z wejściami nie zanegowanymi (zastosowanie bramek NAND w miejsce NOR spowodujwe zanegowanie wejść). Zbuduj taki układ i sprawdź jego działanie.



Nie demontuj układu - będzie przydatny w zadaniu 8.3.1!

Zadanie 5.1.2

Spróbuj zbudować własną bramkę logiczną w oparciu o tranzystory NPN i PNP. Pamiętaj że w odróżnieniu od przypadku pokazanego na schemacie (w treści skryptu), gdzie zastosowane były tranzystory NMOS i PMOS, w przypadku użycia tranzystorów bipolarnych wymagane jest stosowanie rezystora na bramce.
Wskazówka: zacznij od zbudowania bramki NOT, gdyż ona jest najprostsza – to po prostu półmostek H. Później, po sprawdzeniu działania, możesz skomplikować układ - przerobić go na NAND lub NOR.

6 Przerzutniki i rejestry

6.1 przerzutniki i ich budowa

RS Flip-flop (RS Latch) jest podstawowym układem służącym do zapamiętania jednego bitu informacji. Posiada on dwa wejścia (set i reset) i dwa wyjścia (Q i NOT Q), wejścia mogą reagować na stan wysoki (oznaczane jako S i R) lub niski (oznaczane jako wejścia zanegowane S i R), jedno z wyjść może być jedynie wewnętrzne (nie wyprowadzone na zewnątrz układu). Podanie stanu wysokiego na wejście S (niskiego na S) powoduje wystawienie stanu wysokiego na wyjściu Q, a podanie stanu wysokiego na wejście R (niskiego na R) powoduje wystawienie stanu niskiego na wyjściu Q. Stan na wyjściu Q nie zmienia się po zmianie wejść S i R na stan niski (zostaje zapamiętany).

Zobacz i przeanalizuj symulację działania zatrzasku RS: http://ln.opcode.eu.org/rs z wejściami zanegowanymi.

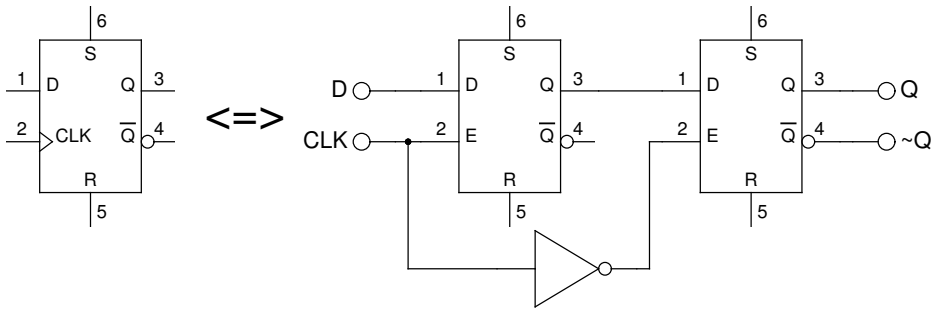
6.2 zatrzask a przerzutnik

Zatrzask jest elementem reagującym na poziom sygnału na wejściu "enable" (E). W przypadku nie zanegowanego wejścia E, jeżeli jest ono w stanie wysokim sygnał na wyjściach (Q i NOT Q) jest funkcją

sygnałów wejściowych, natomiast stan niski wejścia E blokuje zmianę sygnału wyjściowego (zostaje on zapamiętany).

Przerzutnik jest elementem reagującym na zbocze sygnału na wejściu "clock" (CLK). W zależności od konstrukcji może reagować na zbocze narastające, opadające albo na oba (wtedy na jednym realizuje odczyt wejść a na drugim zmianę stanu wyjść).

6.3 zatrzask i przerzutnik D



Posiada jedno wejścia sygnałowe "data" (D) oraz wejście "enable" (E) w przypadku zatrzasku lub wejście "clock" (CLK) w przypadku przerzutnika. Może także posiadać asynchroniczne (niezależne od stanu wejścia E / CLK) wejścia reset i set (zanegowane lub proste). Obniżenie sygnału E lub zbocze sygnału CLK powodują zapamiętanie (i wystawienie na wyjściu Q) stanu wejścia D.

Zobacz symulację zatrzasku typu D zbudowanego z bramek NAND: http://ln.opcode.eu.org/zatrzask (możesz zmieniać stan wejścia D klikając na nie, zegar zmienia się automatycznie). Zwróć uwagę iż przy wysokim stanie sygnału zegara (enable) stan wyjścia odpowiada stanowi wejścia (zatrzask jest przeźroczysty), natomiast przy niskim stanie zegara wyjście nie reaguje na zmiany stanu wejścia i znajduje się w takim stanie w jakim było wejście w chwili opadającego zbocza sygnału zegarowego.

Zobacz symulację przerzutnika D złożonego z dwóch zatrzasków: http://ln.opcode.eu.org/przerzutnik. Zauważ że w żadnej fazie sygnału zegarowego nie jest on przeźroczysty (wyjście Q nie zależy od obecnego stanu wejścia D). Zwróć uwagę że sygnał wejściowy zostanie zapamiętany i wystawiony na wyjście Q w momencie opadającego zbocza sygnału zegarowego.

6.4 rejestry

Mianem rejestru n-bitowego określa się zespół n przerzutników (rzadziej zatrzasków), często z uwspólnionym sterowaniem (sygnały clock, set, reset, etc) służący do zapamiętania n-bitowej wartości (liczby). W zależności od sposobu zapisu i odczytu można wyróżnić:

6.4.1 rejestry równoległe

Posiadają taką samą liczbę wejść jak i wyjść, sygnał na i-tym wyjściu jest bezpośrednio powiązany z sygnałem z i-tego wejścia (jest sygnałem zapamiętanym z tego wejścia).

Zobacz symulację rejestru równoległego zbudowanego z przerzutników typu D: http://ln.opcode.eu.org/rejestr1 (stan wszystkich wejść zostanie zapamiętany i przepisany na wyjścia w chwili narastającego zbocza zegara).

6.4.2 rejestry szeregowe serial-input

Z kolejnymi sygnałami zegarowymi odczytywany jest stan wejścia szeregowego, a stan poprzedni przenoszony jest do kolejnego przerzutnika w ramach rejestru. W ten sposób po n cyklach zegara n-bitowy rejestr ma zapisaną nową zawartość. Często posiada zespolony z nim rejestr równoległy zapobiegający zmianie stanu wyjść w trakcie ładowania danych z wejścia szeregowego przepisanie danych z rejestru przesuwnego do rejestru odpowiedzialnego za sterowanie wyjściami sterowane jest osobnym sygnałem zegarowym.

Zobacz symulację prostego rejestru z wejściem szeregowym (bez zatrzasku/rejestru wyjściowego): http://ln.opcode.eu.org/rejestr2. Zauważ że stan wyjść zmienia się na bieżąco w trakcie szeregowego wpisywania wartości do rejestru.

Zobacz symulację rejestru z wejściem szeregowym i rejestrem wyjściowym: http://ln.opcode.eu.org/rejestr3. Zauważ, że stan wyjść zmienia się na skutek osobnego sygnału, który może zostać wygenerowany po zakończeniu szeregowego zapisu do rejestru.

6.4.3 rejestry szeregowe paraller-input serial-output

Z kolejnymi sygnałami zegarowymi na wyjście szeregowe wystawiany jest stan kolejnego z rejestrów wejściowych. Wariant asynchroniczny posiada osobny sygnał powodujący odczyt wejść do rejestru (sygnał działa jak "enable" w zatrzaskach). Wariant synchroniczny posiada sygnał decydujący o tym czy na zboczu zegara dokonywany jest odczyt wejść czy też przesuwanie zawartości rejestru umożliwiający odczyt z wyjścia szeregowego.

6.4.4 liczniki

Z kolejnymi sygnałami zegarowymi zwiększana jest o jeden wartość rejestru. Prostszy w budowie licznik asynchroniczny ma większe (i w dodatku rosnące wraz z bitowością licznika) ograniczenia dotyczące szybkości zliczania od licznika synchronicznego, ze względu na opóźnienie z jakim dochodzi zliczany sygnał (CLK) do kolejnych stopni licznika.

Zadanie 6.0.1

Znajdź dokumentację (kartę katalogową) do rejestru przesuwnego, który kupiłeś/aś (CD4094 lub 74HC595). Odczytaj, jakie jest największe napięcie zasilania tego układu (*supply voltage*, w sekcji *Absolute maximum ratings*), oraz do których pinów należy podłączać napięcie zasilania (w sekcji *pin configuration*).

