

# Linux i Python w Elektronicznej Sieci #08: Wprowadzenie do elektroniki

Projekt „Matematyka dla Ciekawych Świata”,

Robert Ryszard Paciorek

<rrp@opcode.eu.org>

2023-06-25

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).

#### Schematy elektryczne wg. elektronika

Typowo elektronicy na schematach nie rysują źródeł napięcia (np. w postaci symbolu baterii<sup>a</sup>), zamiast tego umieszczają znaczniki potencjałów zasilania (np. +5V, +3V3, Vcc, Vbus) względem masy i znaczniki masy (GND,  $\perp$ ).

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.

<sup>a</sup>. 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<sup>1</sup>, a stosunek ten nazywamy oporem (rezystancją).

## 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.*

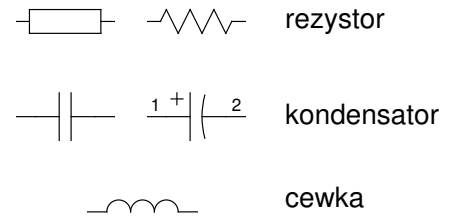
## 2 Elementy bierne

### 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:  $P = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R$ , 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<sup>2</sup>.



#### 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 nieznanego (zmiennego) 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).

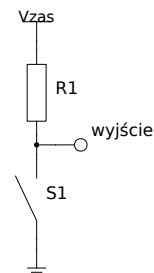
### 2.1.3 Rezystor podciągający

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 rozarty 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.

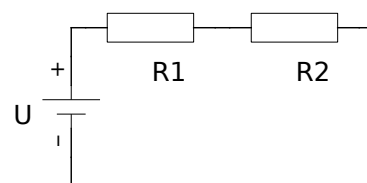
Układ taki pozwala na przykład stosowanie zwykłego styku zwieranego zamiast przełączalnego i jest bardzo często spotykany. Oczywiście możemy zamienić rezystor z przełącznikiem miejscami i wtedy domyślnym stanem (przy rozartym styku) będzie zero voltów.



#### 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.

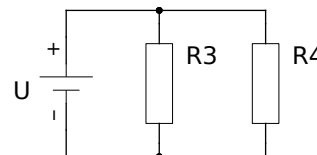
- Zapisz zależność (wzór) określający spadek napięcia na rezystorze  $R_1$ .
- Zapisz zależność (wzór) określający sumaryczną moc, która wydzieli się na obu tych rezystorach.



#### Zadanie 2.1.2

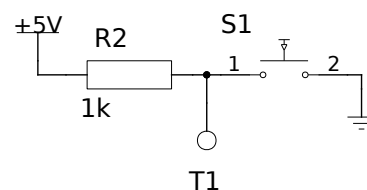
Rezystory  $R_3$  i  $R_4$  połączone zostały równolegle i podłączone do źródła napięcia  $U$ , tak jak pokazano na powyższym schemacie.

- Zapisz zależność (wzór) określający prąd płynący przez rezystor  $R_3$ .
- 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 rozarty (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](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 Przekazniki, styczniki i transformatory

Cewki możemy spotkać w urządzeniach takich jak przekazniki, czy styczniki<sup>3</sup>. Nawinięte na odpowiednim rdzeniu pełnią one tam funkcję elektromagnesu odpowiedzialnego za zmianę fizycznej pozycji styków prowadzącą do ich zwarcia lub rozwarcia (przełączenia).

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 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 uszkodzania 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

---

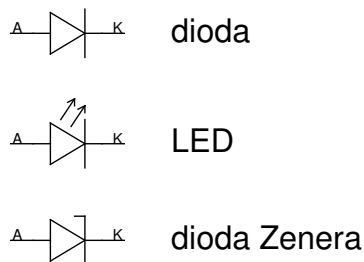
3. Zasadniczo przekaznik i stycznik jest to samo urządzenie. Przyjmuje się rozróżnienie w nazewnictwie - przekazniki przełączają mniejsze prądy niż styczniki.

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

### 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 technologii 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).

#### ! 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 zwarciovemu naszego źródła), co doprowadzi do zniszczenia diody.

Zobacz symulację: <http://ln.opcode.eu.org/led>

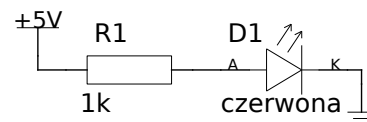
Z tego powodu diody podłączamy prawie zawsze<sup>a</sup> z szeregowym rezystorem służącym do ograniczenia prądu.

