

Sbírka simulací základních součástek v simulátoru Falstad Circuit

2025 Ing. František Štefanec, CC BY-SA 4.0

Betaverze

Obsah

1. Úvod.....	2
2. Rezistory, základní teorie.....	3
2.1 Ohmův zákon.....	3
2.2 Ukázka platnosti 1. Kirchhoffova zákona a paralelního zapojení.....	3
2.3 Ukázka platnosti 2. Kirchhoffova zákona, sériového zapojení a odporového děliče.....	4
2.4 Zatížený a nezatížený dělič napětí, potenciometr.....	4
3. Kondenzátory a cívky.....	5
3.1 Nabíjení a vybíjení kondenzátoru.....	5
3.2 Kondenzátor ve střídavém obvodu.....	5
3.3 Cívka (induktor) v obvodu.....	6
3.4 Transformátor.....	6
4. Základní polovodičové součástky.....	7
4.1 Dioda (křemíková, Schottkyho, Zenerova, LED).....	7
3.2 Tranzistor NPN.....	8
3.3 Tranzistor PNP.....	8
3.4 Tranzistor N-MOSFET.....	9
3.5 Tranzistor P-MOSFET.....	9
3.6 Tranzistor JFET.....	9
3.7 Tyristor.....	10
3.8 Triak.....	10
3.9 Diak.....	11

1. Úvod

Tento dokument má za cíl demonstrovat funkci jednotlivých elektronických součástek a různých obvodů.

Cílem dokumentu není poskytnout hloubkový popis teoretického nebo praktického fungování součástek, ale pouze demonstrovat jejich základní funkční princip.

Od čtenáře se očekává znalost schematických značek i základní teoretické funkce součástek.

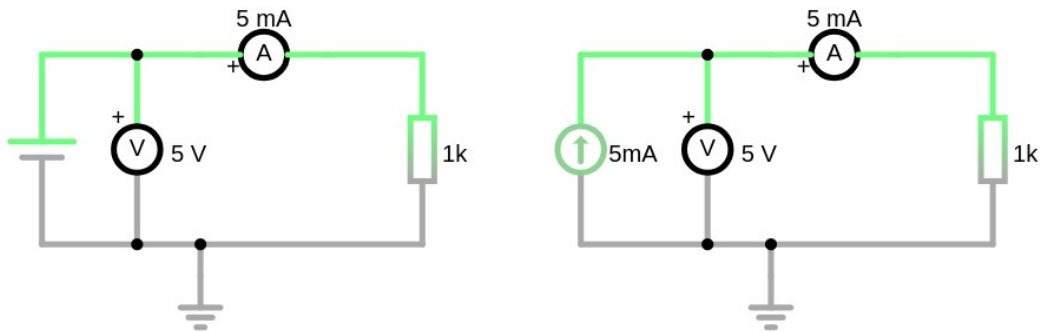
Jako simulátor je zde použit [Falstad Circuit Simulator](#), jedná se o online simulátor, jehož hlavní výhoda je očividná – pro simulování obvodů není nutné stahovat žádný program, protože simulátor lze spustit ve webovém prohlížeči. Jeho určitá nevýhoda je míra nepřesnosti, nesimuluje totiž některé nechtěné (parazitní) jevy součástek, respektive jeho obecná jednoduchost. Stejně tak nepoužívá v některých případech úplně standardní značení součástek.

Odkazy pro jednotlivé simulace jsou zde zahrnuty v názvu obvodu.

U některých součástek byly změněny základní nastavení. Aby např. LED svítily již při malém proudu, je potřeba změnit parametr „Maximum Brightness Current“. Parametry součástek se dají změnit dvojklikem na konkrétní součástku.