7 Transmisja - sterowanie linią

7.1 bufory

Bufor jest to układ przekazujący sygnał logiczny z wejścia na wyjście. Bufor może służyć do:

- regeneracji sygnału,
- uniemożliwieniu wprowadzenia sygnału z jego strony wyjściowej na wejściową,
- decydowania o jego przepuszczeniu lub nie (trój-stanowy),
- decydowania o kierunku przepuszczenia sygnału (dwa trój-stanowe albo trój-stanowy dwukierunkowy),
- konwersji na linię open-collector / open-drain,
- negacji sygnału (niektóre bufory realizują funkcję NOT).

7.2 enkodery

Enkoder "n to m" jest to układ o n wejściach, który na swoim m bitowym wyjściu wystawia numer (typowo) wejścia o najwyższym numerze, które znajduje się w stanie niskim. Możliwe są też warianty wystawiające numer pierwszego (a nie ostatniego) w kolejności wejścia lub wybierające wejście ze stanem wysokim.

Jako że wejścia numerowane są zazwyczaj od zera do 2m to układ najczęściej posiada dodatkowe wyjście informujące że którekolwiek z wejść jest w stanie aktywnym. Typowo numer wystawiany jest w postaci NKB, ale możliwe są inne kodowania.

Układ pozwala na redukcję ilości wejść potrzebnych do obsługi n-bitowego sygnału w którym tylko jeden bit może być ustawiony lub w którym można pozwolić sobie na obsługę kolejnych linii z kasowaniem ich bitu (np. wektor przerwań z priorytetyzacją).

7.3 dekodery

Dekoder "m to n" jest układem o działaniu przeciwnym do enkodera. Aktywuje on wyjście o numerze odpowiadającym wartości na m-bitowym wejściu adresowym. Typowo posiada także wejście zezwolenia na aktywację wyjść, które może zostać użyte do podłączenia informacji że którekolwiek z wejść enkodera było w stanie aktywnym lub do podłączenia sygnału danych z multipleksowanej linii celem jej demultipleksacji.

Przykład użycia enkodera i dekodera do obsługi matrycy przełączników (klawiatury) można zobaczyć na symulacji: http://ln.opcode.eu.org/matrix.

7.4 (de)multipleksery cyfrowy

Multiplekser cyfrowy (jednokierunkowy) na wyjście kopiuje stan wskazanego (poprzez adres podany na wejście adresowe) wejścia. W przypadku braku sygnału "enable" w zależności od rozwiązania wyjście pozostanie w stanie niskim lub wysokiej impedancji.

Demultiplekser cyfrowy (jednokierunkowy) to zazwyczaj układ dekodera w którym na wejście enabled podany jest sygnał z multipleksowanej linii. Nie wybrane wyjścia pozostają w stanie niskim lub wysokim (zależnie od użycia nieodwracającego lub odwracającego dekodera). Cyfrowe demultipleksery z 3 stanowym wyjściem są rzadkością. Demultipleksację można rozwiązać także przy pomocy odpowiednio sterowanych (np. z dekodera adresu) buforów trój-stanowych lub dwu-wejściowych multiplekserów.

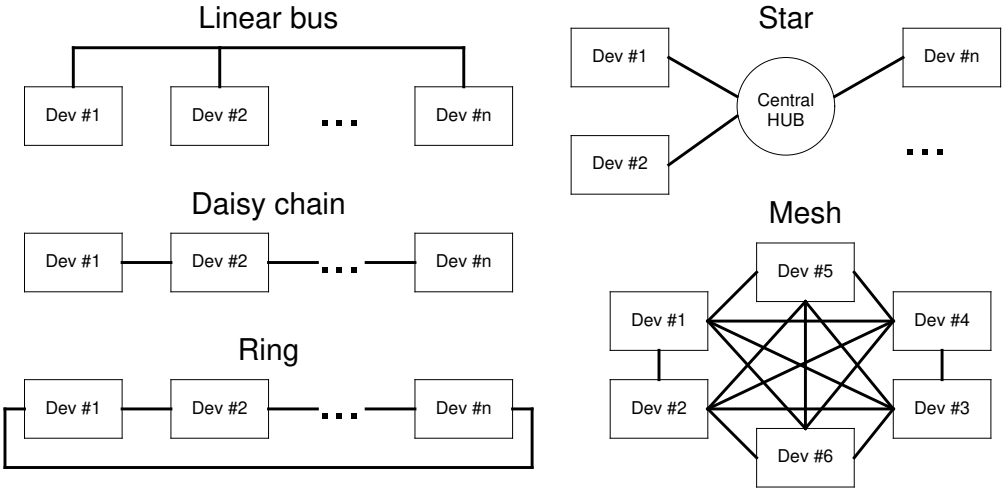
7.5 (de)multipleksery analogowy

Multiplekser analogowy (dwukierunkowy) działa na zasadzie przełącznika łączącego wskazane wejście z wyjściem, dzięki elektrycznemu "zwarciu" (na ogół rezystancja takiego zwarcia to kilkadziesiąt omów) wejścia z wyjściem transmisja może odbywać się w obu kierunkach. Pozwala to także na wykorzystanie tego samego układu w roli multipleksera i demultipleksera.

8 Topologie i typy transmisji

W zależności od układu fizycznych połączeń komunikujących się urządzeń wyróżnia się różne topologie sieci. Na schemacie poniżej przedstawione zostały główne topologie połączeń:

- **magistrala** (linear bus) – wszystkie urządzenia są podłączone do jednej linii (wspólnego medium transmisyjnego), okablowanie nie wyróżnia punktu centralnego
- **łańcuch** (daisy chain) – struktura okablowania podobna jak w magistrali, ale medium transmisyjne jest podzielone (połączenie n urządzeń składa się z n-1 łączy punkt-punkt pomiędzy urządzeniami)
- **pierścień** (ring) – topologia daisy chain w której końce są połączone, uodparnia to na pojedyncze uszkodzenie
- **gwiazda** (star) – wszystkie podłączenia biorą początek w węźle centralnym, w zależności od konstrukcji węzła centralnego może być realizowana w oparciu o współdzielone medium lub połączenia punkt-punkt
- **krata** (mesh) – każde urządzenie ma bezpośrednie połączenie punkt-punkt do każdego innego urządzenia (połączenie n urządzeń wymaga n(n-1)/2 połączeń punkt punkt)

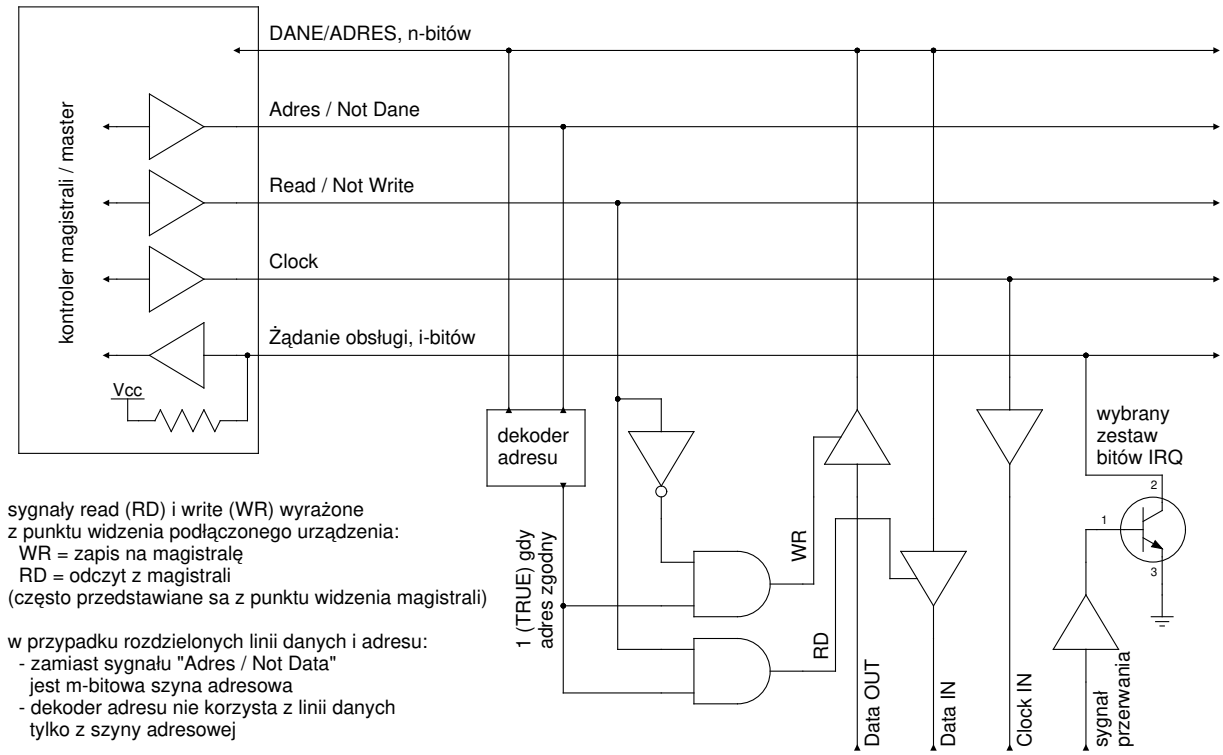


Ponadto występują topologie mieszane złożone z opisanych powyżej: gwiazda wielokrotna (tzn. taka gdzie niektóre z węzłów stanowią punkty centralne kolejnych gwiazd), magistrala lub ring pomiędzy punktami centralnymi gwiazd, gwiazda w której w węzłach występują magistrale lub pierścienie, itd.

