



Středoškolská technika 2025

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Vytvoření přípravků pro měření tranzistorů

Viktor Pitula

Střední škola elektrotechnická Lipník nad Bečvou, Tyršova 781

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 12: Tvorba učebních pomůcek, didaktická technologie

Vytvoření přípravku pro měření tranzistorů

Viktor Pitula

Olomoucký kraj

Lipník nad Bečvou 2025

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 12: Tvorba učebních pomůcek, didaktická technologie

Vytvoření přípravku pro měření tranzistorů

The creation of a device to measure transistors

Autor:	Viktor Pitula
Škola:	Střední škola elektrotechnická, Tyršova 781 751 31, Lipník nad Bečvou
Kraj:	Olomoucký
Konzultant:	Ing. Lukáš Koziel

Lipník nad Bečvou 2025

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze práce jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Lipníku n. B. dne: 31. 3. 2025

Viktor Pitula

Poděkování

Děkuji vedoucímu soutěžní práce SOČ, panu Ing. Lukáši Kozielovi, za pomoc a rady při zpracování práce.

Anotace

Práce se zabývá tvorbou přípravku pro měření statických a dynamických charakteristik tranzistoru. Obsahuje popis základních parametrů a vlastností všech druhů tranzistorů. Realizace měřicích úloh a výroba přípravku, který se vytvářel v programu FreeCAD, byla zdokumentována a naměřené hodnoty okomentované.

Klíčová slova

Bipolární; unipolární; deska plošných spojů; báze; emitor; kolektor; drain; source; gate.

Annotation

The work focuses on the development of a device for measuring the ststic and dynamic characteristics of a transistor. It includes a description of the basic parameters and properties of all types of transistors. The implementation of measurement tasks and the production of the device, which was designed in FreeCAD, have been documented, and the measured values have been analyzed.

Keywords

Bipolar; unipolar; printed circuit board; base; emitter; collector; drain; source; gate.

Obsah

Úvod.....	6
1 Tranzistory	7
1.1 Základní charakteristika	7
1.2 Rozdělení.....	7
1.3 Bipolární tranzistor.....	7
1.3.1 Základní parametry a vlastností bipolárních tranzistorů.....	8
1.3.2 Základní zapojení bipolárních tranzistorů	11
1.3.3 Statický a dynamický zesilovací činitel.....	13
1.3.4 Měření bipolárních tranzistorů.....	13
1.4 Unipolární tranzistor	17
1.4.1 Princip činnosti unipolárních tranzistorů	18
1.4.2 Základní zapojení unipolárních tranzistorů	20
1.4.3 Měření unipolárních tranzistorů.....	21
2 Návrh a realizace přípravku	24
2.1 Výběr BJT	24
2.2 Výběr unipolárního tranzistoru	24
2.3 Vytvoření DPS	25
2.4 Vytvoření krabičky.....	25
2.5 Měření statických charakteristik BJT.....	27
2.6 Příprava tabulek pro měření	28
2.7 Vynesení naměřených hodnot do grafů.....	29
2.8 Měření statických charakteristik unipolárního tranzistoru.....	29
2.9 Měření zesílení Darlingtonova zapojení	30
Závěr	31
3 Použitá literatura	32
4 Seznam obrázků a tabulek	33
4.1 Seznam obrázků	33
4.2 Seznam tabulek	33

Úvod

Tranzistory patří mezi základní elektronické součástky, které mají široké využití v analogové i digitální technice. Používají se v zesilovačích, spínačích a dalších elektronických obvodech, kde plní klíčovou úlohu při řízení proudu. Pro správnou funkci a diagnostiku tranzistorů je nezbytné provádět jejich měření, které umožňuje stanovit důležité charakteristiky, jako jsou proudové zesílení, výstupní a převodní charakteristiky.

Cílem této práce je návrh a realizace měřicího přípravku, který umožní analyzovat základní parametry bipolárních a unipolárních tranzistorů. Přípravek bude sloužit k testování těchto součástek, což je užitečné nejen pro výukové účely, ale také pro praktické aplikace při konstrukci a opravách elektronických zařízení.

Práce je rozdělena do několika částí. Nejprve je v teoretické části popsán princip fungování tranzistorů, jejich typy a metody měření. Následuje praktická část, ve které je popsán návrh a výroba desky plošných spojů pro měřicí přípravek. Po sestavení zařízení byla provedena měření, při nichž byly zjištěny výstupní a převodní charakteristiky tranzistorů a také zesílení Darlingtonova zapojení.

1 TRANZISTORY

1.1 Základní charakteristika

Tranzistor je aktivní polovodičová, nelineární součástka, která je tvořená třemi elektrodami a dvěma přechody. Používá se jako zesilovače, spínače a invertory. Jsou základem všech dnešních integrovaných obvodů, jako např. procesorů, pamětí.

Princip činnosti spočívá v tom, že malé změny napětí a proudu na vstupu vyvolávají velké změny napětí a proudu na výstupu. Podle principu činnosti se rozlišují tranzistory bipolární, unipolární a IGBT. Polovodičové přechody tranzistoru vytvářejí strukturu odpovídající spojení dvou diod v jedné součástce, většinu vlastností tranzistoru však dvojicí diod nahradit nelze. Každý tranzistor má 3 elektrody, které se u bipolárních tranzistorů označují jako kolektor (C), báze (B) a emitor (E), u unipolárních – drain (D), gate (G) a source (S) a nakonec u IGBT tranzistorů – gate (G), emitor (E) a kolektor (C).

1.2 Rozdělení

Základní dělení tranzistorů z hlediska jejich vnitřní struktury:

- **Bipolární tranzistor** – aktivní polovodičové součástky se dvěma PN přechody. Velikost procházejícího proudu je určována proudem báze.
- **Unipolární tranzistor** – aktivní polovodičová součástka řízená elektrickým polem. Velikost procházejícího proudu je určována napětím na řídící elektrodě.
- **IGBT tranzistor** – kombinace bipolárního a unipolárního tranzistorů. Používá se ve výkonové elektronice.

Tranzistory se dále dělí podle použití. Dělí se na zesilovací a spínací, podle kmitočtových vlastností pak na nízkofrekvenční, vysokofrekvenční a mikrovlnné, a podle výkonu na nízko výkonové, výkonové a vysokovýkonové.

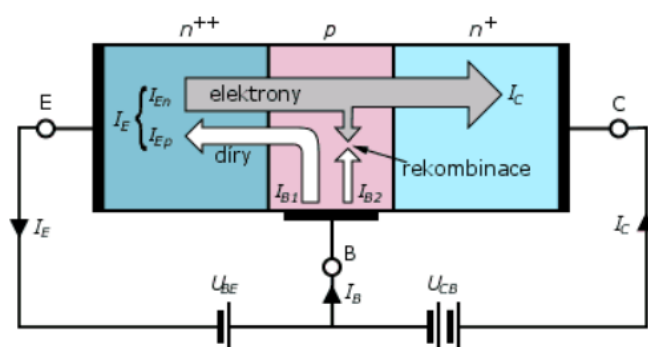
1.3 Bipolární tranzistor

Bipolární tranzistor je elektronická součástka tvořená třemi oblastmi polovodiče s různým typem vodivosti v uspořádání NPN nebo PNP, které vytvářejí dvojici přechodů PN, a jsou oddělené velmi tenkou vrstvou polovodiče, liší se pouze v ohledu na polaritu napájecího napětí a směru proudů. Je nazýván bipolární, protože se v jeho funkci účastní nosiče náboje obou polarit.

Funkce BJT je založena na vzájemném působení dvou přechodu PN. Při této polarizaci napětí dochází k silné injekci elektronů z emitorové oblasti N do oblasti báze P. Elektrony se difúzním pohybem přibližují ke kolektorové oblasti N, a protože

tato oblast je k emitorové oblasti velmi blízko, způsobí silné elektrické pole ochuzené vrstvy kolektorového přechodu, že elektrony přejdou do kolektorové oblasti N. Pouze malá část elektronů v oblasti báze rekombinuje. Vlivem kolektorového přechodu je tak proud ze smyčky B-E přemístěn do smyčky C-E. Malým proudem báze je řízen velký proud kolektoru.