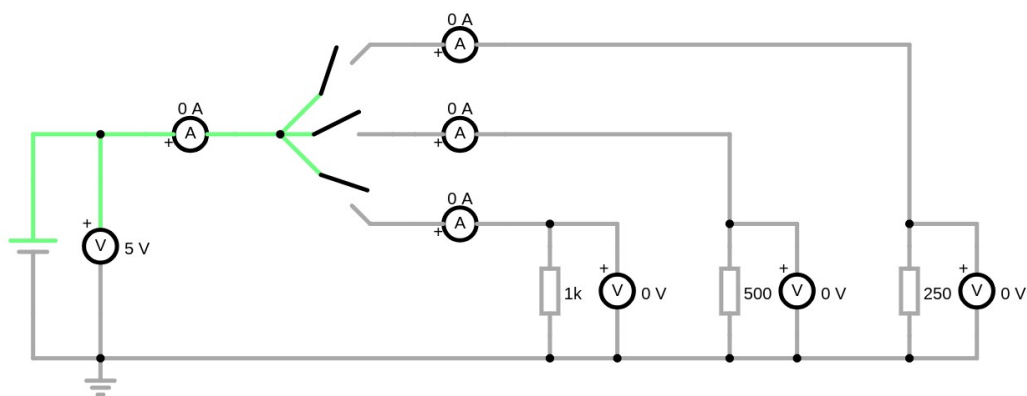
2. Rezistory, základní teorie

2.1 Ohmův zákon



- Zkuste změnit napětí, odpor, nebo proud.
- Voltmetr má zde nastavený nekonečný odpor, aby neovlivňoval obvod.
- Všimněte si, že: $I = \frac{U}{R}$, $U = I \cdot R$
- Rezistor je součástka, jejíž účel je klást odpor, který by měl být co nejvíce konstantní.
 - U reálného rezistoru je do nějaké míry závislý na teplotě.
 - Stejně tak se u reálného rezistoru na vysokých frekvencích projevují takzvané *parazitní vlastnosti*, které se modelují jako indukčnosti/kapacity (chování cívky/kondenzátoru).
- Rezistor je základní součástka, kterou najdeme prakticky ve všech zařízeních.

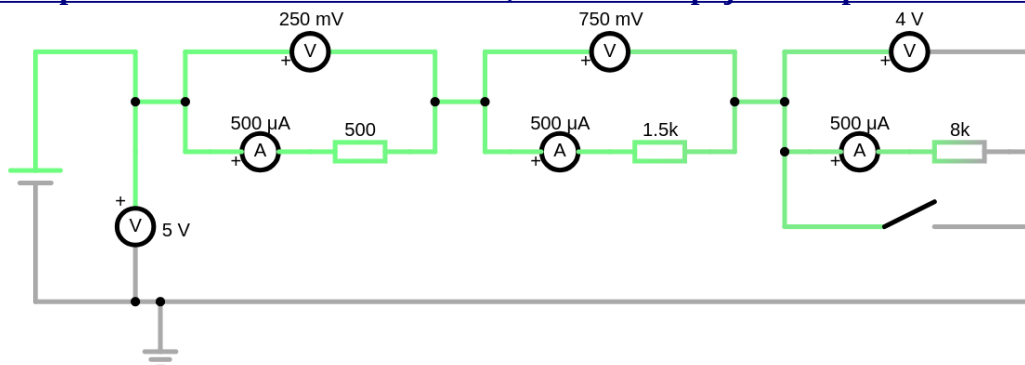
2.2 Ukázka platnosti 1. Kirchhoffova zákona a paralelního zapojení



- Součet proudů vtékajících do uzlu bude rovný součtu proudů vytékajících z uzlu.
 - $\sum I_{VTÉKAJÍCÍ} = \sum I_{VYTÉKAJÍCÍ} \rightarrow$ zde $I_{ZDROJ} = I_1 + I_2 + I_3$
 - Pokud by všechny proudy tekoucí do uzlu byly označeny stejným směrem (do uzlu, nebo z uzlu) a jejich skutečný směr by tedy určovalo znaménko, tak:

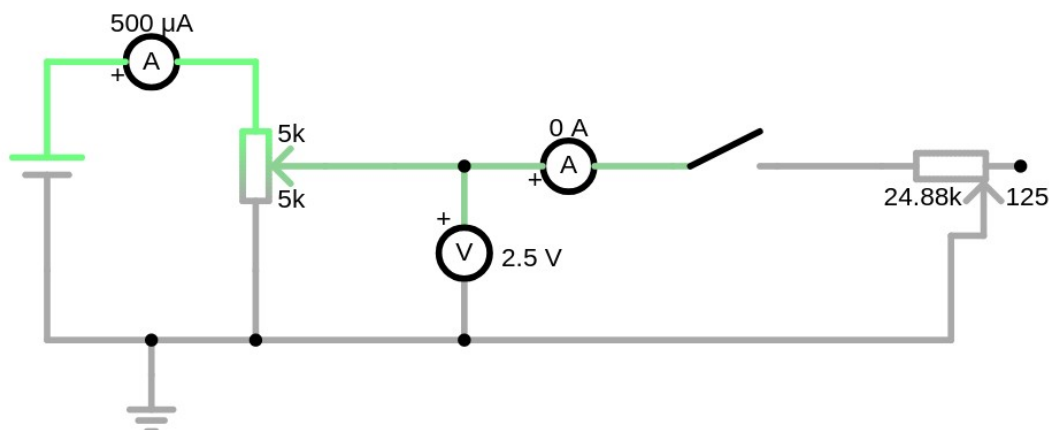
$$\sum I_x = 0$$
- Jednotlivé zátěže lze odpojit či připojit, je zde vidět i funkce paralelního řazení prvků (napětí na prvcích je stejné).