<sup>a</sup>. Istotnymi wyjątkami są: prostownik (gdzie rolę tego rezystora pełni obciążenie) oraz zasilanie diody ze źródła prądowego.

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

### 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 jednopółkowym, 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 (dwupółkowy). 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.

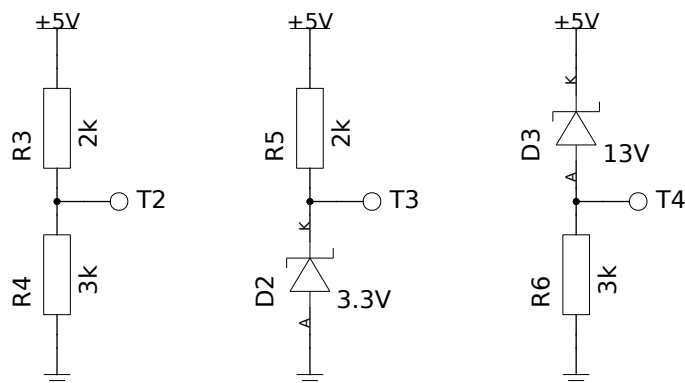
### 3.1.1 trójfazowe ☹

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 punktach T2, T3, T4. Odpowiedź krótko uzasadnij.

## 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 stanie 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 złączeniem 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.

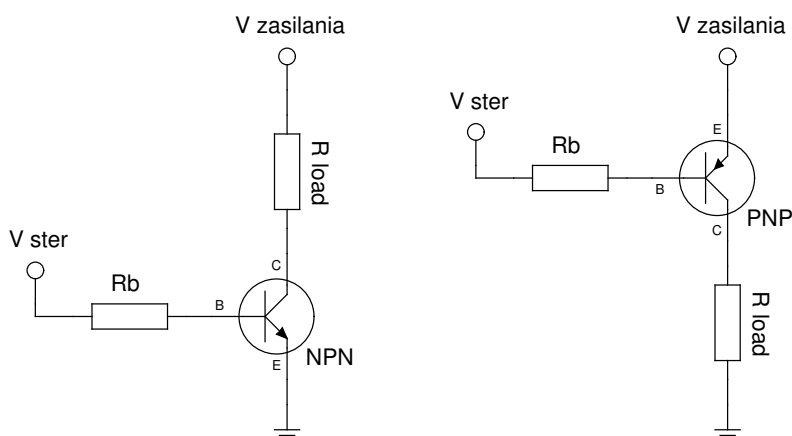
### 4.2 PNP

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  $\rightarrow$  źródło tranzystor ten przewodzi gdy  $U_{GS} > U_{GS(th)}$ , natomiast w przeciwnym kierunku przewodzi zawsze.

Dla tranzystorów N-MOSFET z kanałem wzbogaconym (*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 MOSFET w stan zatkania należy podać  $U_{GS} < U_{GS(th)}$ . Dla tranzystorów:

- N-MOSFET z kanałem wzbogaconym wystarczy obniżyć potencjał bramki do wartości niewiele wyższej niż potencjał źródła
- N-MOSFET z kanałem zubożonym musi to być wartość poniżej potencjału źródła.

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

### 4.4 P-MOSFET

Podobnie jak N-MOSFET tyle że:

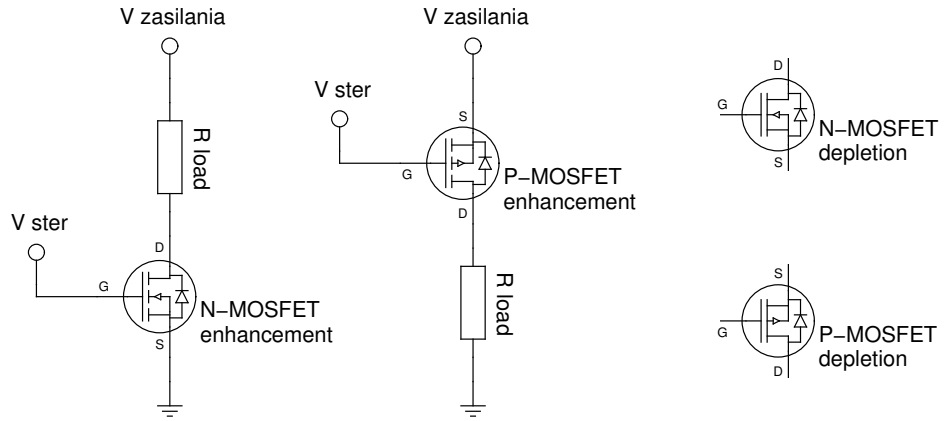
- regulowane jest przewodzenie w kierunku źródło  $\rightarrow$  dren (a w kierunku dren  $\rightarrow$  źródło przewodzi zawsze),
- przewodzenie w kierunku źródło  $\rightarrow$  dren ma miejsce gdy  $U_{GS} < U_{GS(th)}$ ,
- dla tranzystorów z kanałem wzbogaconym (*enhancement*)  $U_{GS(th)} < 0$ ,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