Wyróżnić można także typy transmisji:

- **simplex** – umożliwia tylko transmisję jednokierunkową
- **half-duplex** – umożliwia transmisję dwukierunkową, ale tylko w jedną stronę równocześnie
- **full-duplex** – umożliwia pełną transmisję dwukierunkową (równoczesne nadawanie i odbiór)

8.1 Magistrala równoległa

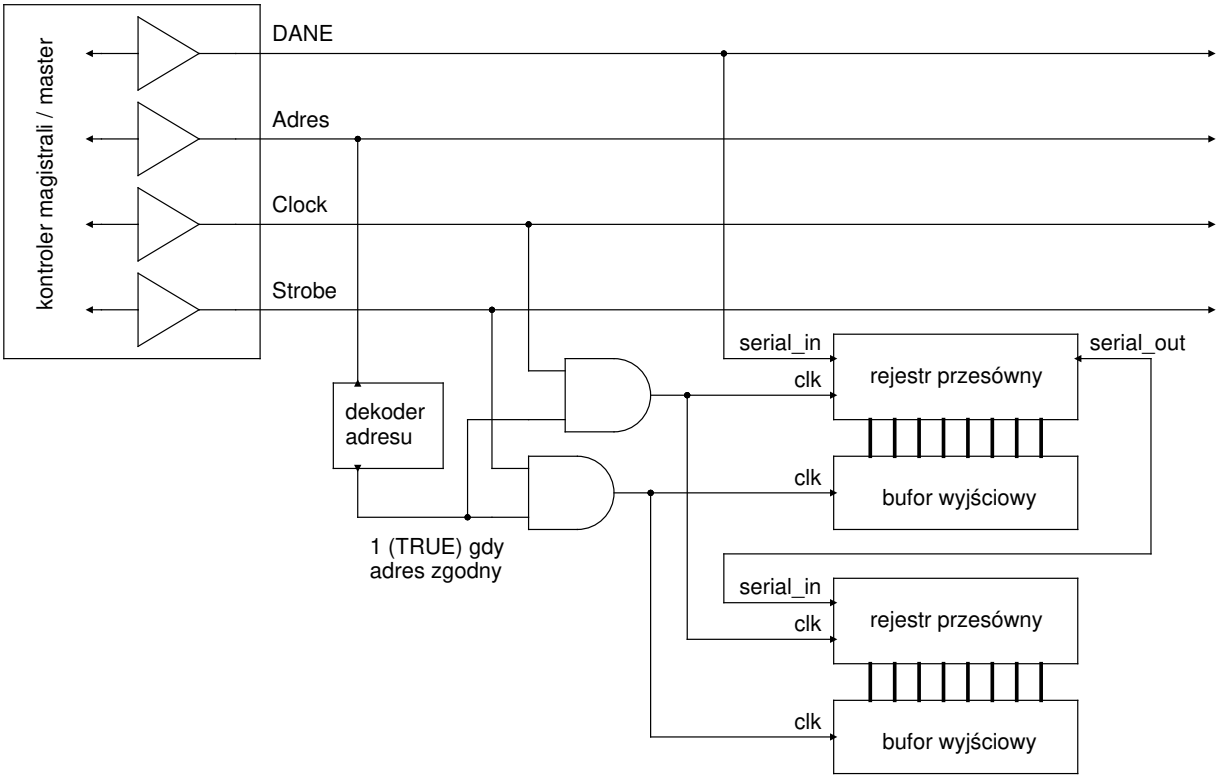


Magistrala równoległa jest zespołem linii, wraz z układami nimi sterującymi, umożliwiającym równoległe przesyłanie danych (w jednym czasie / takcie zegara na magistrali wystawiane / przesyłane jest całe n-bitowe słowo). Można wyróżnić szyny sterującą (kierunek przypływu, żądania obsługi, etc), adresową (adres układu który ma prawo nadawać) i danych (przesyłane dane). Często szyna adresowa współdzieli linie transmisyjne z szyną danych. Do realizacji magistrali (celem umożliwiania podłączenia wielu układów) stosuje się zazwyczaj bufory trój-stanowe, a do zapewnienia współdzielonej szyny żądania obsługi (interrupt request) często układy typu open-collector.

Typowy układ realizacji magistrali half-duplex ze współdzielonymi liniami danych i adresu przestawiony został na schemacie zamieszczonym obok. Zadaniem dekodera adresu jest ustalenie czy wystawiony na magistrali adres (w trakcie wysokiego stanu linii "Adres / Not Dane") jest adresem danego urządzenia i zapamiętanie tej informacji do czasu wystawienia nowego adresu. Informacja ta jest wykorzystywana do sterowania dwukierunkowym buforem trój-stanowym (jako sygnał enable). O kierunku działania bufora decyduje sygnał "Read / Not Write". Przy magistralach o ustalonym protokole transmisyjnym sterowanie kierunkiem może być zależne od wykonywanej komendy (po ustawieniu adresu urządzenie odczytuje z magistrali polecenie i w zależności od niego steruje kierunkiem bufora - odczytuje lub zapisuje dane na magistralę). Zastosowanie kilku linii typu OC do odbierania żądań obsługi pozwala (na podstawie tego które z tych linii znalazły się w stanie niskim na identyfikację urządzenia lub grupy urządzeń, z której niektóre zgłaszają żądanie obsługi.

W przypadku prostych urządzeń wejścia / wyjścia zamiast buforu dwukierunkowego może być umieszczony np. jednokierunkowy bufor (lub n-bitowy rejestr) z wyjściami trój-stanowymi, który wystawia dane na magistralę w oparciu o sygnał zapisu na magistralę (WR) oraz zegar (clock) albo n-bitowy rejestr do którego zapisywane są dane z magistrali w oparciu o sygnał RD i Clock.

8.2 Magistrala szeregowa



W magistrali szeregowej dane przesyłane są bit po bicie w pojedynczej linii. Podobnie jak w magistrali równoległej oprócz linii danych mogą występować także linie sterujące. Prostą realizację magistrali szeregowej zapewniają rejestry przesuwne.

Przykładowy układ realizacji magistrali simplex (jednokierunkowej) z rozdzielonymi szynami danych i adresową został na schemacie zamieszczonym obok. W prezentowanym przykładzie oprócz adresu master wystawia trzy sygnały - dane, zegar i strobe. Z każdym taktem zegara na linii danych wystawiany jest kolejny bit który jest wczytywany do zespołu rejestrów. Sygnał strobe służy do przepisania wartości z rejestrów przesuwnych do rejestrów wyjściowych, takie rozwiązanie zapobiega zmianom wyjść w trakcie przesyłania nowych danych poprzez szynę szeregową, jest ono jednak opcjonalne.

W zależności od konstrukcji dekodera adresu szyna adresowa może być równoległa (w najprostszym przypadku - przez całą transmisję do danego urządzenia jego adres musi być wystawiony na szynie a dekoder jest układem bramek NOT i wielowejściowej bramki AND) lub szeregowa (w takim wypadku powinna posiadać własny zegar lub sygnał informujący o nadawaniu adresu z taktami zegara głównego, a dekoder

powinien być wyposażony w rejestr przesuwny do odebrania i przechowywania aktualnego adresu z magistrali). Natomiast jeżeli magistrala byłaby oparta tylko na połączonych szeregowo rejestrach (wyjście serial-out do wejścia serial-in) to szyna adresowa nie jest potrzebna, ale konieczne może być każdorazowe wpisanie wszystkich wartości na szynę (czas zapisu rośnie z ilością podłączonych rejestrów).