2.3 Ukázka platnosti 2. Kirchhoffova zákona, sériového zapojení a odporového děliče



- Napětí zdroje zde rozdělí mezi jednotlivé obvody (součet napětí po uzavřené smyčce je 0).
- Vypínačem lze zkratovat a vyřadit poslední obvod, vypínač zde má nekonečně-krát nižší odpor (nulový) než rezistor; proud poteče přes vypínač a napěťový úbytek bude nulový.
- Celkový odpor je při sériovém zapojení rovný součtu jednotlivých odporů.
- Odporový dělič: napětí zdroje se rozdělí mezi rezistory. Napětí na konkrétním rezistoru bude rovné poměru jeho odporu k celkovému odporu, to celé krát napětí zdroje.

2.4 Zatížený a nezatížený dělič napětí, potenciometr



- Zátěž se připojuje spínačem. Voltmetr zde má nekonečný odpor.
- Jako odporový dělič zde slouží potenciometr, chovající se jako dva odpory v sérii s nastavitelným poměrem a neměnnou celkovou hodnotou.
- Na části s vyšším odporem bude vyšší úbytek napětí. Respektive úbytek napětí bude záviset na odporu části, na které měříme, dle vzorce:

$$U_x = \frac{R_x}{R_{\text{CELKOVÝ}}}$$

- Toto platí pro nezatížený dělič. V případě, že se jedná o zatížený dělič, odpor, ke kterému je paralelně připojena zátěž, můžeme pro výpočet děliče nahradit ekvivalentním odporem pro paralelní kombinaci:

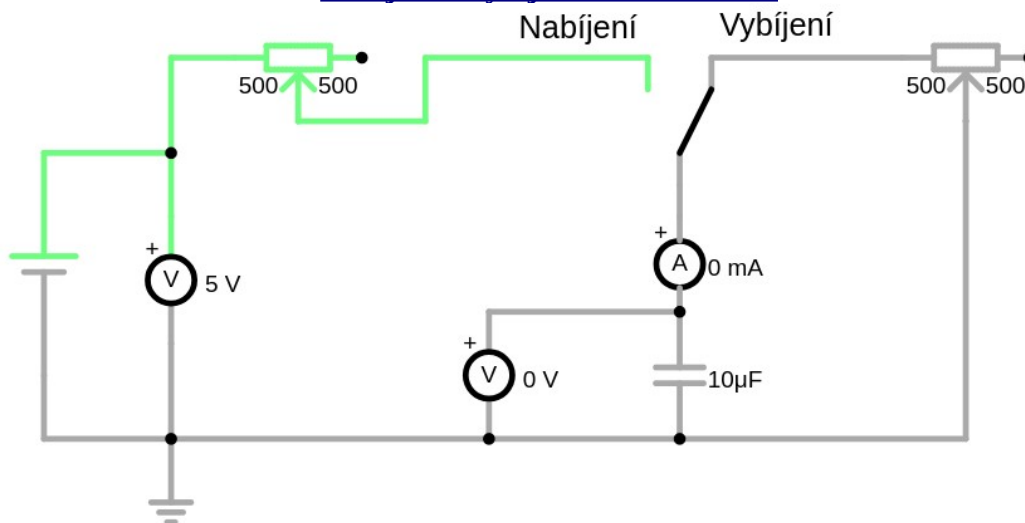
$$R_{x-\text{ZÁTĚŽ}} = \frac{R_x \cdot R_{\text{ZÁTĚŽ}}}{R_x + R_{\text{ZÁTĚŽ}}}$$

- Tímto se ale změní i celkový odpor.

- Jako zátěž je také použitý potenciometr zapojený jako nastavitelný rezistor. Při jeho připojení a při snižování jeho odporu bude docházet k poklesu napětí na výstupu děliče.