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

- P-MOSFET z kanałem zubożonym wystarczy obniżyć potencjał bramki do wartości niewiele wyższej niż potencjał źródła
- P-MOSFET z kanałem wzbogaconym musi to być wartość poniżej potencjału źródła.

Aby wprowadzić tranzystor 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<sup>5</sup>, 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:

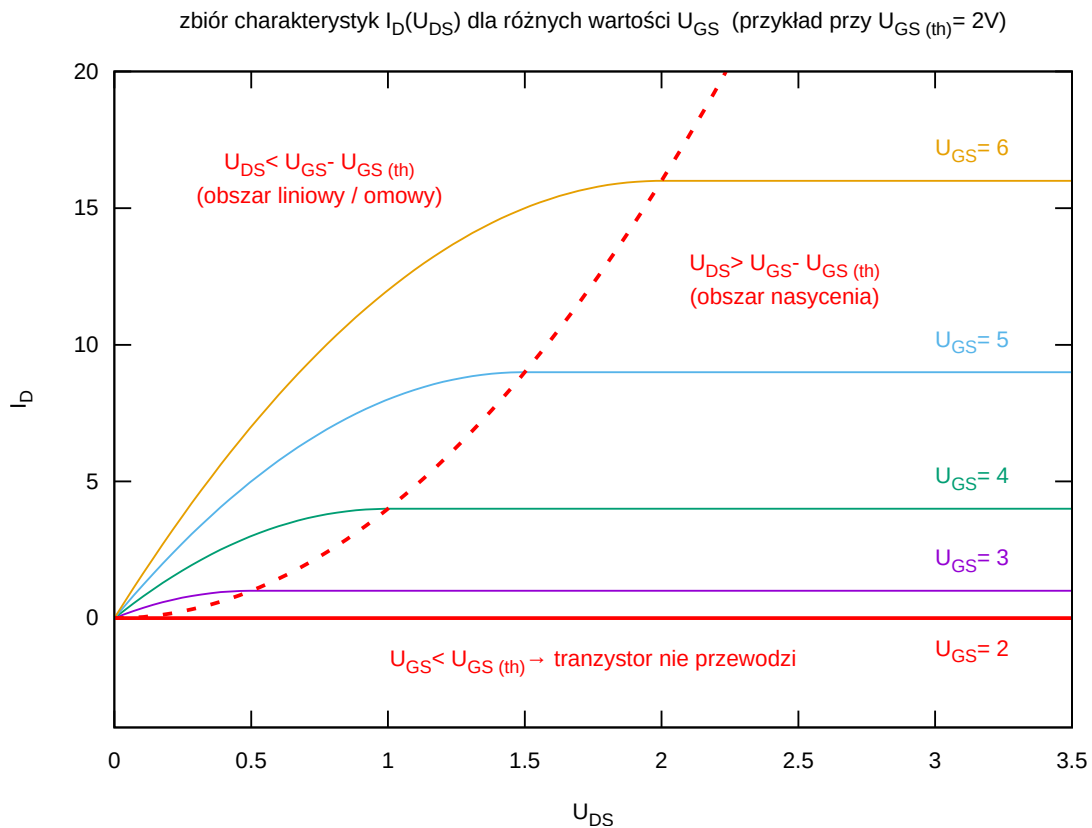
$$I_D \approx \beta \left( (U_{GS} - U_{GS(th)})U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right)$$

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

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

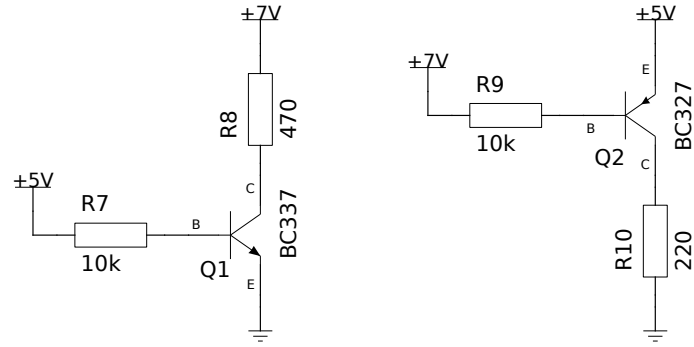
gdzie  $U_{DS(sat)}$  na ogół przybliża się w następujący sposób:  $U_{DS(sat)} \approx U_{GS} - U_{GS(th)}$ , natomiast  $U_{GS(th)}$  i  $\beta$  są parametrami tranzystora.