S velikostí U_{BE} vzrůstá proud elektronů, které procházejí z emitoru do oblasti kolektoru. Závislost kolektorového proudu na napětí U_{BE} je nazývána tranzistorový jev. Ten se projevuje pouze při dostatečné blízkosti emitorového a kolektorového přechodu. Při zvětšení jejich vzdáleností tranzistorový jev zanikne.



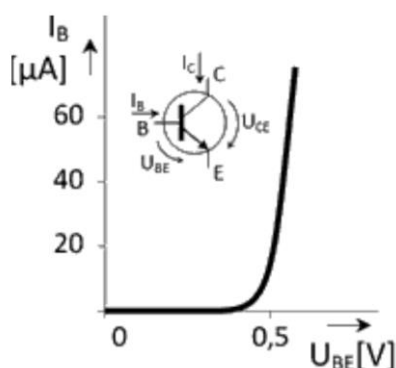
Obr. 2.1: Schéma bipolárního tranzistoru (NPN).

1.3.1 Základní parametry a vlastností bipolárních tranzistorů

Bipolární tranzistor se nejběžněji využívá ve dvou hlavních oblastech – jako jsou zesilovače nebo spínače. Jeho zesilovací vlastností jsou využívány například v zesilovačích, zatímco v roli spínače se často používá ve spínaných napájecích zdrojích. Chování bipolárního tranzistoru je popsáno statickými charakteristikami, které vyjadřují vztahy mezi různými veličinami charakterizujícími tranzistor v režimu dvojbran. Nejčastěji se využívají následující závislosti:

Vstupní charakteristika – udává závislost bázevého proudu na napětí mezi bází a emitorem. Udává se pro určité napětí mezi kolektorem a emitorem. Jejich tvar odpovídá voltampérové charakteristice diody, neboť měříme napětí a proud v jednom PN přechodu.

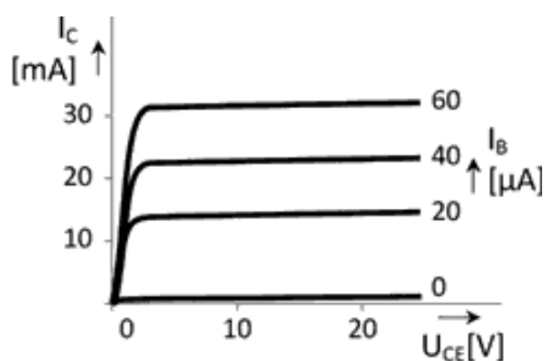
$$h_{11} = \frac{U_{BE}}{I_B}$$



Obr. 2.2: Vstupní charakteristika bipolárního tranzistoru.

Výstupní charakteristika – udává závislost kolektorového proudu na napětí mezi kolektorem a emitorem, a to při konstantním proudu báze. S rostoucím proudem báze roste maximální dosažitelný kolektorový proud, protože proud báze ovlivňuje odpor celého tranzistoru.

$$h_{22} = \frac{I_C}{U_{CE}}$$

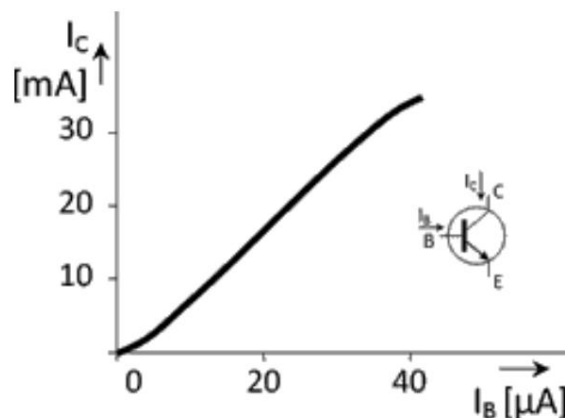


Obr. 2.3: Výstupní charakteristika bipolárního tranzistoru.

Převodní charakteristika – udává závislost kolektorového proudu na proudu báze. Udává se pro určité napětí mezi kolektorem a emitorem. Pomocí této charakteristiky můžeme určit zesilovací činitel.

Proudový zesilovací činitel je definován jako poměr změny kolektorového proudu ke změně bázevého proudu při výstupu nakrátko, tedy při nulové změně napětí.

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



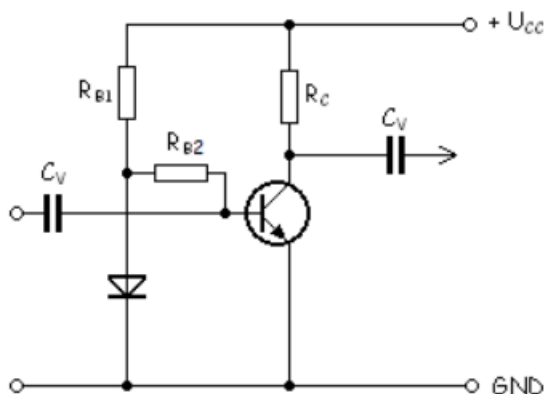
Obr. 2.4: Převodní charakteristika bipolárního tranzistoru.

Zpětné charakteristiky – udávají závislost napětí mezi bází a emitorem na napětí mezi kolektorem a emitorem, a to při určitém bázevém proudu. Popisují tedy zpětný přenos napětí z výstupu na vstup.

$$h_{12} = \frac{U_B}{U_{CE}}$$

Vliv teploty na vlastností tranzistoru

Vlastností polovodičů, a tedy i tranzistorů, je závislost jejich parametrů na teplotě. Elektronky tuto vlastnost nemají, mají žhavenou katodu a pracují při vysoké teplotě. Výstupní charakteristiky tranzistorů se při zvýšení teploty posouvají nahoru, proud I_C je vyšší. Navíc se tranzistor sám zahřívá při průchodu proudu. Bez stabilizace by mohla vzniknout teplotní vazba I_C , která by vedla k postupnému zničení tranzistoru. Při teplotní stabilizaci využívající teplotně závislou součástku (termistor, dioda) je nutné, aby byla tato součástka tepelně propojena s tranzistorem, aby se změny teploty tranzistoru přenesly i na stabilizační součástku.

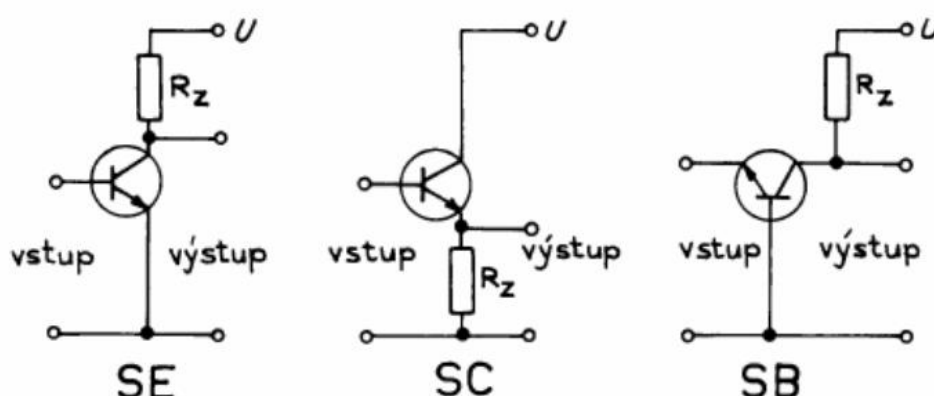


Obr. 2.5: Teplotní stabilizace pomocí diody.

Využitím polovodičové diody lze dosáhnout lepší shody tepelné charakteristiky. Zahřátá dioda zvýší svou vodivost a zmenší úbytek napětí.

1.3.2 Základní zapojení bipolárních tranzistorů

Aby tranzistor mohl pracovat jako dvojbran, musí být jeden z jeho tří vývodů společný pro vstupní i výstupní bránu. Způsob zapojení nemá vliv na vnitřní činnost tranzistoru, ale projevuje se různými vlastnostmi z hlediska vstupu a výstupu, jako je vstupní a výstupní impedance, fázový posuv výstupního signálu vůči vstupnímu, velikostí zesílení vstupního signálu.



Obr. 2.6: Zapojení tranzistoru NPN a) se společným emitorem, b) se společným kolektorem, c) se společnou bází.