Zadanie 8.2.1

Zapoznaj się z dokumentacją układu 74HC574 i opisz sposób jego użycia (wraz z sposobem sterowania) jako modułu podłączonego do 8 bitowej magistrali równoległej w roli układu wejściowego oraz w roli układu wyjściowego.

Zadanie 8.2.2

Zapoznaj się z dokumentacją układu 74HC595 i opisz sposób jego użycia (wraz z sposobem sterowania) w roli układu wyjściowego podłączonego do magistrali szeregowej.

8.3 Zadania praktyczne

Zadanie 8.3.1

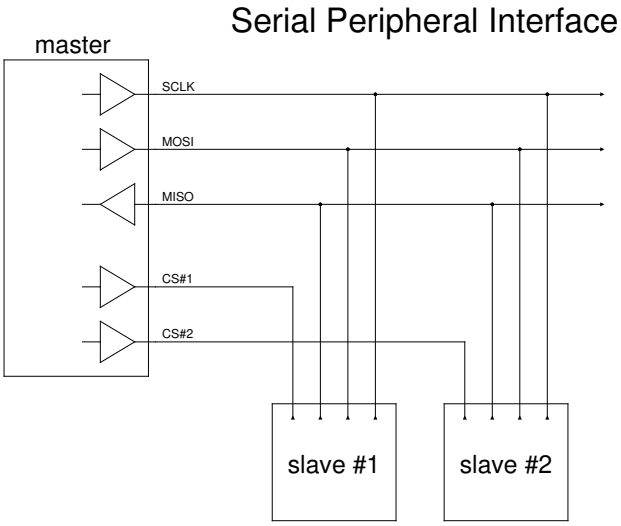
Podłącz do kolejnych wyjść układu rejestru przesuwnego z buforem wyjściowym (np. CD4094 lub 74HC595) 4 diody LED (pamiętaj o rezystorach). Zapisz do rejestru i ustaw na wyjściach taką wartość aby świeciły się dwie pierwsze i ostatnia dioda, użyj w tym celu ręcznego manipulowania sygnałami:

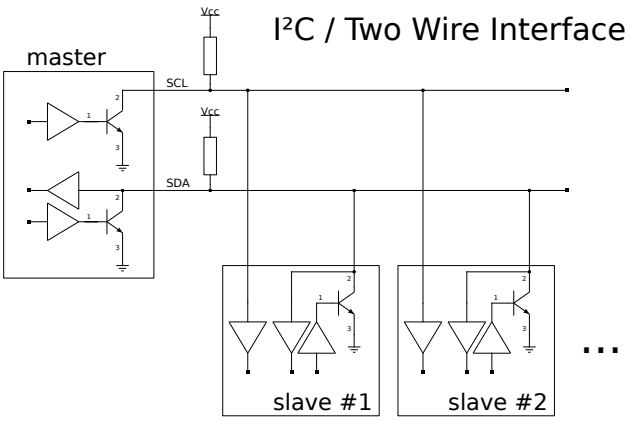
- wejścia szeregowego (SERIAL IN), służącego do wprowadzania danych
- zegara danych (CLOCK, CLK), determinującego chwilę odczytu kolejnego bitu z wejścia szeregowego
- zegara wyjść (STROBE), determinującego chwilę przepisania danych z rejestru przesuwnego do rejestru wyjściowego

Wskazówka 1: zapoznaj się z dokumentacją posiadanego układu, ustal nazewnictwo używane do określania poszczególnych sygnałów (może się różnić nawet w zależności od producenta układu) oraz numery nóżek układu z nimi związane (mogą się różnić w zależności od modelu / wariantu obudowy).
Wskazówka 2: do podawania sygnału zegtara danych użyj wyjścia układu zbudowanego w zadaniu 5.1.1

9 Standardowe interfejsy

Istnieje wiele zestandaryzowanych interfejsów zarówno szeregowych jak i równoległych, wśród najważniejszych należy wymienić:



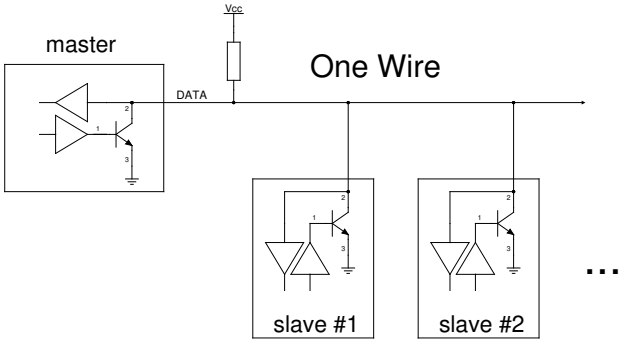


9.1 SPI (Serial Peripheral Interface)

jest to szeregowa magistrala full-duplex działająca w układzie master-slave złożona z linii zegarowej (SCLK), nadawania przez mastera (MOSI), odbioru przez mastera (MISO) oraz linii służących do aktywacji urządzenia slave (SS / CS).

9.2 I2C (TWI)

jest to szeregowa magistrala half-duplex złożona z linii sygnałowej (SDA) i zegara (SCL) posiadająca zdefiniowany format ramki wraz z adresowaniem. Z wyjątkiem bitu startu i stopu stan linii danych może zmieniać się tylko przy niskim stanie linii zegarowej. Nadajniki są typu open-drain przez co realizowany jest iloczyn na drucie, co pozwala na wykrywanie kolizji (jeżeli dany nadajnik nie nadaje zera a linia jest w stanie zera to nadaje także ktoś inny). Pozwala to także na uzyskanie układów multimaster, pomimo iż typowo na magistrali takiej występuje tylko jeden układ master (nadający sygnał zegara i inicjujący transmisję).

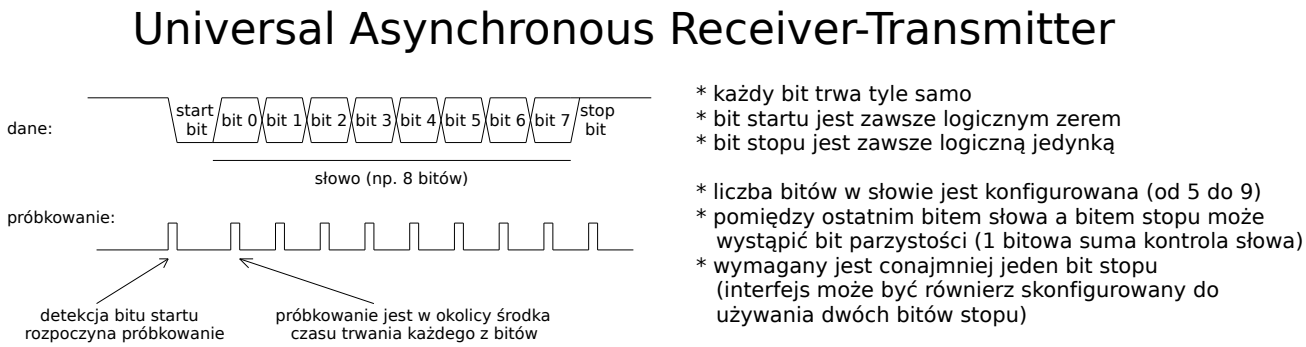


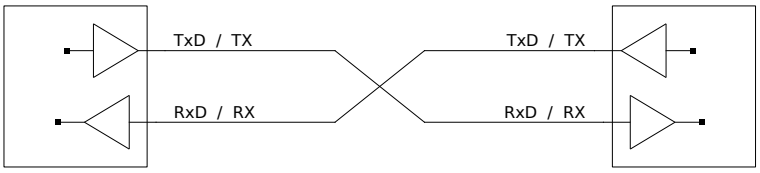
9.3 1 wire (one-wire)

jest to szeregowa magistrala half-duplex złożona z jedynie z linii sygnałowej (która może także służyć do zasilania urządzeń) posiadająca zdefiniowany format ramki wraz z adresowaniem. Standardowe nadawanie jest realizowane jako open-drain (wyjątkiem jest nadawanie tzw power-byte).