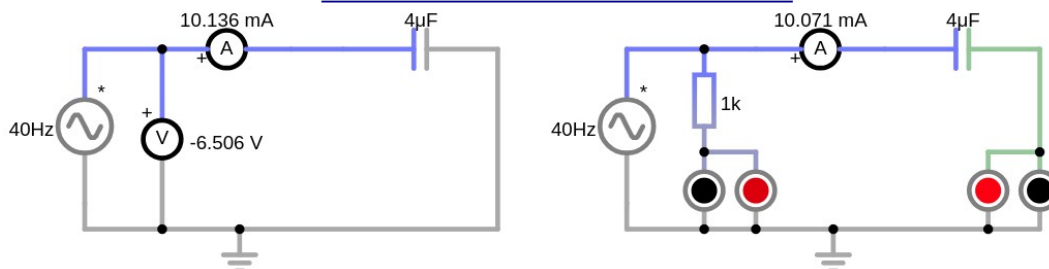
3. Kondenzátory a cívky

3.1 Nabíjení a vybíjení kondenzátoru



- Kondenzátor je součástka, která akumuluje náboj/energii pomocí elektrického pole.
- Přepínačem se zde volí, zda se bude kondenzátor nabíjet či vybíjet.
- Jako nabíjecí/vybíjecí rezistory jsou použity potenciometry, aby bylo možné nastavit hodnotu odporu. Doba, než se přechodový děj (nabíjení/vybíjení) dokončí na 95 % bude cca $3 \cdot \tau$, kdy časová konstanta $\tau = R \cdot C$.
- V případě vybíjení si všimněte opačného znaménka u proudu (proud teče „z kondenzátoru“, ne „do kondenzátoru“).
- Časová škála/rychlost simulace neodpovídá realitě, čas v simulaci je zobrazen vpravo dole.
- Pokud by kondenzátor nebyl nikam připojený, tak se (v případě ideálního kondenzátoru) nestane nic, napětí na něm zůstane stejné. Reálný kondenzátor se pomalu vybije kvůli jeho svodu.

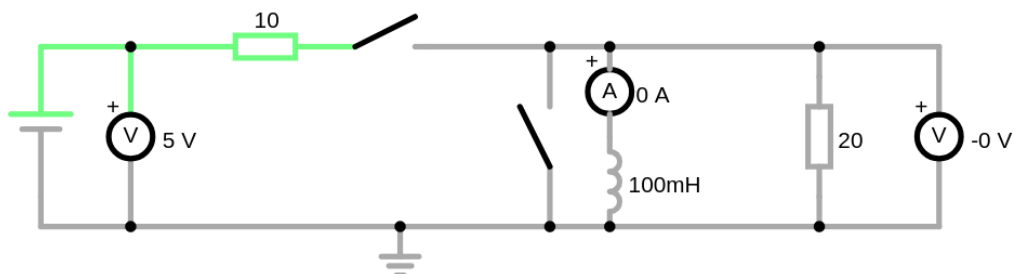
3.2 Kondenzátor ve střídavém obvodu



- V levé části je vidět kondenzátor zapojený do střídavého obvodu, napájeného signálem se sinusovým průběhem. Kondenzátor se zde cyklicky nabíjí a vybíjí.
 - Amplituda sinusového zdroje je zde 12 V, frekvence 40 Hz.
 - Proud bude záležet na reaktanci kondenzátoru: $X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \approx 995 \Omega \rightarrow I = \frac{U}{X_C} \approx 12 \text{ mA}$
- Proud je fázově (a ve výsledku i časově) posunutý oproti napětí, předbíhá o 90° ($\frac{1}{4}$ periody).
 - Proud je nejvyšší v momentu, kdy napětí prochází nulou, protože proud kondenzátorem odpovídá strmosti změny napětí, což je u sinusového průběhu bez ss. složky při průchodu nulou.

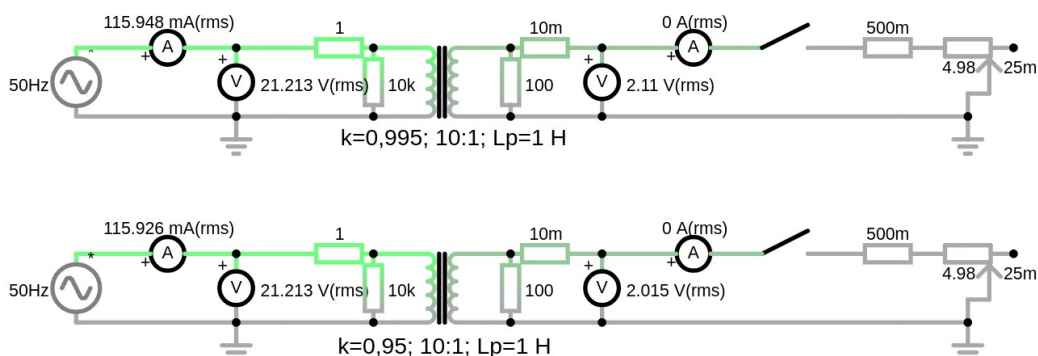
- V pravé části jsou antiparalelně (paralelně, ale s opačnou polaritou – aby svítily v obou polaritách, i když LED vedou jen jedním směrem) zapojené LED napájené nejprve přes rezistor, potom přes kondenzátor. Je vidět předběh proudu oproti napětí.
 - Kvůli nelinearitě LED bude průběh proudu skrz LED zkreslený.
 - Symbol LED se objeví až po přesunutí kurzoru nad LED.
- Rychlost simulace se liší od reality.