Základní zapojení tranzistoru mají názvy podle toho, která elektroda je společná:

- **Zapojení se společnou bází (SB)** – napětěvé zesílení je velké (jako u zapojení SE), výstupní signál je ale ve fázi se vstupním. Proudové zesílení je vždy menší než jedna. Vstupní odpor je malý (jednotky až desítky ohmů), výstupní odpor je velký (stovky $k\Omega$ až jednotky $M\Omega$). Zapojení se používá k snímání signálů zdrojů s malým vnitřním odporem (antény, termočlánky).
- **Zapojení se společným emitorem (SE)** – výkonové zesílení je největší ze všech sledovaných zapojení, ale je velmi závislé na parametru h_{21} . Napětěvé zesílení se pohybuje ve stovkách, ale zapojení otáčí fázi napětí mezi vstupním a výstupním signálem o 180° . Proudové zesílení je rovněž velké, výstupní proud je ve fázi se vstupním. Vstupní odpor je řádově jednotky $k\Omega$, výstupní odpor je desítky $k\Omega$.
- **Zapojení se společným kolektorem (SC)** – napětěvé zesílení je vždy menší než jedna, výstupní napětí je ve fázi s napětím vstupním. Proudové zesílení je velké, výstupní proud je v protifázi oproti vstupnímu. Vstupní odpor je velký (o několik řádů větší, než u zapojení SE), výstupní odpor je malý. Zapojení se používá buď k snímání signálu ze zdroje s velkým vnitřním odporem (např. krystalové přenosky), nebo k přizpůsobení výstupu zesilovače na malý zatěžovací odpor (např. na koaxiální kabel).

Tab.2.1: Porovnání vlastností zapojení SE, SC, SB.

Druh zapojení	SE	SC	SB
Tranzistor PNP			
Tranzistor NPN			
Zesílení proudové napěťové výkonové	10 až 200 10 až 100 100 až 2000	10 až 200 0,9 až 0,99 10 až 200	0,9 až 0,995 10 až 100 10 až 100
Impedance vstupní výstupní	10 Ω až 1 kΩ 10 kΩ až 100 kΩ	10 kΩ až 100 kΩ 100 Ω až 1 kΩ	10 Ω až 100 Ω 100 kΩ až 1 MΩ
Fázový posun mezi vstupním a výstupním napětím - proudem	180° 0°	0° 180°	0° 0°
Výhody	nejlepší přizpůsobení velké zesílení	vhodný jako měnič impedance	nejvyšší f_{mez} vhodný jako měnič impedance

Jedněmi z nejdůležitějších provozních parametrů bipolárních tranzistorů jsou proudové zesilovací činitele. Ty jsou závislé na nastaveném pracovním bodu. Proudový zesilovací činitel α využíváme u zapojení SB, proudový zesilovací činitel β u zapojení SE a SC.

V zapojení se společnouází je vstupním proudem proud emitoru I_E , výstupním proudem stejně jako v zapojení se společným kolektorem je kolektorový proud I_C . Pro toto zapojení je používán zesilovací činitel.

Statický zesilovací činitel:

$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \mid U_{CE} = \text{konst.}$, protože $I_E = I_C + I_B$, je $I_C < I_E$, pak musí zesilovací činitel být menší než 1.

Proudový zesilovací činitel – u zapojení tranzistoru se společným emitorem zjistíme velikost statického zesilovacího činitele β takovým způsobem, že nejprve nastavíme

proud I_B a napětí U_{CE} . Pomocí těchto dvou veličin můžeme nastavit pracovní bod tranzistoru. Poté změříme proud kolektoru. Velikost proudového zesilovacího činitele β pro tento pracovní bod vypočteme ze vztahu:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \mid U_{CE} = \text{konst.}$$

1.3.3 Statický a dynamický zesilovací činitel

Zesilovací činitel může být, podobně jako odpor, statický nebo dynamický. Pro statický i dynamický zesilovací činitel je platný obdobný vztah. Dynamický zesilovací činitel určuje zesílení tranzistoru pro malý signál v okolí pracovního bodu tranzistoru, zatímco statický pracovní bod určuje zesílení pro klidové proudy protékající tranzistorem v klidovém pracovním bodu, když není přítomen signál.

Dynamický zesilovací činitel α , β určuje změnu velikosti kolektorového proudu ΔI_C v okolí pracovního bodu v závislosti na změně proudu ΔI_B . Dynamického zesilovacího činitele použijeme pro výpočet zesílení daného zapojení.

Statický zesilovací činitel α , β určuje, kolikrát je v nastaveném pracovním bodu větší proud kolektoru než proud báze, když není přítomen signál. Statický zesilovací činitel slouží k nastavení pracovního bodu tranzistoru.

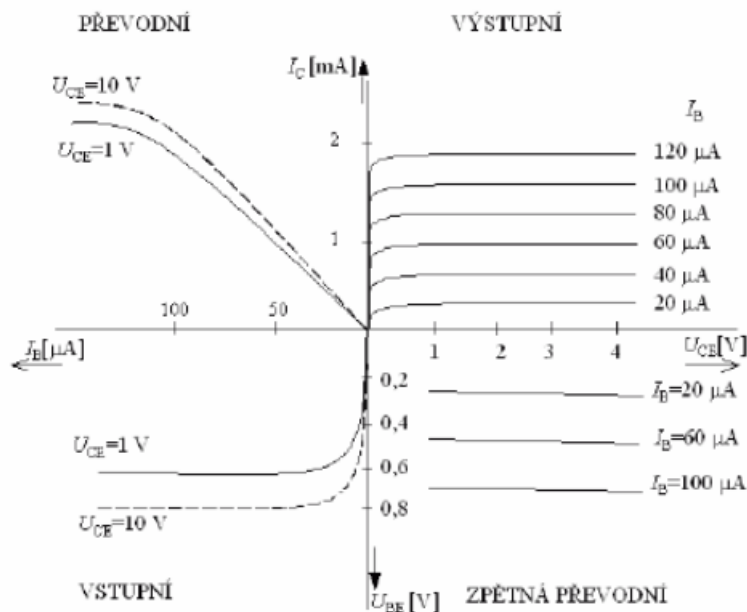
1.3.4 Měření bipolárních tranzistorů

Statické charakteristiky tranzistoru

Nejčastěji sledované vlastnosti bipolárních tranzistorů jsou takzvané statické charakteristiky, které popisují závislost proudů a napětí při určité hodnotě řídicí veličiny, označované jako parametr.

Jednotlivé kvadranty těchto charakteristik, které znázorňují specifické závislosti, jsou označeny následovně:

1. Výstupní charakteristika: $I_C = f(U_{CE})$, $I_B = \text{konst.}$
2. Proudová převodní charakteristika: $I_C = f(I_B)$, $U_{CE} = \text{konst.}$
3. Vstupní charakteristika: $I_B = f(U_{BE})$, $U_{CE} = \text{konst.}$
4. Zpětná napěťová převodní charakteristika: $U_{BE} = f(U_{CE})$, $I_B = \text{konst.}$



Obr. 2.7: Statické charakteristiky bipolárního tranzistoru, zapojení SE.

- **1 kvadrant**

V prvním kvadrantu jsou zakresleny výstupní charakteristiky, které vyjadřují závislost výstupního proudu I_C tranzistoru na výstupním napětí. Vyjadřují vztah:

$$I_C = \beta \cdot I_B + I_{CE0},$$

kde I_{CE0} je zbytkový proud.

Parametrem výstupních charakteristik se jedna ze vstupních veličin – v uvedeném příkladu vstupní proud I_B . Druhou vstupní veličinou je napětí U_{BE} , parametrem tedy mohlo být i vstupní napětí.

Z výstupních charakteristik můžeme určit statický výstupní odpor tranzistoru:

$$R_{VYS} = \frac{U_{CE}}{I_C}$$

- **2 kvadrant**

Ve druhém kvadrantu jsou znázorněny převodní charakteristiky. Převodní charakteristiky udávají závislost výstupního proudu I_C na vstupní veličině I_B nebo U_{CE} – v uvedeném příkladu na vstupním proudu I_B .

Z charakteristik můžeme odečíst statický proudový zesilovací činitel:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

- **3 kvadrant**

Průběhy ve třetím kvadrantu jsou V-A charakteristikami diody báze-emitor v propustném směru. Jsou ovlivňovány velikostí kolektorového napětí U_{CE} . Proto jsou měřeny při určitých hodnotách napětí U_{CE} , které je parametrem těchto charakteristik.