9.4 USART

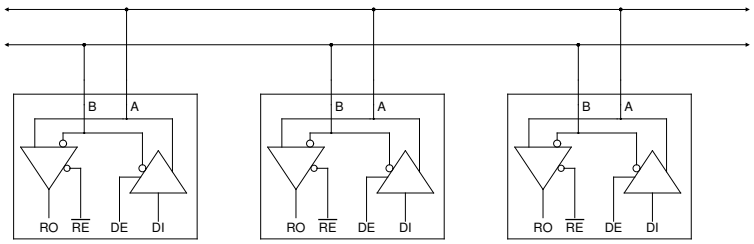
jest to uniwersalny synchroniczny i asynchroniczny nadajnik i odbiornik, umożliwia realizację szeregowej transmisji synchronicznej (zgodnie z zegarem) lub asynchronicznej (wykrywanie początku ramki na podstawie linii danych). Interfejs korzysta z rozdzielonych linii nadajnika i odbiornika (wyjście danych TxD oraz wejście danych RxD, co umożliwia realizację transmisji full-duplex) oraz może korzystać z dodatkowych sygnałów sterujących (wyjście RTS informujące o gotowości do odbioru oraz wejście CTS informacji o gotowości odbioru / zezwolenia na nadawanie). Niekiedy dostępne jest także wyjście załączenia nadajnika używane do pracy w trybie half-duplex (linie TxD i RxD połączone buforem trój-stanowym nadajnika).



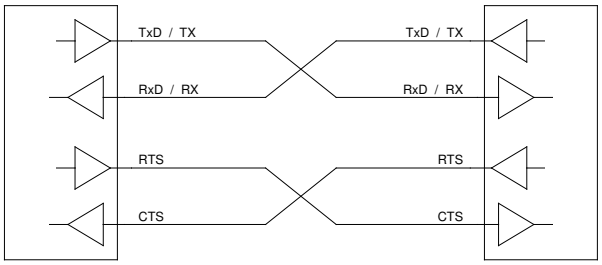


Interfejs ten najczęściej wykorzystywany jest w trybie asynchronicznym jako UART. W połączeniach UART zarówno nadajnik jak i odbiornik muszą mieć ustawione takie same parametry transmisji (szybkość, znaczenie 9 bitu (typowo bit parzystości, ale może także oznaczać np. pole adresowe), itp). Głównymi standardami elektrycznymi dla UART są: poziomy napięć układów elektronicznych używających tych portów (3.3V, 5V), RS-232 (w pełnym wariancie używa sygnałów kontroli przepływu, poziom logiczny 1 wynosi od -15V do -3V, a poziom logiczny 0 od +3V do +15V), RS-422 (transmisja różnicowa full--duplex pomiędzy dwoma urządzeniami) i RS-485 (transmisja różnicowa half-duplex w oparciu o szynę łączącą wiele urządzeń, kompatybilny elektrycznie z RS-422), możliwa jest też transmisja światłowodowa i bezprzewodowa.

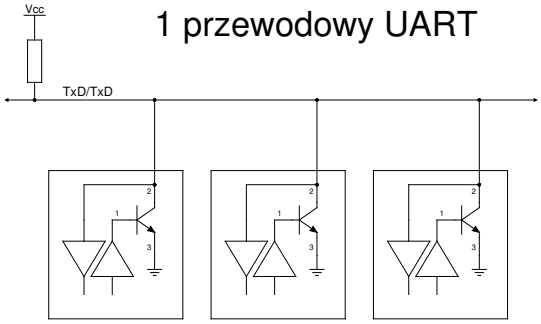
2 przewodowy RS485 (half duplex)



4 przewodowy UART
(z sygnałami RTS i CTS)



1 przewodowy UART



Rezystory terminujące

Niektóre ze standardów interfejsów komunikacyjnych przewidują kończenie swoich magistral rezystorem terminującym. Zastosowanie takiego rezystora ma na celu eliminację odbić sygnału, które mogłyby powstać na końcu linii transmisyjnej.

Zjawisko to występuje w przypadku *linii długich*, czyli takich których długość jest zbliżona lub większa od długości fali związanej z przesyłanym sygnałem. Jeżeli rozważymy np. impuls o czasie trwania 1μs to zajmie on na kablu odcinek o długości około 200m (zależy to od prędkości rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w ośrodku który stanowi dany przewód). Zatem dla sygnału 1MHz (czyli takiego gdzie pojedyncze impulsy są właśnie długości 1μs) przewód o długości kilkuset metrów będzie linią długą.

Odbicia te wynikają z faktu, iż przemieszczanie się sygnału (np. naszego impulsu 5V o czasie trwania 1μs) wzdłuż przewodu związane jest z ładowaniem kolejnych pojemności pasożytniczych, związanych z odcinkiem przewodu do którego dociera sygnał. Dzieje się to kosztem rozładowania pojemności odcinka przewodu który sygnał już opuścił.
W momencie gdy sygnał trafia na koniec przewodnika nie ma możliwości rozładowania tej pojemności na kolejny odcinek przewodu, więc ładunek z nią związany „rozpływa się po kablu” powodując powstanie odbicia. Odbicie takie (biegnące od końca przewodu w stronę nadajnika) nakłada się na kolejne impulsy naszego sygnału (biegnące od nadajnika) i powoduje zakłócenia w ich odbiorze (interpretacji).
Zastosowanie odpowiedniego rezystora na końcu linii pozwala na rozładowanie tej pojemności (tak jakby był tam kolejny nieskończenie długi odcinek przewodu) i eliminację odbicia. Wartość tej rezystancji jest charakterystyczna dla danego przewodu i określana przez parametr nazywany *impedancją falową*.
Rezystor terminujący stanowi obciążenie dla nadajnika i powinien on być stosowany tylko na końcach

magistrali, czyli np. na ostatnich urządzeniach podłączonych do magistrali (a nie przy każdym urządzeniu do niej włączonym).

Jeżeli długość linii jest dużo mniejsza (dla sygnałów prostokątnych przyjmuje się że około 20-40 razy) od długości odcinka jaką zajmuje pojedynczy impuls (np. linia długości 3m, dla przykładowego sygnału 1MHz) to nie ma potrzeby stosowania rezystorów terminujących (często nawet gdy w ogólności dany standard je przewiduje), gdyż stan całej linii jest spójny i wymuszany przez nadajnik (nie jest to przypadek linii długiej).

Standard I2C nie przewiduje rezystorów terminujących (i nie powinny być w nim używane, zwłaszcza że są to linie open drain i powstawałby dzielnik z rezystorem pull-up). Wynika to z tego iż przy maksymalnej prędkości tego interfejsu za linie długie należałoby uznać odcinki co najmniej kilkunastometrowe, a z innych względów standard ten posiada ograniczenie do kilku metrów.
Standard RS-485 przewiduje stosowanie rezystorów terminujących 120 Ω, jednak w przypadku krótkich połączeń i/lub małych prędkości transmisji mogą one być pominięte.

10 Układy programowalne

10.1 układy o programowalnej strukturze (PLD)

Układy z programowalną strukturą logiczną, oparte są na tym że wewnątrz takiego układu programujemy jakiś układ bramek logicznych, przerzutników i tym podobnych elementów oraz ich połączeń.

Do programowania tego typu układów służą języki opisu sprzętu typu HDL (hardware description language). Najczęściej jest to VHDL lub Verilog i zamiast wykonywanego kodu opisuje strukturę układu logicznego (połączenia bramek, tablice prawdy, etc), która następnie jest programowana w fizycznej kości. Pozwala to na zaprogramowanie jakiegoś algorytmu, który realizowany będzie czysto sprzętowo. Taka realizacja sprzętowa, dzięki urównolegleniu wielu procesów jest zazwyczaj znacznie szybsza w działaniu niż wersja programowa.

Najprostszym koncepcyjnie sposobem realizacji czegoś takiego jest układ pamięciowy, który pozwala na zrealizowanie dowolnej funkcji logicznej, czyli dowolnego układu bramek. Jeżeli weźmiemy pamięć która będzie miała 2^n bitów i będzie adresowana n-bitową szyną adresową, to z każdym adresem związany jest jakiś jeden bit i każdy bit odpowiada jednemu adresowi. Pamięć tego typu pozwala na zapisanie tabeli prawdy dowolnej funkcji która posiada n wejść i jedno wyjście – każdemu wejściu odpowiada jeden bit adresu, a związana z daną kombinacją wejść, wartość wyjścia zapisana jest w tej pamięci.

Układy tego typu mają spore zastosowanie praktyczne i pozwalają na konstruowanie układów działających szybciej niż układy procesorowe Zastosowanie programowalnych układów logicznych jest prostsze i szybsze niż konstruowanie takich rozwiązań z pojedynczych elementów takich jak bramki, a przy produkcji na małą i średnią skalę także tańsze od projektowania i produkcji dedykowanych układów scalonych. Pozwala też na aktualizację takiego „sprzętu” poprzez zaprogramowanie poprawionej jego wersji.