3.3 Cívka (induktor) v obvodu



- Cívka je součástka, která je schopná akumulovat energii pomocí magnetického pole.
- Prvním spínačem se připojí zdroj k induktoru skrz 10-ohmový rezistor.
- Pokud je první spínač sepnutý, proud bude růst, zatímco napětí na cívce bude klesat. Je zde vidět, že induktor zpomaluje změny proudu – čím rychlejší má být změna proudu, tím vyšší na něm bude úbytek.
 - $\Delta I = \frac{\Delta t \cdot U_L}{L}$, respektive exaktněji: $\frac{di(t)}{dt} = \frac{u_L}{L}$
- Pokud je druhý spínač sepnutý, proud induktorem zůstává stejný (viz vzorec výše), protože je na induktoru nulové napětí. Toto v praxi neplatí, protože bude mít induktor nějaký sériový odpor a sám se tedy bude „vybíjet“.
- Pokud je první spínač sepnutý a druhý vypnutý, a vypneme první spínač, polarita napětí na induktoru se obrátí – induktor se stále „snaží držet proud stejným směrem“ a uvolní svou energii do zátěže. Protože se stane v tomto případě zdrojem, ale směr proudu zůstane stejný, dojde k obrácení polarity.
- Při vyšší indukčnosti (zkuste změnit) cívka naakumuluje více energie při stejném proudu.

3.4 Transformátor



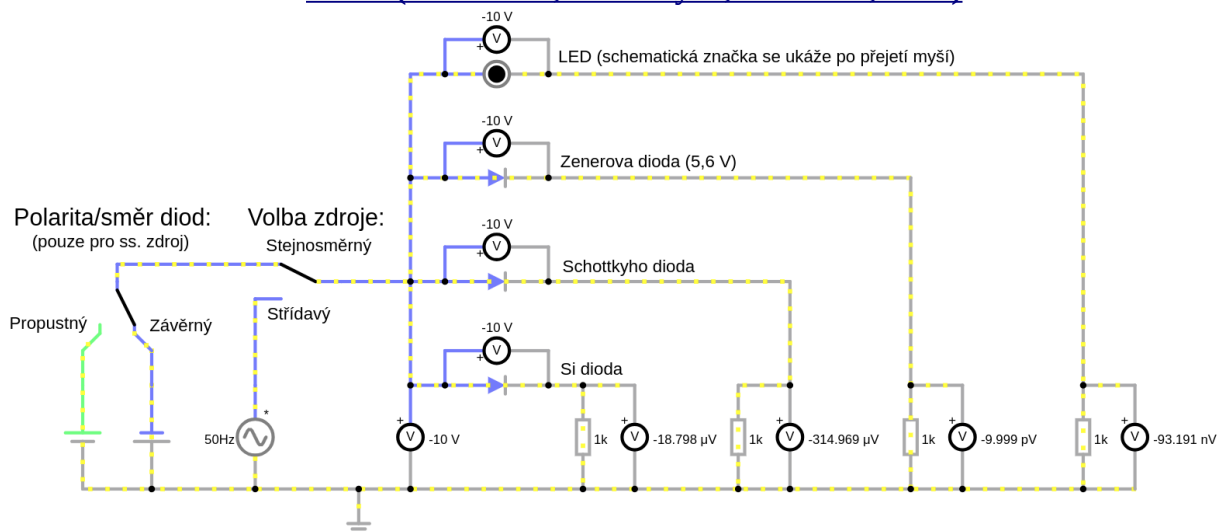
- Transformátor se skládá ze dvou či více cívek (vinutí). Na jednu z cívek (typicky označovanou jako primární vinutí) se přivede střídavé napětí, díky kterému poteče cívkou střídavý proud, který vyvolá v jádře transformátoru střídavé magnetické pole. Další z cívek bude mít díky elektromagnetické indukci na výstupu střídavé napětí, které by u ideálního

transformátoru odpovídalo vstupnímu napětí násobenému poměrem závitů sekundární cívky a primární cívky. Zde má transformátor poměr závitů sekundární a primární cívky 1:10.