Ze vstupních charakteristik můžeme určit vstupní statický odpor jako poměr odpovídajícího vstupního napětí a vstupního proudu:

$$R_{vs} = \frac{U_{BE}}{I_B}$$

- **4 kvadrant**

Závislost znázorněné ve čtvrtém kvadrantu vyjadřují zpětný vliv výstupních parametrů tranzistoru na vstupní. Parametrem těchto charakteristik je stejná vstupní veličina jako u výstupních charakteristik.

Zatěžovací přímka

Pro konstrukci zatěžovací přímky využijeme výstupní charakteristiky tedy funkční závislosti $I_C = f(U_{CE})$ při proudu báze I_B rovno konstantě. Na napěťové ose vyneseme velikost napájecího napětí U_N . V bodě U_N začneme vynášet V-A charakteristiku rezistoru, charakteristiku kreslíme tak, že konečný bod V-A charakteristiky nám protne proudovou osu v bodě, který odpovídá velikosti proudu, který by rezistorem protékal, v případě že by tento rezistor byl připojen přímo na napájecí napětí. Potom bod, ve kterém dojde k protnutí obou charakteristik, odpovídá velikostí právě protékajícího proudu I_C .

Hybridní a admitanční parametry tranzistoru

Pokud prohlížíme na tranzistor jako na čtyřpól (dvojbran), můžeme jeho chování popsat pomocí čtyřpólových rovnic. Pro nízkofrekvenční oblast se používají takzvané hybridní parametry (h - parametry), zatímco pro vysokofrekvenční oblast jsou relativní admitanční parametry (y - parametry). Při aplikaci hybridních parametrů je vstup tranzistoru modelován podle Théveninovy věty a výstup je modelován podle Nortonovy věty.

Hybridní parametry

Tyto parametry jsou souborem parametrů, které se využívají při popisu tranzistoru v rámci malých signálů. Tento soubor parametrů je velmi užitečný pro analýzu a návrh analogových obvodů, jako jsou zesilovače. Hybridní parametry vycházejí z maticového zápisu, kde jsou vztahy mezi napětím a proudy v tranzistoru popsány pomocí čtyř základních parametrů:

1. Vstupní odpor tranzistoru při výstupu nakrátko:

$$h_{11} = \frac{U_1}{I_1} \mid U_2 = 0 \quad [\Omega]$$

2. Zpětný napěťový přenos při vstupu naprázdno:

$$h_{12} = \frac{U_1}{U_2} \mid I_1 = 0 \quad [-]$$

3. Proudový zesilovací činitel při výstupu nakrátko:

$$h_{21} = \frac{I_2}{I_1} \mid U_2 = 0 \quad [-]$$

4. Výstupní vodivost tranzistoru při vstupu naprázdno:

$$h_{22} = \frac{I_2}{U_2} \mid I_1 = 0 \quad [S]$$

Tyto vztahy platí pro stejnosměrné parametry, které slouží pro popis tranzistoru v určitém pracovním bodě není-li přiveden signál. Jedná se o vyjádření závislosti stejnosměrných napájecích napětí a proudů.

Střídavé parametry se vztahují ke střídavému signálu přivedenému na vstup daného zapojení tranzistoru. Přivedený signál musí mít tak malou úroveň, aby jeho další zmenšení nemohlo mít vliv na velikost změřeného parametru. Vztahy pro výpočty jsou podobné, pouze využívají střídavé veličiny a konstantní hodnoty na vstupech či výstupech.

1. Výstupní odpor, zátěž nakrátko:

$$h_{11} = \frac{u_1}{i_1} \mid U_2 = \text{konst.}, u_2 = 0 \quad [\Omega]$$

2. Zpětný napěťový činitel:

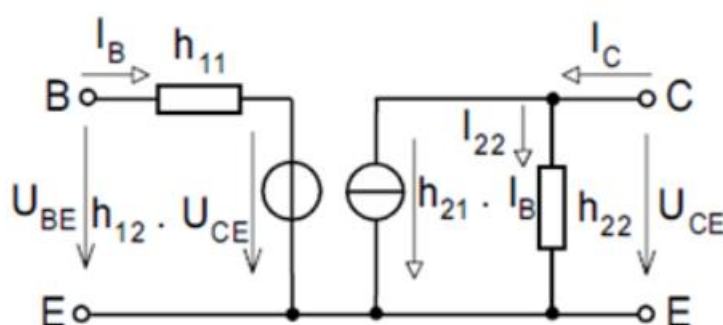
$$h_{12} = \frac{u_1}{u_2} \mid I_1 = \text{konst.}$$

3. Proudový zesilovací činitel, zátěž nakrátko:

$$h_{21} = \frac{i_2}{i_1} \mid U_2 = \text{konst.}, u_2 = 0$$

4. Výstupní vodivost:

$$h_{22} = \frac{i_2}{u_2} \mid I_1 = \text{konst.}, i_1 = 0 \quad [\text{S}]$$



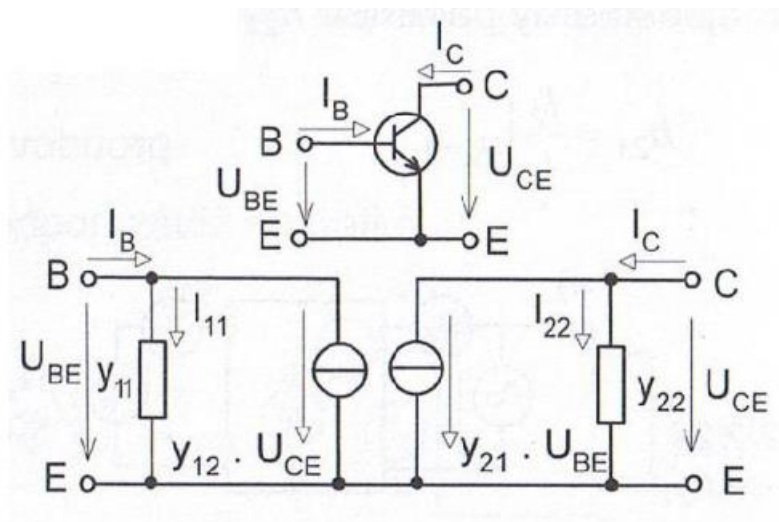
Obr. 2.8: Model bipolárního tranzistoru pomocí h-parametrů.

$$U_{BE} = h_{11} \cdot I_B + h_{12} \cdot U_{CE}$$

$$I_C = h_{21} \cdot I_B + h_{22} \cdot U_{CE}$$

Admitanční parametry

Admitanční parametry tranzistoru jsou dalším způsobem, jakým se tranzistory modelují, zejména v kontextu analýzy malých signálů. Tento model je velmi užitečný při analýze tranzistorových obvodů ve vysokofrekvenčním pásmu, kde je důležitá přesnost při popisu impedance a přenosu signálu. Admitanční parametry jsou převrácenými hodnotami impedancí. Při jejich použití je vstup a výstup tranzistoru modelován pomocí Nortonovy poučky.



Obr. 2.9: Model bipolárního tranzistoru pomocí y-parametrů.

$$I_B = y_{11} \cdot U_{BE} + y_{12} \cdot U_{CE}$$

$$I_C = y_{21} \cdot U_{BE} + y_{22} \cdot U_{CE}, \text{ v maticovém tvaru}$$

Mezi jednotlivými hybridními a admitančními parametry platí vztahy pro jejich vzájemný přepočet.

Tab.2.2: Vztahy pro vzájemný přepočet mezi hybridními a admitančními parametry.