Do kategorii tej zaliczają się układy typu:

- SPLD
  - PLE - programowalna matryca bramek OR
  - PAL i GAL - programowalna matryca AND z dodatkowymi bramkami OR (często także obudowana rejestrami i multiplekserami na wyjściach)
  - PLA - programowalne matryce AND i OR
- CPLD
- FPGA - programowalny element pamięciowy (możliwość zdefiniowania dowolnej - na ogół 4 wejściowej - funkcji w każdym elemencie logicznym, programowalne połączenia między elementami logicznymi i pinami, itd)

10.2 systemy procesorowe

Układy procesorowe to systemy wykonujące ciąg instrukcji pobieranych z jakieś pamięci. Składają się one z procesora, pamięci programu i pamięci danych. Procesor odpowiedzialny jest za interpretację i wykonywanie kolejnych instrukcji, pamięć przechowuje instrukcje i dane. W zależności od stosowanej architektury kod programu, a raczej kod maszynowy utworzony w wyniku kompilacji kodu programu, może znajdować się albo w tej samej pamięci w której przechowujemy również dane albo może mieć osobną, wydzieloną pamięć.

Systemami procesorowymi są zarówno systemy komputerowe, takie jak PCty czy laptopy, są nimi telefony komórkowe, zarówno smartfony jak i te bardziej prymitywne, są nimi duże systemy obliczeniowe, a także różnego rodzaju mikrokontrolery znajdujące się w sterownikach przemysłowych, centralkach alarmowych, telewizorach, sprzęcie AGD i tak dalej.

Procesor pracuje w cyklach rozkazowych, w ramach których przetwarza pojedynczą instrukcję. Cykl taki może trwać od 1 do kilku lub więcej cykli zegarowych i typowo składa się z następujących kroków:

Procesor pracuje w cyklach rozkazowych, w ramach których przetwarza pojedynczą instrukcję. Cykl taki może trwać od 1 do kilku lub więcej cykli zegarowych i typowo składa się z następujących kroków:

1. pobranie instrukcji z pamięci - realizowane jest poprzez wystawienie na szynę adresową zawartości *licznika programu* (zawierające adres instrukcji do wykonania) oraz wygenerowanie cyklu odczytu z pamięci, po wykonaniu odczytu danych następuje ich zapamiętanie w *rejestrze instrukcji* oraz zwiększenie wartości *licznika programu* o jeden;
   (zawartość rejestru *licznika programu* po resecie procesora określa skąd pobierana będzie pierwsza instrukcja, pod takim adresem zazwyczaj umieszczana jest jakaś pamięć typu ROM lub flash)
2. dekodowanie instrukcji - układ dekodera (np. oparty o PLA) dokonuje zdekodowania instrukcji znajdującej się w *rejestrze instrukcji* i konfiguracji procesora w zależności od jej kodu i (opcjonalnie) jej argumentów; może to być np.:
   - odpowiednie ustawienie multiplekserów pomiędzy rejestrami a jednostką ALU oraz wystawienie odpowiedniego kod operacji dla ALU (celem wykonania operacji arytmetycznej na wartościach rejestrów)
   - wystawienie zawartości wskazanego rejestru na szynę adresową, podłączenie wskazanego rejestru do szyny danych oraz skonfigurowanie operacji odczytu/zapisu (celem wykonania odczytu lub zapisu wartości rejestru z/do pamięci)
3. wykonanie instrukcji - realizacja wcześniej zdekodowanej instrukcji zgodnie z ustawioną konfiguracją procesora

Instrukcje skoku polegają na załadowaniu nowej wartości do *licznika programu*, w przypadku skoków warunkowych jest to uzależnione od stanu *rejestru flag*, które ustawiane są w oparciu o wynik ostatniej operacji wykonywanej przez ALU.

Trochę uproszczony model działania procesora może wyglądać w sposób następujący: Procesor wystawia na szynę adresową magistrali umożliwiającej dostęp do pamięci adres będący zawartością tak zwanego licznika programu. Jest to adres instrukcji, która ma zostać pobrana i wykonana. Po wystawieniu tego adresu generowany jest cykl odczytu na tej szynie. A odczytany kod instrukcji zapamiętywany jest w rejestrze instrukcji, następuje też zwiększenie licznika programu o 1 po to żeby móc w następnym cyklu pobrać kolejną instrukcję.

Następnym krokiem jest dekodowanie instrukcji – znajdujący się w procesorze układ dekodera dokonuje zdekodowania instrukcji znajdującej się we wspomnianym rejestrze i konfiguracji procesora w zależności od jej kodu i opcjonalnie argumentów. Konfiguracja ta może polegać na ustawienie odpowiednich multiplekserów, czyli właśnie takich przełączników elektronicznych pomiędzy rejestrami a jednostką wykonującą obliczenia (tak zwanym ALU – jednostką arytmetyczno-logiczną), wystawieniu odpowiedniego kodu operacji dla ALU (celem wykonanie operacji na przykład na zawartości określonych rejestrów). Może to być także podpięcie wskazanego rejestru do szyny danych (celem skomunikowania go z pamięcią - wykonania odczytu lub zapisu do pamięci, bądź celem załadowania jego wartości do licznika programu aby wykonać skok) i tym podobne operacje. Ostatnim krokiem takiego cyklu jest wykonanie tych operacji, czyli

wykonanie wcześniej zdekodowanej instrukcji, zgodnie z ustawioną konfiguracją procesora.

Przedstawiony model działania jest przykładowym i w rzeczywistym procesorze może to wyglądać odmiennie - np. długość instrukcji może być większa niż długość słowa używanego przez procesor / szerokość szyny danych co rozbudowuje fazę pobierania instrukcji z pamięci (instrukcja będzie ładowana w kilku fazach, gdyż cała instrukcja nie mieści się jednorazowo na szynie danych), mogą występować instrukcje bardziej złożone (np. operacje wykonywane z argumentem pobieranym z pamięci a nie rejestru), może także występować więcej faz (np. poprzez wydzielenie faz dostępu do pamięci, czy zapisywania wyników działania instrukcji).

Procesor może również działać potokowo, czyli fazy mogą się na siebie nakładać – podczas gdy jedna instrukcja jest wykonywana to kolejna może być już dekodowana. Oczywiście wtedy procesor musi wykonywać pewne założenia co do prawdziwości skoków warunkowych, czyli na przykład wykonuje instrukcje skoku warunkowego, ale dekoduje już instrukcję która jest po niej, tak jakby skok miał nie zajść. W takiej sytuacji jeżeli skok zachodzi to wtedy ta zdekodowane instrukcja jest unieważniona, potok należy zapełnić od nowa i nie udaje się wykorzystać przyspieszenia związanego z wielopotokowością. Na takiej pracy potokowej opiera się tak zwany Hyper Threading dostępny w niektórych procesorach, jednak jak się przekonaliśmy taka praca potokowa nie jest równoważna z większą ilością niezależnych rdzeni.

Magistrala pomiędzy procesorem a pamięcią często jest magistralą równoległą, na której mogą się znaleźć też inne urządzenia wejść wyjść dostępne pod innymi adresami. W niektórych konstrukcjach mają one wydzieloną przestrzeń adresową, a w innych wspólną z pamięcią.

10.2.1 Mikrokontrolery

Przykładem systemu mikroprocesorowego, będącego jednocześnie przykładem układu typu system on chip, są mikrokontrolery. W jednym układzie scalonym zawierają one procesor, pamięć operacyjną RAM, pamięć stałą typu flash do przechowywania kodu programu (nie jest on w ich wypadku ładowany do RAMu, tylko wykonywany bezpośrednio z pamięci flash). Bardzo często w układzie tym znajdują się również różnego rodzaju układy wejścia-wyjścia, takie jak porty GPIO, które umożliwiają ustawienie lub odczyt stanu danej nóżki układu, mogą nimi być bardziej zaawansowane interfejsy jak porty szeregowe USART, I2C, SPI. Mogą to być także przetworniki analogowo-cyfrowe (umożliwiające pomiar wartości jakiegoś napięcia – sygnału analogowego) i cyfrowo analogowe (umożliwiające wystawienie napięcia o danej wartości).

11 Projektowanie 🤓

Reguły DRY i KISS, o których była mowa przy omawianiu bibliotek w pythonie, mają zastosowanie także w elektronice, a zwłaszcza projektowaniu układów elektronicznych i różnego rodzaju systemów automatyki. Przy projektowaniu elektroniki trochę trudniej niż w programowaniu jest zachować regułę DRY (zwłaszcza przy tworzeniu projektów płytek drukowanych *PCB*), jednak należy dążyć do tego – wydzielać powtarzające się elementy do pod-schematów, modularyzować tworzony projekt, itd.