- Transformátor ovšem není ideální. Rezistory přidané do obvodu z části simulují neidealitu (ztráty) transformátoru. Ani magnetická vazba mezi cívkami není dokonalá, transformátor v horní části obvodu má nastaven vazební koeficient $k=0,995$, druhý transformátor má nastaven vazební koeficient 0,95 (ideální hodnota je 1). Indukčnost primární cívky je nastavena na 1 H, vstupní napětí na amplitudu 30 V (ef. hodnotu 21,2 V) a frekvenci 50 Hz.
- Zátěž sekundární strany je tvořena potenciometrem v režimu reostatu a rezistorem.
- Měřicí přístroje zde ukazují efektivní hodnotu, protože je zde směřodatnější.
- Všimněte si, že:
 - Transformátor odebírá nějaký proud, i když je odpojená zátěž. Toto je takzvaný magnetizační proud, který závisí na indukčnosti (čím vyšší, tím bude proud nižší) i na ztrátách transformátoru.
 - Výstupní napětí transformátoru klesá při připojení zátěže, respektive při snižování odporu zátěže. Transformátor nemá kvůli neidealitám dokonalý výstup.
 - Transformátor s horším vazebním koeficientem (horší magnetickou vazbou mezi cívkami) má nižší napětí naprázdno, a toto napětí dále klesá se zátěží. Jev, který za toto může, je rozptylová indukčnost.
 - Poměr proudů je opačný jako poměr napětí, ale součin výstupního napětí a proudu je nižší než součin vstupního napětí a proudu (kvůli ztrátám).

4. Základní polovodičové součástky

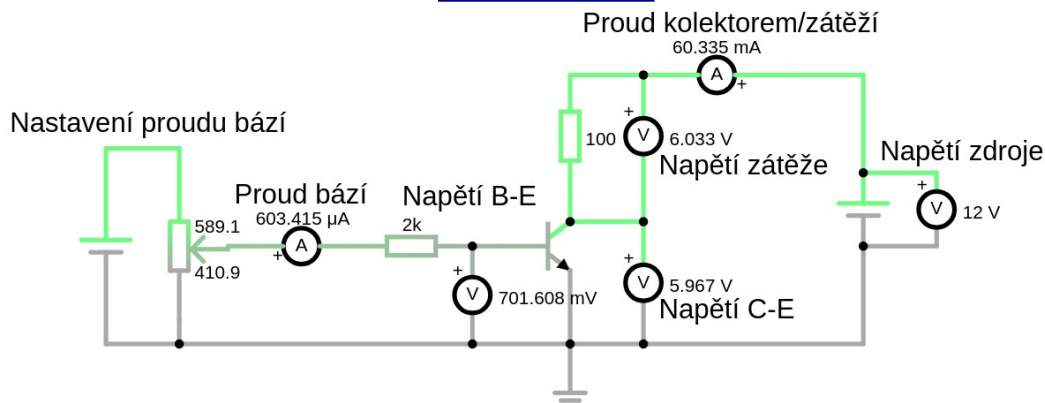
4.1 Dioda (křemíková, Schottkyho, Zenerova, LED)



- Dioda je součástka, která vede dobře jen jedním směrem, použitelná k usměrňování napětí.
- V propustném směru má dioda nějaký úbytek napětí, který mírně závisí na proudu. Závislost je mnohem menší než u rezistoru a občas lze toto napětí považovat za téměř konstantní.
- Prvním přepínačem se volí polarita stejnosměrného napájení, druhým přepínačem se volí stejnosměrné či střídavé napájení obvodu.
- Ze zdroje teče skrz diodu proud do zátěže. Jsou zde 4 různé typy diod:
 - LED: Napěťový úbytek je vysoký (cca 1,5-2 V pro červenou LED), část energie se mění na světlo.
 - Zenerova dioda: vede v závěrném směru od určitého napětí.

- Schottkyho dioda: má nižší úbytek (cca 0,3-0,5 V při malém proudu), ale i vyšší svod (proud v závěrném směru).
- Běžná křemíková dioda: má úbytek cca 0,6-0,7 V při malém proudu a pokojové teplotě (při vyšším proudu je tento úbytek vyšší).
- Simulátor nemodeluje parazitní kapacitu ani závislost svodu na napětí.