W dokumentacji poszczególnych modeli tranzystorów jest to często obrazowane w postaci charakterystyki wyjściowej (zbiór tych charakterystyk dla różnych wartości napięcia polaryzującego bramkę) takiej jak poniżej:



### Zadanie 4.4.1

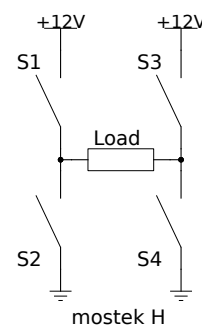
Oszacuj wartość prądu płynącego przez R8 oraz wartość prądu płynącego przez R10. Odpowiedź krótko uzasadnij.



## 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.



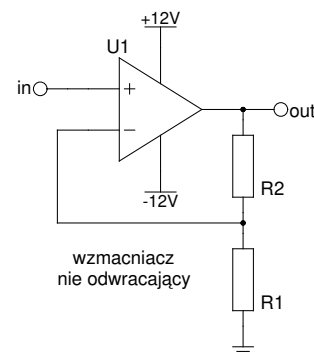
### Zadanie 4.5.1

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 wzmacnionego. Wzmacnianiu może ulegać sygnał napięciowy lub prądowy (najprostszym przypadkiem jest wzmacnienie 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](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, pożądanego wzmocnienia 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](http://ln.opcode.eu.org/opamp_loop). Więcej na ich temat można przeczytać na [http://vip.opcode.eu.org/#Wzmacniacz\\_operacyjny](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 - wspólnie są to przede wszystkim triaki.

## 5 Wykład wideo<sup>6</sup>

- Podstawy elektroniki – <http://video.opcode.eu.org/08.01.mkv>
- Rezystor i kondensator – <http://video.opcode.eu.org/08.02.mkv>
- Cewka – <http://video.opcode.eu.org/08.03.mkv>
- Dioda – <http://video.opcode.eu.org/08.04.mkv>
- Tranzystory – <http://video.opcode.eu.org/08.05.mkv>

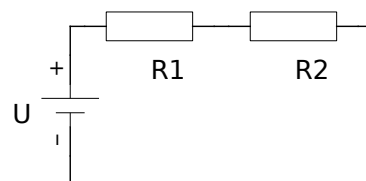
## 6 Zadania

Poniższe zadania znajdują się także w odpowiednich rozdziałach skryptu. Zostały jednak zamieszczone zbiorczo także w tym miejscu dla wygody czytelnika.

### 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.

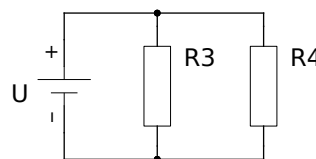
- Zapisz zależność (wzór) określający spadek napięcia na rezystorze  $R_1$ .
- Zapisz zależność (wzór) określający sumaryczną moc, która wydzieli się na obu tych rezystorach.



### Zadanie 2.1.2

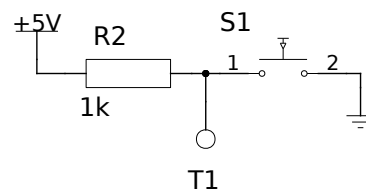
Rezystory  $R_3$  i  $R_4$  połączone zostały równolegle i podłączone do źródła napięcia  $U$ , tak jak pokazano na powyższym schemacie.

- Zapisz zależność (wzór) określający prąd płynący przez rezystor  $R_3$ .
- Zapisz zależność (wzór) określający łączną rezystancję obu rezystorów (czyli ich rezystancję zastępczą).



### Zadanie 2.1.3

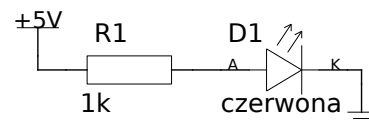
Podaj wartość napięcia (względem GND) w punkcie T1 w sytuacji gdy S1 jest wciśnięty (zwały) oraz w sytuacji gdy jest rozwały (nie przewodzi). Odpowiedź krótko uzasadnij.