Kurs ten poświęcony jest głównie elektronice cyfrowej, a ta współcześnie opiera się na wykorzystaniu układów programowalnych. Zatem dalsze rady będą dotyczyły głównie projektowania systemu/urządzenia opartego na jakimś mikrokontrolerze (mimo to wiele z nich można zastosować także przy projektowaniu innych układów elektronicznych i nie tylko).
Przy tworzeniu projektów tego typu systemów/urządzeń należy mieć szczególnie na uwadze:

- trzymanie się standardów i modułowość:
  - należy stosować standardowe, popularne, otwarte protokoły komunikacyjne, takie jak I^2C, RS-485/Modbus, Ethernet/IP
  - należy dokonywać podziału system na moduły funkcjonalne i określamy interfejsy pomiędzy nimi, zasadę tę należy stosować rekurencyjnie do wszystkich większych/bardziej złożonych jego elementów
  - należy unikać projektowania modułów „na miarę” (lepiej mieć n+2 jednakowych modułów niż n każdy innego rodzaju)

  - gdy oczekujemy większej niezawodności to należy zastosować redundancję – np. podwójne układy zasilania i komunikacji (dwa porty RS-485 lub dwa porty Ethernet) w każdym z urządzeń (modułów) składających się na system
  - protokoły komunikacyjne, prędkość transmisji, etc należy dobierać z sporym zapasem (rzędu nawet 50-70%), przewidując pojawienie się kolejnych rejestrów, funkcji, itp.
  - należy przewidzieć rezerwę miejsca w modułach (np. dostępnych wejść)

- dokumentacja, wersjonowanie:
  - należy stosować wersjonowanie nie tylko kodu, ale również schematów, projektów PCB, dokumentacji, etc związanych z naszym projektem
  - należy także oznaczać wersje związane z wykonanymi prototypami (w taki sposób aby można było je jednoznacznie powiązać z fizycznie wykonanym prototypem) i trzymać je co najmniej do zakończenia życia tych prototypów
  - należy umieszczać identyfikator wersji na tworzonych płytkach PCB
  - należy tworzyć dokumentację, np. samo użycie modbus nie rozwiązuje kwestii dokumentacji komunikacji – konieczna jest rzetelna tabela rejestrów

- zachowanie prostoty:
  - jeżeli używany mikrokontroler ma wbudowaną funkcję podciągania wejść – używać jej zamiast zewnętrznych rezystorów pull-up / pull-down, jeżeli ma tylko pull-up to przyciski robić jako zwierane do masy aby móc z niej skorzystać
  - pamiętać że często (wbrew początkowej intuicji) sterowanie czymś przy pomocy wyjścia cyfrowego (zwłaszcza gdy wymagany jest do tego zewnętrzny tranzystor) prostsze jest od strony masy, czyli poprzez odłączanie/podłączanie do sterowanego układu masy (a nie dodatniego bieguna zasilania)
  - warto także ograniczyć liczbę wykorzystywanych rodzin i modeli mikrokontrolerów – w przypadku nie seryjnej produkcji oszczędności z zastosowania np. bardzo małego mikrokontrolera zostaną zatarte „kosztami” związanymi z trudnościami w jego użyciu (brak pinów do debugowania, mała pamięć programu, itd.) oraz związanymi z rozwijaniem projektów na różnych mikroprocesorach (bo do kolejnego był już za mały)

- łatwość diagnostyki i serwisu:
  - należy zapewnić reset układów peryferyjnych wraz z resetem mikrokontrolera (np. poprzez użycie jednego z pinów GPIO mikrokontrolera w tej roli), dotyczy to także przypadków gdy naszymi urządzeniami peryferyjnymi są inne mikrokontrolery
  - należy zapewnić łatwą możliwość przeprogramowania mikrokontrolera (bez potrzeby rozmontowywania układu, czy też wyjmowania z niego mikrokontrolera), a jeżeli aktualizacja wbudowanego oprogramowania odbywa się standardowo w jakiś wyżej poziomowy sposób to należy zapewnić zabezpieczenie przed awarią w jej trakcie, np. poprzez umieszczanie go na wymiennej karcie SD lub dostęp (np. poprzez UART) do sprzętowego bootloadera danego mikrokontrolera, lub zewnętrzny dostęp do programowania odpowiedniej pamięci
  - warto zapewnić 2-3 diody sygnalizacyjne informujące o stanie pracy / awarii naszego urządzenia
  - należy zapewniać możliwości naprawy i modyfikacji poszczególnych elementów systemu – przede wszystkim poprzez zapewnienie dostępu do nich (a gdy będzie on nie możliwy lub bardzo trudny poprzez położenie zapasowych przewodów), wykonywanie połączeń w łatwo dostępnych miejscach, itd.
  - należy zachowywać kompatybilność wsteczną zawsze wtedy gdy tylko to jest możliwe (nowe urządzenie, nowa wersja muszą pracować w istniejącej sieci, nowa wersja musi w prosty sposób móc zastąpić poprzednią)
  - należy konsekwentnie trzymać się określonych interfejsów i protokołów, jest to szczególnie ważne

w niskopoziomowych (trudno aktualizowalnych, debugowalnych, występujących w dużej liczbie egzemplarzy) urządzeniach

- nie tworzenie „potworków” (bo to się będzie mściło):
  - należy unikać sztucznego ograniczania funkcjonalności tworzonego urządzenia (co jest nagminnie czynione w urządzeniach powszechnie dostępnych na rynku), na przykład:
    * jeżeli urządzenia ma złącze Ethernet i używa je np. do wystawienia jakiegoś WWW to należy udostępnić pełną funkcjonalność monitoringu/konfiguracji tego urządzenia przez to TCP/IP z użyciem standardowych protokołów (np. Modbus TCP)a nie wymagać do tego osobnego modułu
    * jeżeli urządzenia ma system operacyjny (np. Linuxa) należy zapewnić możliwość pełnego dostępu do niego (z prawami root'a) – także użytkownikowi, jeżeli je od nas kupił to on jest jego właścicielem
  - z drugiej strony należy jednak unikać upychania funkcjonalności do granic możliwości (lepiej pozwolić „zmarnować się” kilku nóżkom mikrokontrolera niż zrezygnować z czytelności, powtarzalności czy możliwości diagnostycznych na rzecz np. obsłużenia kilku dodatkowych IO)
  - należy unikać oszczędzania kilka złotych minimalizując ponad miarę rozmiar PCB czy eliminując jakieś złącza lub je ograniczając (na złączach oprócz sygnałów należy wystawiać też potrzebne zasilania/masy w odpowiednich ilościach)
  - należy walczyć z z problemem plątaniny kabli już na etapie założeń projektowych poprzez:
    * stosowanie modularności – np. 1 sterownik Ethernet/IP (lub co najmniej RS-485/Modbus) na niezbyt dużą grupę wejść (np. jeden panel przycisków) / wyjść (np. jedną grupę przekaźników)
    * nie oszczędzanie miejsca na PCB i funduszy na gniazdka przyłączeniowe (nie robić przylutowywanej na stałe wiązki kabli, pamiętać o masach i zasilaniach)
    * nie oszczędzanie miejsca na PCB na otwory montażowe (najlepiej na wszystkich modułach wykonywać je w identycznych miejscach - z myślą o przyszłej obudowie, a nie tam gdzie popadnie)
    * w przypadku wykonywania większych układów, złożonych z kilku sterowników rozważyć stosowanie korytek grzebieniowych do ukrycia plątaniny kabli
    * w przypadku stosowania magistrali równoległej rozważyć multipleksowanie linii adresowej i danych
  - należy pamiętać że źle zastosowane technologie, które mają służyć ułatwieniu serwisowania i obsługi systemu (koryta kablowe, stelaże/szafy rack 19”, obudowy z mocowaniem na szynę DIN / TH-35) mogą przynieść odwrotny skutek, a liczy efekt w postaci dobrze zaprojektowanego, czytelnego, dobrze działającego, serwisowalnego, rozbudowywalnego urządzenia/systemu a nie konkretnie zastosowane technologie

12 Wykład wideo[6]

- *Podstawy elektroniki* – http://video.opcode.eu.org/08.01-podstawy.mkv
- *Rezystor i kondensator* – http://video.opcode.eu.org/08.02-rezystor+kondensator.mkv
- *Cewka* – http://video.opcode.eu.org/08.03-cewka.mkv
- *Dioda* – http://video.opcode.eu.org/08.04-dioda.mkv