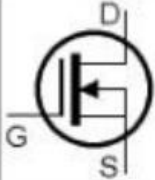
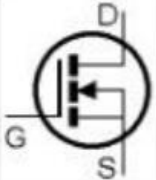
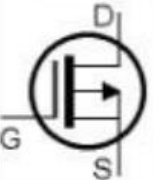
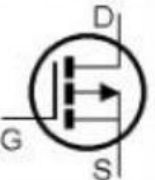
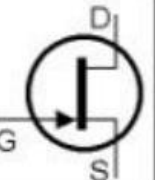
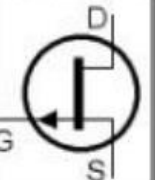
Hybridní parametry	Admitanční parametry
$h_{11} = \frac{1}{y_{11}}$	$y_{11} = \frac{1}{h_{11}}$
$h_{12} = -\frac{y_{12}}{y_{11}}$	$y_{12} = -\frac{h_{12}}{h_{11}}$
$h_{21} = \frac{y_{21}}{y_{11}}$	$y_{21} = \frac{h_{21}}{h_{11}}$
$h_{22} = \frac{y_{11} \cdot y_{22} - y_{12} \cdot y_{21}}{y_{11}}$	$y_{22} = \frac{h_{11} \cdot h_{22} - h_{12} \cdot h_{21}}{h_{11}}$

1.4 Unipolární tranzistor

Unipolární tranzistor využívají k řízení proudu procházejícího tranzistorem elektrostatické pole. Průchod proudu ovlivňují pouze náboje jedné polarity, proto se tranzistory nazývají unipolární. Někdy se používá označení FET – z anglického *field effect transistor* (tranzistor řízený elektrickým polem). Unipolární tranzistory jsou elektrostaticky citlivé součástky vyžadující speciální zacházení. Hlavní výhodou unipolárních tranzistorů je řízení elektrickým polem (napětím), na rozdíl od bipolárních tranzistorů, které řídíme proudem báze. Tato přednost znamená menší

ztráty při řízení tranzistoru, a to umožňuje miniaturizaci v integrovaných obvodech a procesorech, kde jsou unipolární tranzistory využívány. Elektrody unipolárních tranzistorů se označují jako: drain, source a gate. Mezi elektrodami drain a source je takzvaný vodivý kanál (P anebo N), kterým protéká proud. Gate je kovová elektroda izolovaná od kanálu. Jako izolace se často používá oxid křemíku.

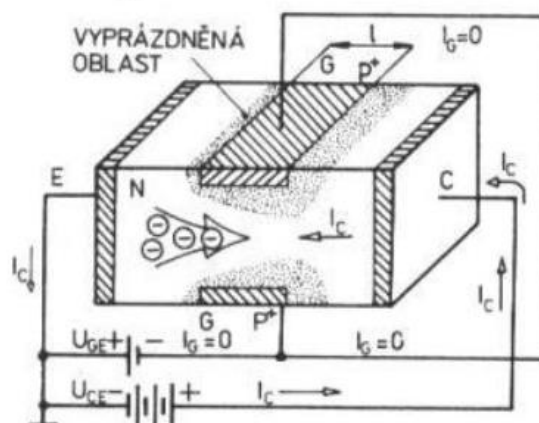
Tab.2.3: Tabulka zapojení a funkce unipolárních tranzistorů.

U polarita	Typ	MOS kanál - n		MOS kanál - p		JFET	
		vodivý (ZABUDOVANÝ)	indukovaný	vodivý (ZABUDOVANÝ)	indukovaný	n	p
+		vede	vede	nevede	nevede	x	nevede
0		vede	nevede	vede	nevede	vede	vede
-		nevede	nevede	vede	vede	nevede	x
	schem. značka						

1.4.1 Princip činnosti unipolárních tranzistorů

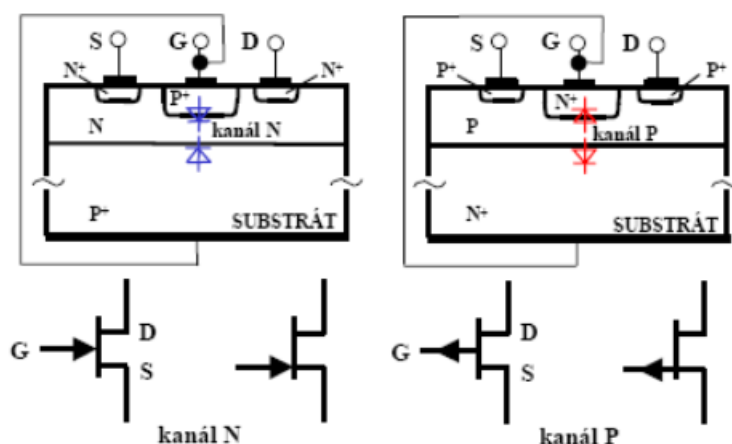
JFET

Základem JFET je polovodičová destička s nevlastní vodivostí typu N, případně P. Destička je opatřena na obou koncích kovovými kontakty, které slouží jako kontaktní plochy pro vývod. Do dolní a horní stěny základní destičky jsou difúzí vytvořeny silně dotované oblasti opačného typu vodivosti, než jakého je typ vodivosti základní destičky. To znamená, má-li základní destička vodivost typu N, budou v ní vytvořeny oblasti typu P⁺, v destičce typu P budou vytvořeny oblasti typu N⁺, které tvoří gate.



Obr. 2.10: Princip tranzistoru JFET.

Třívývodový tranzistor má obě hradla propojena, čtyřvývodový tranzistor má hradla vyvedena samostatně. Základem správné činnosti tohoto typu tranzistoru je nahrazení izolační vrstvy závěrně polarizovaným PN přechodem. Na polovodičovém závěrně polarizovaném přechodu PN je silné elektrické pole, které zabraňuje, aby do něho pronikaly většinové (majoritní) nosiče proudu.



Obr. 2.11: Principy, uspořádání a schematické značky JFET.

Vyprázdněná oblast

Při polarizaci přechodu PN v závěrném směru, proud přechodem téměř neprochází a v okolí přechodu se rozšíří vrstva, která neobsahuje volné nosiče náboje. Se zvětšováním závěrného napětí se tato oblast rozšiřuje. Protože neobsahuje volné většinové nosiče náboje, nazývá se tato oblast “ochuzená”.

Velikost ochuzené oblasti je závislá na:

- Velikosti napětí mezi gatem a sourcem U_{GS} .

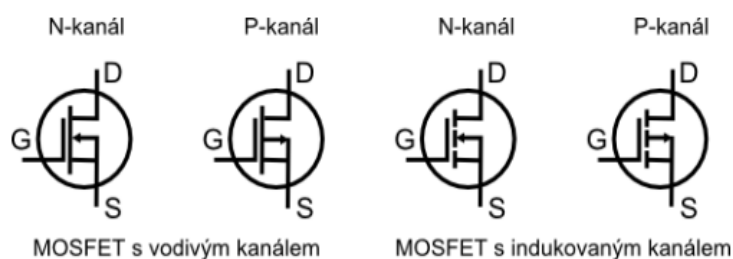
- Velikosti napětí mezi drainem a sourcem U_{DS} .

MOSFET

Tranzistory typu MOSFET jsou nejrozšířenějším typem v oblasti tranzistorů s izolovaným hradlem. Tyto tranzistory jsou z části podobné tranzistorům JFET, ale vykazují větší impedanci (cca $10^{14} \Omega$). Izolační vrstva tvoří kapacitní vazbu mezi hradlem a dalšími částmi tranzistoru. Tranzistory typu MOSFET jsou často používány v integrovaných obvodech velké integrace, kde jejich vysoká vstupní impedance umožňuje dosáhnout velmi nízké výkonové spotřeby na součástku.

Tranzistory typu MOSFET se vyrábí ve čtyřech základních provedeních:

- S N-kanálem (NMOS)
 - S indukovaným kanálem.
 - S vodivým kanálem.
- S P-kanálem (PMOS)
 - S indukovaným kanálem.
 - S vodivým kanálem.

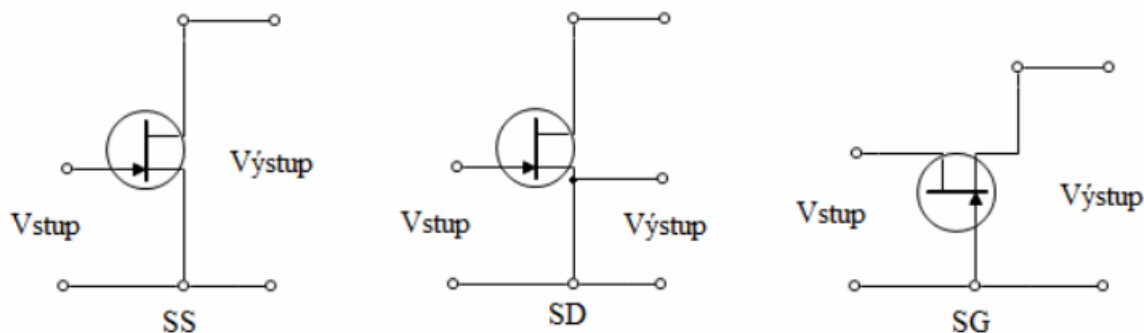


Obr. 2.12: Schematické značky jednotlivých druhů tranzistorů MOSFET.