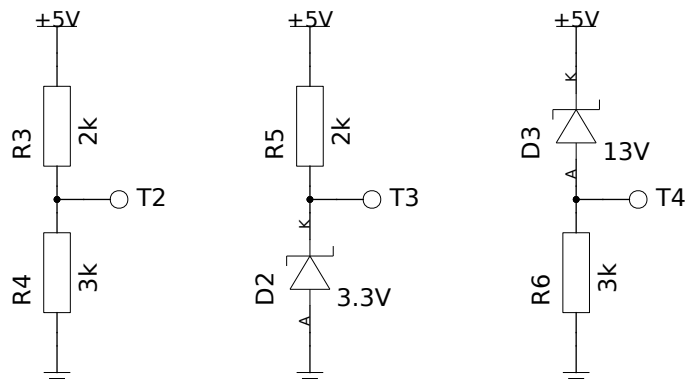
6. Filmy posiadają napisy wgrane do kontenera multimedialnego jako osobny strumień – napisy mogą być włączone lub wyłączone w odtwarzaczu. W wielu filmach dużo dzieje się "na dole ekranu", dlatego polecamy odtwarzać filmy z napisami umieszczonymi poniżej filmu, np. przy pomocy polecenia: `vlc --video-filter='croppadd{paddbottom=120}'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

### Zadanie 3.0.1

Oszacuj wartość prądu płynącego przez R1. Odpowiedź krótko uzasadnij.



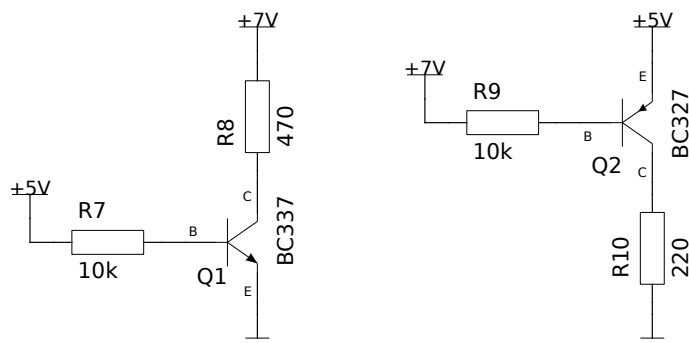
### Zadanie 3.2.1



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

### Zadanie 4.4.1

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



### Zadanie 4.5.1

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

## 7 Rozwiązania zadań

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 ucziwą, co najmniej kilkunastominutową na każde z zadań, próbę rozwiązania tych zadania bez zagłędania 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

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

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

### Rozwiązanie zadania 2.1.2

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

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

### Rozwiązanie zadania 2.1.3

Przycisk wcisnięty – punkt T1 połączony z masą, czyli napięcie w T1 wynosi 0V.

Przycisk rozarty – prąd nie płynie, spadek napięcia na rezystorze wynosi 0V (brak prądu), czyli napięcie w T1 wynosi 5V.

### 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.

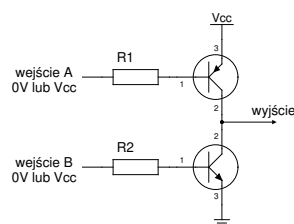
T4 – dzielnik z diodą Zenera, dioda Zenera nie przewodzi (przyłożone napięcie mniejsze od napięcia przebicia), napięcie w T4 wynosi 0V.

### Rozwiązanie zadania 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.

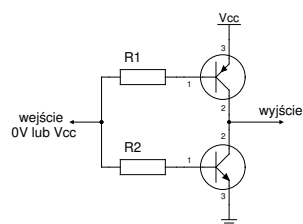
**R10:** Prąd bazy nie płynie (baza na potencjale wyższym niż emiter w PNP), czyli tranzystor przewodzi. Zatem prąd płynący przez R10 wynosi około 0mA.