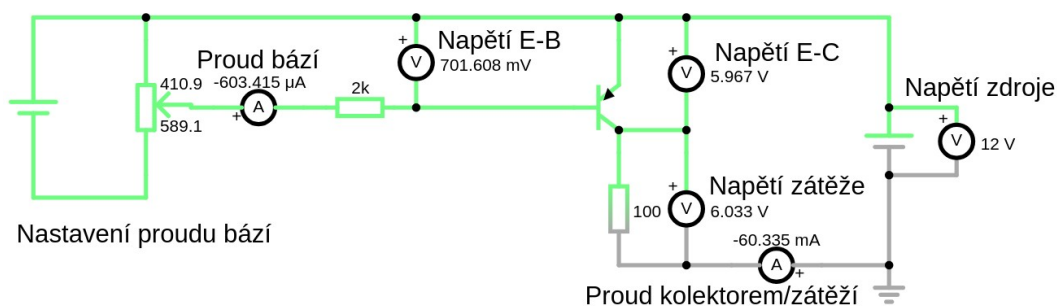
3.2 Tranzistor NPN



- Tranzistory jsou součástky schopné zesilovat proud i napětí. Tranzistory NPN/PNP jsou tzv. „bipolární tranzistory“, jsou řízené proudem.
- Potenciometrem vlevo se nastavuje napětí před bázevým odporem. Tímto se nepřímo nastavuje i proud báze.
 - Budeme-li uvažovat, že úbytek B-E přechodu je 0,7 V, poté:

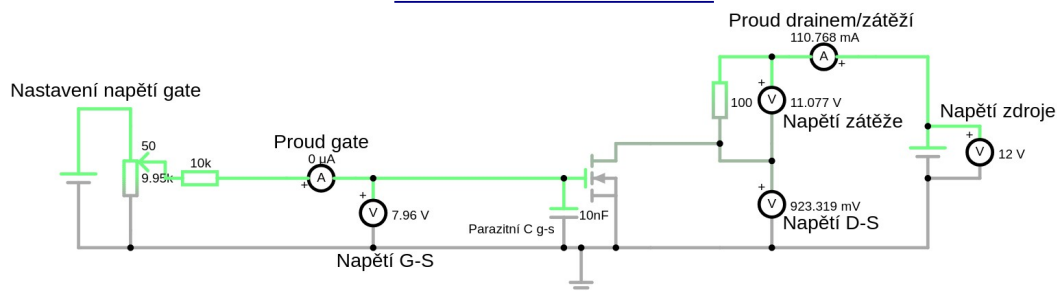
$$I_B \approx \frac{U_x - 0,7}{R_B}$$
 - V praxi tento úbytek mírně závisí na proudu báze i kolektorem.
- Proud kolektorem je zde β -krát vyšší než proud báze, zesilovací činitel β je zde 100. Lze tedy jednoduše říci, že $I_C = \beta \cdot I_B$.
 - V praxi má často velký možný rozsah hodnot. U některých tranzistorů může tento rozsah být i řádově 10:1.
 - Také je závislý na napětí, teplotě a proudu.
 - Toto platí ale pouze za určitých předpokladů. Aby tranzistor zesiloval, musí mezi C-E být dostatečné napětí, jinak bude, bude tranzistor saturovaný („sepnutý“, s malým úbytkem), proud bude omezený kolektorovým odporem.

3.3 Tranzistor PNP



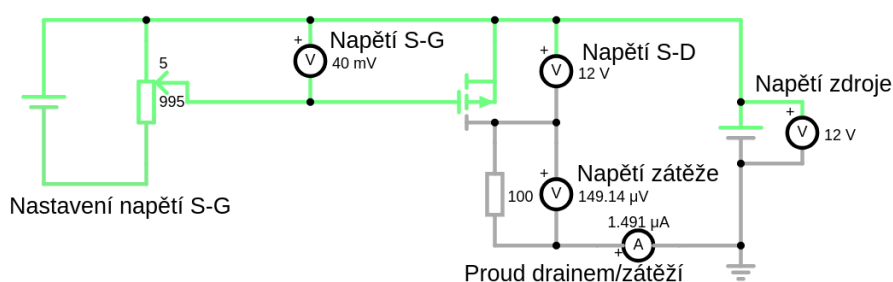
- Obvod je velice podobný jako obvod s NPN tranzistorem, všimněte si ale obrácených polarit napětí i proudů v obvodu.