1.4.2 Základní zapojení unipolárních tranzistorů

Zapojení dvojbranu má čtyři vývody, tranzistor má tři, a proto je nutné připojit jeden vývod společný pro vstup a výstup. Rozlišujeme tři základní zapojení:

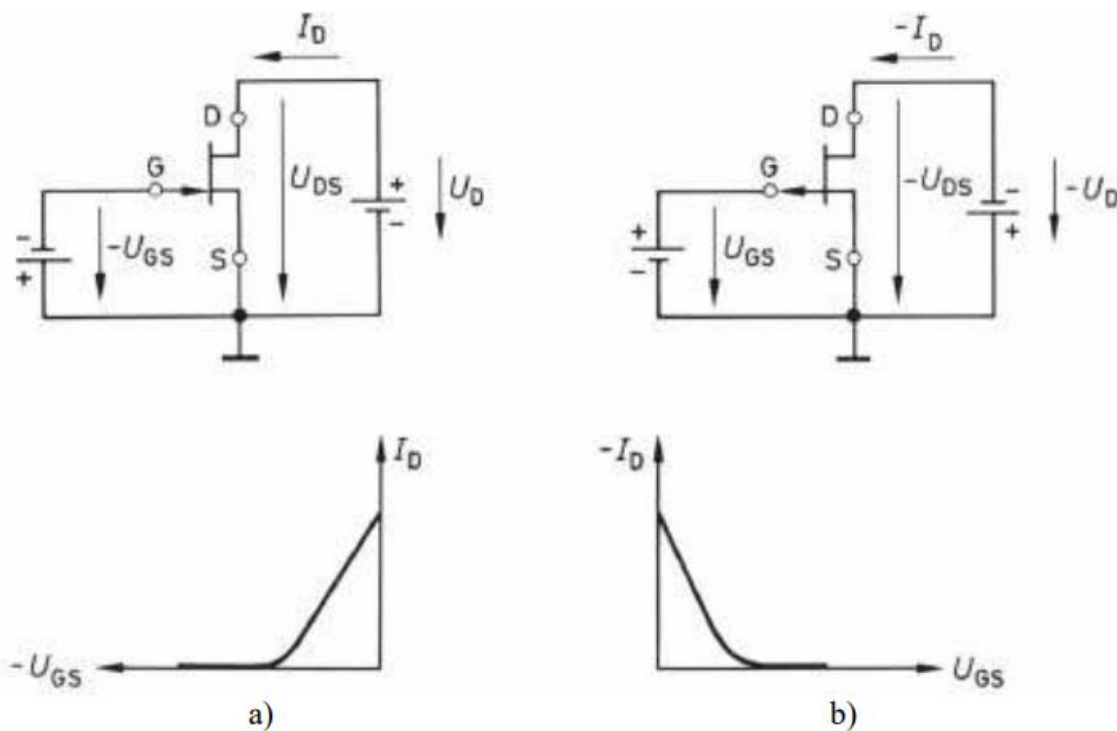
- SG – se společným hradlem (gate).
- SS – se společným emitorem (source).
- SD – se společným kolektorem (drain).



Obr. 2.13: Zapojení unipolárních tranzistorů (NJFET).

U unipolárních tranzistorů, nejpoužívanějším zapojením je zapojení se společným kolektorem a se společným emitorem, protože má největší zesílení. U zapojení se společným hradlem je hlavní nevýhoda, a to nezachování velkého vstupního odporu, což jej činí v praxi nevyužitelným z hlediska používání FET.

Při měření statických charakteristik, je potřeba dodržovat správné polarity přiváděného napětí pro N, respektive P kanálem.



Obr. 2.14: Polarita přiváděného napětí na FET tranzistor v zapojení SS, a) kanál N, b) kanál P.

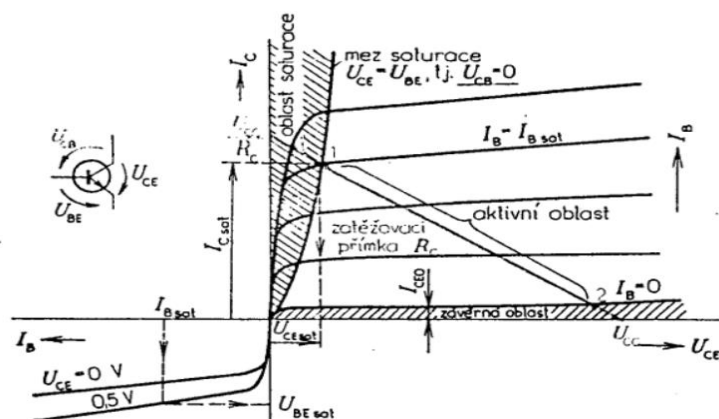
1.4.3 Měření unipolárních tranzistorů

Statické charakteristiky

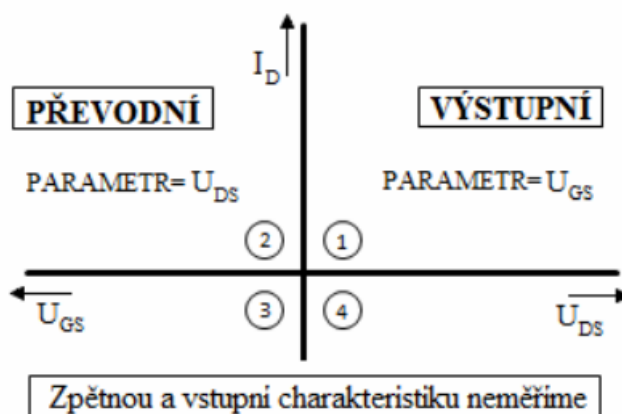
Charakteristiky tranzistoru řízeným polem FET jsou oproti bipolárnímu tranzistoru jednodušší, protože hradlem gate tranzistoru neprotéká téměř žádný proud (přechod

GS je polarizován v závěrném směru u tranzistoru JFET a u tranzistoru MOSFET je přechod izolovaný tenkou vrstvou izolantu). U těchto tranzistorů zobrazujeme převodní a výstupní charakteristiky.

Nejpoužívanějšími pracovními režimy unipolárních tranzistorů jsou aktivní režim (odporová oblast) a režim saturace (oblast saturační).



Obr. 2.15: Výstupní VA charakteristika.



Obr. 2.16: Rozdělení kvadrantů statických charakteristik unipolárních tranzistorů.

- **1 kvadrant**

V tomto kvadrantu jsou měřené výstupní charakteristiky. Tyto charakteristiky nám dávají představu o závislosti proudu I_D na řídicím napětí U_{DS} při konstantních hodnotách parametru U_{GS} .

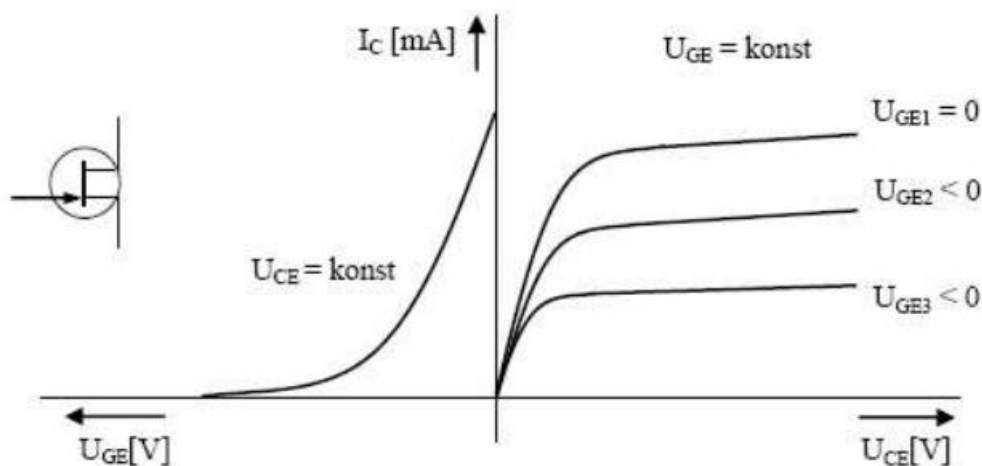
$$I_D = f(U_{DS}) \text{ pro } U_{GS} = \text{konst.}$$

- **2 kvadrant**

V druhém kvadrantu jsou charakteristiky převodní, analogický jako v bipolárních tranzistorů. Jde o závislost proudu I_D na řídicím napětí U_{GS} při konstantních hodnotách napětí U_{GS} .

$$I_D = f(U_{GS}) \text{ pro } U_{DS} = \text{konst.}$$

Důvodem toho, že u unipolárních tranzistorů měříme pouze převodní a vstupní charakteristiky i když je možné měření čtyřpólových charakteristik, je to, že proud hradlem je velice malý, což činí vstupní a zpětnou charakteristiku nepoužitelnou. Někdy se neměří ani převodní charakteristika, neboť je snadno určitelná z charakteristiky výstupní.