### Rozwiązanie zadania 4.5.1



UWAGA:  
nie wolno podawać 0V na wejście A, gdy na wejście B podajemy Vcc (doprowadziłoby to do przewodzenia obu tranzystorów i zwarcia)

można natomiast podać Vcc na wejście A i 0V na wejście B, wtedy uzyskamy stan "wysokiej impedancji" (odłączenia) wyjścia



Jeżeli nie potrzebujemy możliwości odłączenia wyjścia zarówno od Vcc jak i od GND to wejścia możemy połączyć

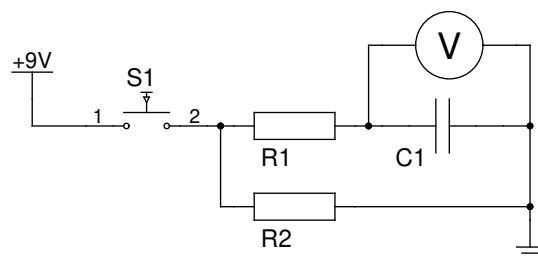
## 8 Zadania praktyczne

### Zadanie 8.0.1

Zbuduj układ przedstawiony na schemacie i zaobserwuj zmianę napięcia na kondensatorze w momencie załączenia, wyłączenia zasilania.

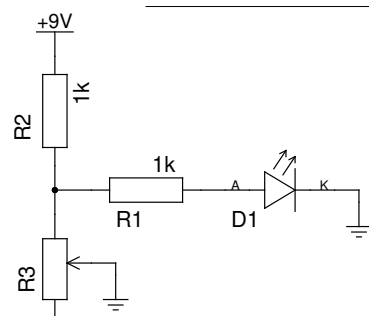
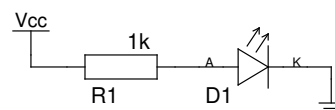
Zobacz jak zmieni się działanie układu gdy zmienisz wartości elementów (np. wartość rezystora R2).

Wskazówka: możesz zacząć od  $R1 = R2 = 22k\Omega$ .



### Zadanie 8.0.2

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.



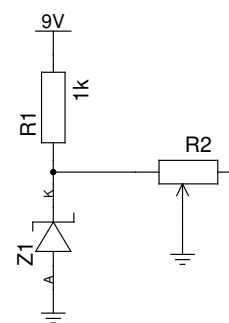
Jeżeli nie posiadasz regulowanego źródła napięcia możesz w jego roli użyć dzielnik z rezystorem nastawnym, tak jak pokazano na schemacie po lewej.

### Zadanie 8.0.3

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.



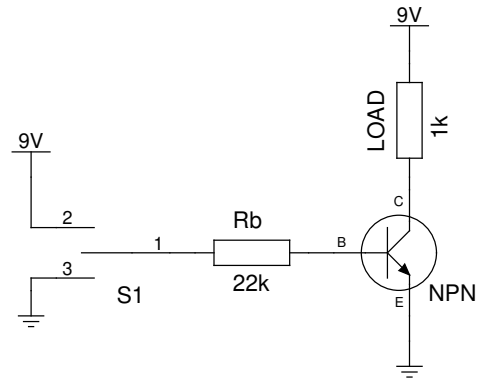
### Zadanie 8.0.4

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  $R_b$  poprzez przełącznik  $S1$  podłączony jest do napięcia zasilającego, a czy płynie gdy podłączony jest do masy?

Zmierz wartość prądu płynącego przez  $R_b$  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.*

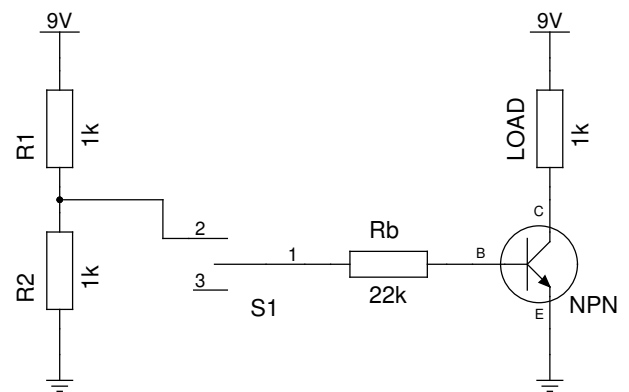


### Zadanie 8.0.5

Zmodyfikuj układ z zadania 8.0.4 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  $R_b$  i płynącego przez  $LOAD$  w obu stanach  $S1$ . Jak wprowadzone zmiany wpłynęły na zachowanie układu?



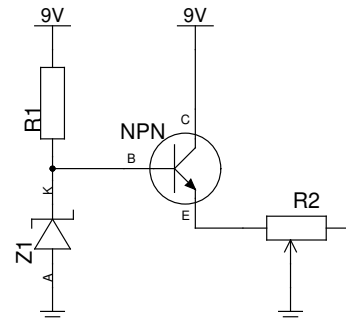
### Zadanie 8.0.6

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 8.0.3? Zastanów się dlaczego.



### Zadanie 8.0.7

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.*