6. Filmy posiadają napisy wgrane do kontenera multimedialnego jako osobny strumień – napisy mogą być włączone lub wyłączone w odtwarzaczu. W wielu filmach dużo dzieje się ”na dole ekranu”, dlatego polecamy odtwarzać filmy z napisami umieszczonymi poniżej filmu, np. przy pomocy polecenia: `vlc --video-filter='croppadd{paddbottom=120}' --sub-margin=-10 PLIK.mkv`

- *Tranzystory* – http://video.opcode.eu.org/08.05-tranzystory.mkv
- *Bramki logiczne* – http://video.opcode.eu.org/09.01-bramki.mkv
- *Zatrzaski, przerzutniki i rejestry* – http://video.opcode.eu.org/09.02-rejestry.mkv
- *Transmisja danych* – http://video.opcode.eu.org/09.03-transmisja.mkv
- *Układy programowalne* – http://video.opcode.eu.org/09.04-programowalne.mkv
- *Mikrokontrolery STM32* – http://video.opcode.eu.org/09.05-stm32.mkv

13 Literatura dodatkowa

- *Kurs elektroniki w serwisie* forbot.pl (https://forbot.pl/blog/kurs-elektroniki-dla-poczatkujacych-id5151).
- *Kurs elektroniki w serwisie* robotykadlapoczatkujacych.pl (http://robotykadlapoczatkujacych.pl/kurs-elektroniki-dla-poczatkujacych/).
- *Doświadczenia elektroniczne w circuitjs* (https://www.falstad.com/circuit/polish/e-index.html) - zbiór symulacji układów elektronicznych wraz z opisami.

14 Rozwiązania zadań

Treści zadań zamieszczone zostały w odpowiednich rozdziałach skryptu.

Poniżej zamieszczone są przykładowe rozwiązania „głównych” zadań z tego skryptu wraz z komentarzami. Wiemy że zajrzenie do nich już przy pierwszej trudności jest kuszące, mimo to rekomendujemy przynajmniej podjąć uczciwą, co najmniej kilkunastominutową na każde z zadań, próbę rozwiązania tych zadania bez zaglądania do odpowiedzi.

Pamiętaj!: Samodzielne rozwiązanie problemu (wraz z wszystkimi trudnościami po drodze i popełnionymi błędami) jest dużo bardziej kształcące od nawet wielokrotnego przepisania gotowego rozwiązania, jednak nawet jednokrotne przepisanie rozwiązania jest bardziej kształcące od wielokrotnego przekopiowania go.

Rozwiązanie zadania 2.1.1

$$I = I_{R_1} = I_{R_2} = \frac{U}{R_1 + R_2} \qquad U_{R_1} = I \cdot R_1 = U \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R_1 + R_2}$$

Rozwiązanie zadania 2.1.2

$$U = U_{R_3} = U_{R_4} \qquad I_{R_3} = \frac{U}{R_3}$$

$$R_c = \frac{1}{1/R_3 + 1/R_4}$$

Rozwiązanie zadania 2.1.3

Przycisk wciśnięty – punkt T1 połączony z masą, czyli napięcie w T1 wynosi 0V.
Przycisk rozwarty – prąd nie płynie, spadek napięcia na rezystorze wynosi 0V (brak prądu), czyli napięcie w T1 wynosi 5V.

Rozwiązanie zadania 2.4.1

Rozwiązanie zadania 3.0.1

Należy uwzględnić spadek napięcia na diodzie około 1.7V, w efekcie czego mamy napięcie na rezystorze 3.3V. Napięcie to wraz z wartością tego rezystora określa prąd płynący w obwodzie i wynoszący 3.3mA.

Rozwiązanie zadania 3.2.1

T2 – typowy dzielnik rezystancyjny, napięcie w T2 wynosi 3V.
T3 – dzielnik z diodą Zenera, dioda Zenera przewodzi, napięcie w T3 wynosi 3.3V.
T4 – dzielnik z diodą Zenera, dioda Zenera nie przewodzi (przyłożone napięcie mniejsze od napięcia przebicia), napięcie w T4 wynosi 0V.

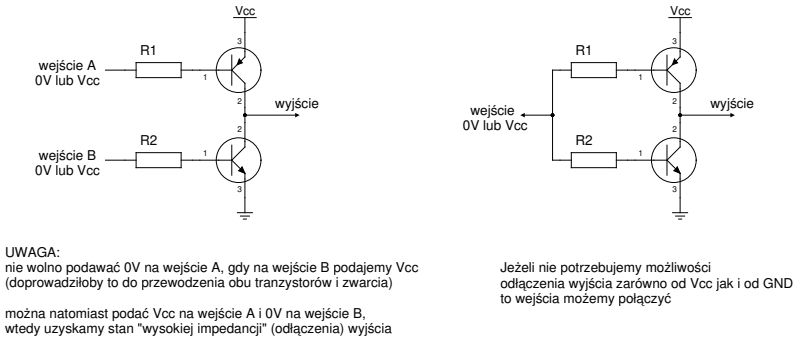
Rozwiązanie zadania 3.3.1

Rozwiązanie zadania 3.3.2

Rozwiązanie zadania 4.4.1

R8: Prąd bazy wynosi około 0.5mA, czyli tranzystor przewodzi. Prąd kolektora "nastawiany" przez tranzystor (wynikający z prądu bazy), przy założeniu najsłabszego wzmocnienia wynosi 25mA (minimalne h_{FE} tego tranzystora to około 50). Prąd kolektora wynikający z wartości R8 to około 14mA, czyli znacznie mniejszy niż prąd "nastawiany" przez tranzystor. Zatem tranzystor nie ogranicza prądu – praca w nasyceniu, prąd płynący przez R8 wynosi około 14mA.
R10: Prąd bazy nie płynie (baza na potencjale wyższym niż emiter w PNP), czyli tranzystor przewodzi. Zatem prąd płynący przez R10 wynosi około 0mA.

Rozwiązanie zadania 4.5.1



Rozwiązanie zadania 4.8.1

Rozwiązanie zadania 4.8.2

Rozwiązanie zadania 4.8.3

Rozwiązanie zadania 4.8.4

Rozwiązanie zadania 5.0.1

Analizujemy stany logiczne kolejnych bramek:
U1: 0V and 5V => 0V
U2: not (0V or 0V) => 5V
U3: 5V xor 5V => 0V Zatem w T5 mamy stan niski, czyli 0V.

Rozwiązanie zadania 5.1.1

Rozwiązanie zadania 5.1.2

Rozwiązanie zadania 6.0.1

Rozwiązanie zadania 8.2.1

74HC574 to 8bitowy rejestr z wyjściem trójstanowym.
Użycie jako układ **wejściowy**: peryferium steruje sygnałami D0...D7 i sygnałem CP (CLK), do szyny danych podłączone wyjścia Q0...Q7, dekoder adresu wraz z sygnałami sterującymi szyny steruje wejściem OE celem wystawienia danych z rejestru na szynę przy dokonywaniu odczytu z niej przez urządzenie nadrzędne.
Użycie jako układ **wyjściowy**: peryferium używa wyjść Q0...Q7 (np. do podłączenia kontrolek LED), OE w stanie niskim (wyjścia aktywne), D0...D7 podłączone do szyny danych, dekoder adresu wraz

z sygnałami sterującymi szyny steruje wejściem CP (CLK) celem dokonania zapisu z szyny do rejestru przy wykonywaniu takiej operacji na magistrali przez urządzenie nadrzędne.

Rozwiązanie zadania 8.2.2

74HC574 to 8bitowy rejestr z wejściem szeregowym i wyjściem równoległym wyposażonym w rejestr wyjściowy z wyjściami 3 stanowe.
Układ nadrzędny (magistrala) steruje sygnałami DS (dane szeregowe), SHCP (zegar danych szeregowych) oraz STCP (zerag buforu wyjściowego) w sposób opisany w rozdziale poświęconym magistrali szeregowej. Wyjścia układu podłączone do peryferium (np. kontrolek LED). Wejście OE w stanie niskim (wyjścia zawsze aktywne). Wejście MR w stanie wysokim (reset nie aktywny).

Rozwiązanie zadania 8.3.1

© Matematyka dla Ciekawych Świata, 2017-2021.
© Robert Ryszard Paciorek <rrp@opcode.eu.org>, 2003-2021.
Kopiowanie, modyfikowanie i redystrybucja dozwolone pod warunkiem zachowania informacji o autorach.