Obr. 2.17: Statické charakteristiky tranzistoru JFET s vodivostí N, 1 a 2 kvadrant.

Admitanční charakteristiky:

Pro popsání vlastností unipolárních tranzistorů se používají admitanční parametry. Admitanční parametry se pro popis využívají zejména pro jejich vhodnost s ohledem na jejich velké impedance. Pro zapojení SS platí:

$$i_1 = y_{11} \cdot u_1 + y_{12} \cdot u_2$$

$$\Delta I_D = y_{11} \cdot \Delta U_{GS} + y_{12} \cdot \Delta U_{DS}$$

$$i_2 = y_{21} \cdot u_1 + y_{22} \cdot u_2$$

$$\Delta I_D = y_{21} \cdot \Delta U_{GS} + y_{22} \cdot \Delta U_{DS}$$

Jelikož platí, že proud, který protéká hradlem je roven nule, je možné první rovnici vypustit a parametry y_{11} a y_{12} zanedbat. Pomocí soustavy admitančních rovnic je možné definovat jednotlivé y-parametry:

Převodní admitance nakrátko:

$$y_{21} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_1} = \frac{i_2}{u_1} \text{ pro } u_2 = \Delta U_{DS} = \text{konst.}$$

Výstupní admitance nakrátko:

$$y_{22} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{DS}} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} = \frac{i_2}{u_2} \text{ pro } u_1 = \Delta U_{GS} = \text{konst.}$$

2 NÁVRH A REALIZACE PŘÍPRAVKU

2.1 Výběr BJT

V rámci tohoto výběru jsem se zaměřil na dva konkrétní tranzistory, které jsou vhodné pro širokou škálu aplikací, a to PNP tranzistor BC 557 a NPN – 2N3904. PNP tranzistor je určen především pro aplikace, kde je potřeba zesílit nízkofrekvenční signály nebo používat ho v obvodech pro řízení napětí v kladné části obvodu.

Hlavní parametry BC 557:

- Maximální kolektorový proud: 100 mA.
- Maximální kolektorové napětí: 45 V.
- Zisk proudového zesílení: 110 až 800.

Tento tranzistor je ideální pro aplikace jako signálové zesilovače, spínače a řídicí obvody, kde je potřeba stabilní a efektivní výkon v nižších napětích.

Tranzistor 2N3904 je populární NPN tranzistor, který je často používán v malých signálových aplikacích a nízkofrekvenčních zesilovačích. Jako NPN tranzistor je zapojen tak, že pro jeho činnost je potřebné pozitivní napětí na bázi ve vztahu k emitoru. Je známý svou stabilitou a spolehlivostí při práci v širokém rozsahu pracovních podmínek.

Hlavní parametry:

- Maximální kolektorový proud: 200 mA.
- Maximální kolektorové napětí: 40 V.
- Zisk proudového zesílení: 100 až 300.

Tento tranzistor je ideální pro použití v aplikacích, jako jsou spínače, zesilovače, signálové obvody nebo malé integrované obvody.

2.2 Výběr unipolárního tranzistoru

Tranzistor BS 107 je N-kanálový MOSFET, což znamená, že pro jeho činnost je potřebné pozitivní napětí na gate ve vztahu k source, aby mohl vést elektrický proud mezi drain a source. Tento tranzistor je známý svou jednoduchou konstrukcí a vysokou efektivitou při přepínání.

Hlavní parametry:

- Maximální napětí mezi drain a source: 60 V.
- Maximální proud mezi drain a source: 200 mA.

Tento tranzistor je malý a kompaktní N-kanál MOSFET, který se používá zejména v nízkonapěťových aplikacích, kde je potřeba efektivně přepínat nebo zesilovat signály. Jeho malé rozměry a nízký odpor při sepnutí z něj činí ideální volbu pro různé aplikace v elektronických zařízeních.

2.3 Vytvoření DPS

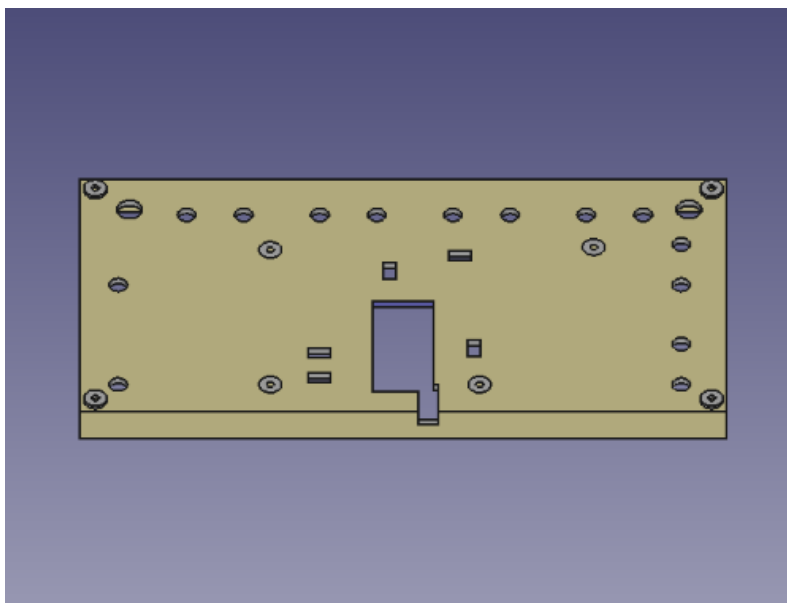
Na odborném výcviku jsem vyráběl desky plošných spojů ruční metodou. Nejprve jsem si nakreslil návrh spoje na měděnou desku pomocí fixu, aby vznikly požadované vodivé cesty. Poté jsem desku ponořil do leptacího roztoku, který odstranil nepotřebnou měď a nechal pouze požadované spoje. Následně jsem vyvrtal otvory pro součástky a pečlivě je osadil podle návrhu. Po zapájení všech součástek jsem desku důkladně zkontroloval, proměřil správnost spojů a otestoval její funkčnost, abych se ujistil, že pracuje správně.

2.4 Vytvoření krabičky

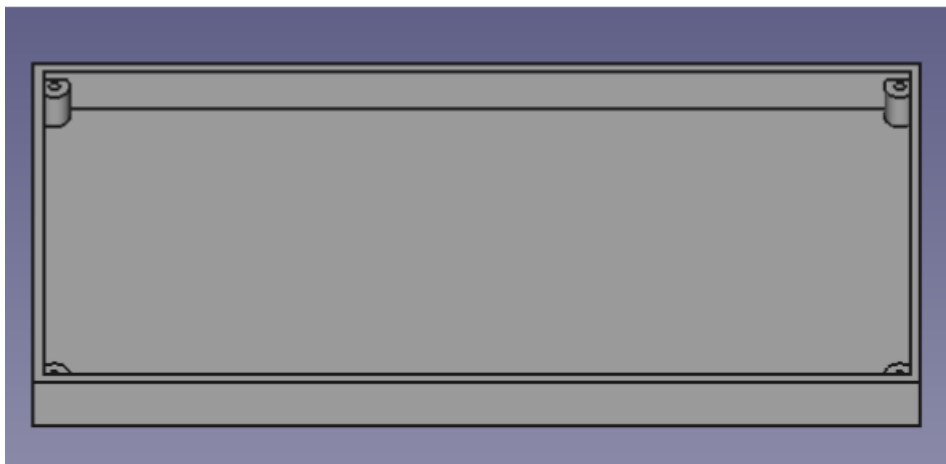
Pro vytvoření přípravku pro měření tranzistorů jsem zvolil krabičku o rozměrech 170 x 86 mm. Tyto rozměry byly vybrány z důvodu potřeby umístit potřebné měřicí komponenty včetně měřicích přístrojů a tranzistorů a zároveň umožnit snadnou manipulaci a přístup k jednotlivým částem zařízení.