3.4 Tranzistor N-MOSFET



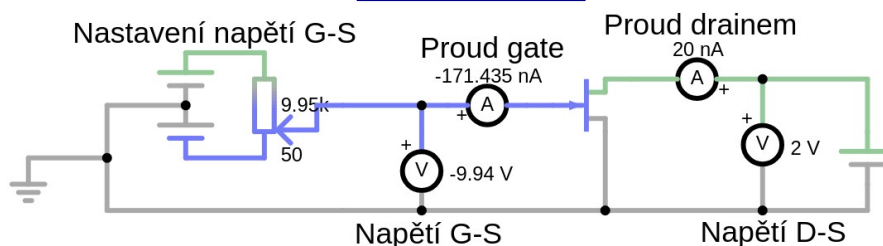
- Tranzistory MOSFET patří mezi tzv. unipolární tranzistory.
- MOSFET je řízený napětím – gate je potřeba pro řízení MOSFETu nabít/vybit na určité napětí, které ovlivňuje jeho odpor, respektive proud skrz D-S (dle toho, v které části charakteristiky jsme). Po tomto nabití již neteče do gate téměř žádný proud, až na nějaký nepatrný svod.
- Základní model MOSFETu v tomto simulátoru nemá zahrnutý parazitní kapacity, proto je zde přidána parazitní kapacita externě, alespoň mezi gate a source.
- Jedná se o typ s indukovaným kanálem („enhancement mode“, tzn. otevíraný kladným napětím G-S v případě N-MOSFETu). Typ se zabudovaným kanálem, který se používá méně, se naopak vypíná záporným napětím G-S a v klidu je sepnutý, v tomto je trochu podobný JFETu.

3.5 Tranzistor P-MOSFET



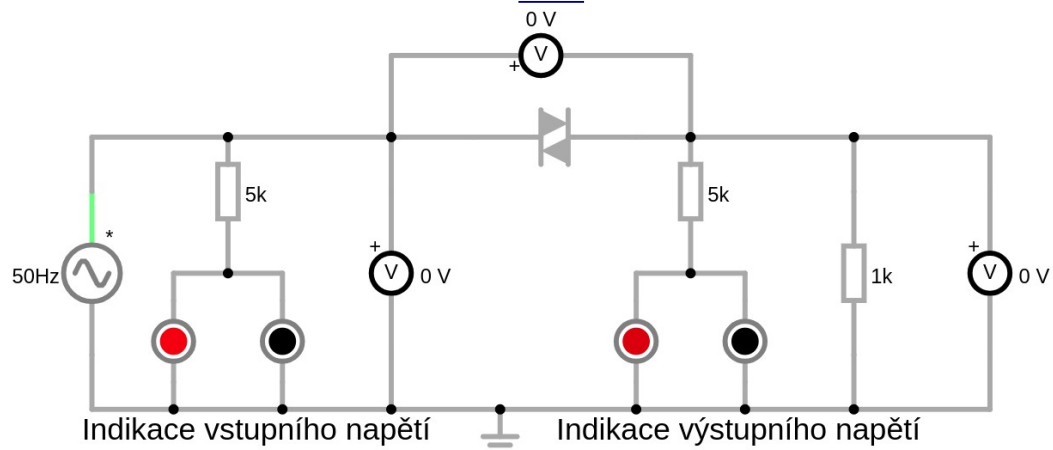
- Tato simulace je trochu zjednodušená, nezahrnuje parazitní kapacitu gate.
- Oproti obvodu s N-MOSFETem jsou převrácené polarity.

3.6 Tranzistor JFET



- Tranzistor JFET je opět řízený napětím na gate, ale při nulovém napětí G-S propouští proud mezi drainem a sourcem.
- Písmeno „J“ v názvu znamená „junction“ (přechod). Mezi G-S a G-D je PN přechod, který lze otevřít kladným napětím mezi G-S (v případě N-JFETu). Tímto se liší od MOSFETu.
 - V případě kladného napětí mezi G-S se tento přechod otevře.
- V simulaci je zahrnut pouze N-JFET. Obvod s P-JFETem bude mít opět převrácené polarity. Nejsou zde zahrnuty parazitní kapacity, je zde ale vidět nějaký nepatrný svod gate (nA).

3.9 Diak



- Diak je součástka se dvěma vývody, která vykazuje tzv. *negativní diferenciální odpor*. Při určitém napětí začne téct podstatný proud, diak se sepne (prudce klesne jeho napěťový úbytek a zůstane sepnutý až do momentu, kdy proud klesne pod určitou udržovací hodnotu.
- V tomto případě je obvod napájen střídavým napětím. Diak se při zvyšujícím napětí sepne a při poklesu vstupního napětí opět vypne. Toto je vidět na indikaci vpravo.