Na krabičce je umístěn navigační plánek, který zobrazuje celkové zapojení. Tento plánek slouží jako vodítko pro uživatele při správném propojení jednotlivých komponentů a zajišťuje, že celý proces měření tranzistoru bude probíhat efektivně a bez komplikace. Design krabičky byl navržen ve FreeCADu.

Krabička byla vytisknuta na 3D tiskárně ve škole.



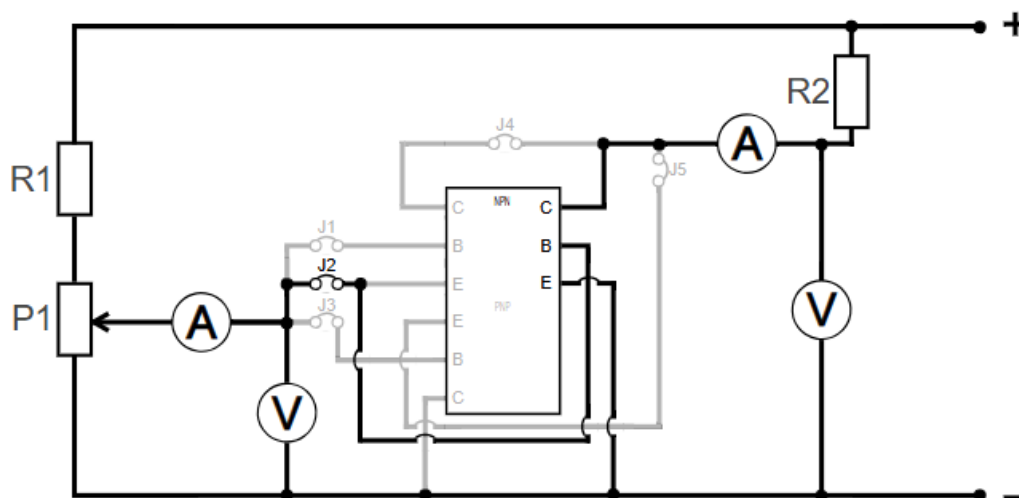
Obr. 3.2: Horní část krabičky, vytvořeno v programu FreeCAD. Foto autor.



Obr. 3.3: Spodní část krabičky, vytvořeno v programu FreeCAD. Foto autor.

2.5 Měření statických charakteristik BJT

Na obr. 3.4 je zapojení pro měření statických charakteristik bipolárního tranzistoru NPN v zapojení se společným emitorem.



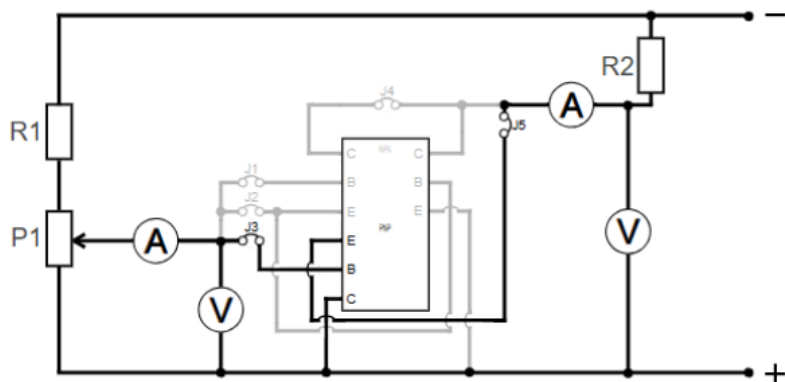
Obr. 3.4: Schéma zapojení pro měření statických charakteristik NPN BJT.

Postup měření statických charakteristik:

1. Proud báze musí být nastaven na určitou hodnotu podle katalogových specifikací, přičemž je nutné dodržet stanovené mezní hodnoty. Katalogové údaje poskytují orientaci ohledně optimálního rozsahu nastavení proudu. Během měření každé jednotlivé charakteristiky musí být proud báze konstantní, a po dokončení měření se jeho hodnota změní na požadovanou úroveň pro další měření.
2. Dalším krokem je postupné zvyšování napětí mezi emitorem a kolektorem od nuly až po hodnotu stanovenou v katalogovém listu. Není nutné dosáhnout maximální hodnoty, protože charakteristika se stává lineární po určité hodnotě tohoto napětí.
3. Proud na kolektoru odečítáme pro každé jednotlivé nastavené napětí mezi kolektorem a emitorem.
4. Posledním krokem je zpracování naměřených hodnot, a jejich vynesení na graf.

Další charakteristiky se měří stejným způsobem, přičemž rozdíl spočívá pouze v řídicích, nastavovaných a odečítaných parametrech.

Stejný postup lze aplikovat i pro měření statických charakteristik PNP tranzistoru. Ale u PNP tranzistoru je nutné zajistit, aby byl správně zvolen směr proudění. Zatímco u NPN tranzistoru je proud báze kladný, u PNP tranzistoru je to opačně.



Obr. 3.5: Schéma zapojení pro měření statických charakteristik PNP BJT.

2.6 Příprava tabulek pro měření

Tabulky by měly být navrženy tak, aby pokryly dostatečnou oblast charakteristiky a umožnily jasné zobrazení jejího průběhu na základě naměřených hodnot. Pro správný návrh můžeme využít katalogové listy měřených součástek, které nám poskytují přibližné hodnoty pro nastavení, jež zajistí, že odečtené hodnoty budou mít potřebnou výpovědní hodnotu. Příklad tabulky pro výstupní charakteristiky je uveden v tabulce 3.1., pro měření převodních charakteristik v tabulce 3.2.

Tab.3.1: Tabulka pro měření výstupních charakteristik BJT.

I_B (A)	
U_{CE} (V)	I_C (mA)

Tab.3.2: Tabulka pro měření převodních charakteristik BJT.

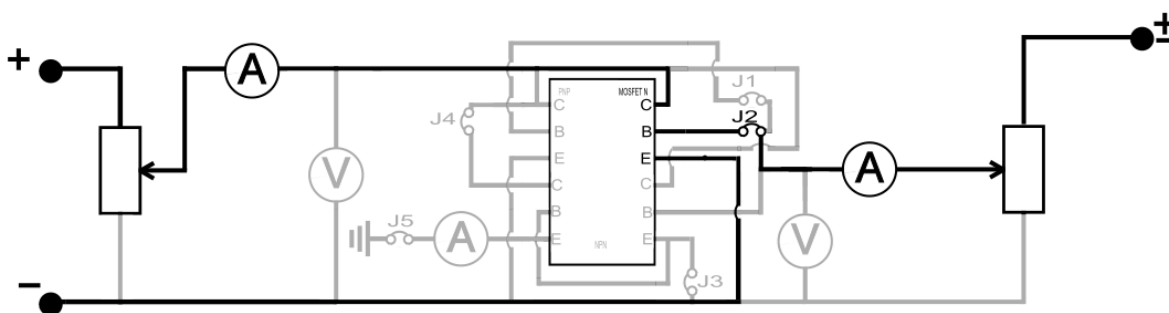
U_{CE} (V)		
I_B	I_C	h_{21}

2.7 Vynesení naměřených hodnot do grafů

Vynášení naměřených hodnot do grafu je důležitým krokem při zpracování naměřených hodnot, protože nám pomáhá snadněji pochopit vzory a vztahy mezi měřenými veličinami. Tento proces spočívá v přiřazení hodnot na konkrétní osy grafu, což umožňuje jejich porovnání. Dříve bylo nutné grafy kreslit ručně, ale dnes máme k dispozici programy, které tento proces urychlí a zpřesní. Tyto nástroje nejen že automaticky generují grafy, ale umožňují jejich úpravy a přidání popisků, což usnadňuje pochopení výsledků. Díky těmto programům můžeme také jednoduše provádět výpočty složitějších parametrů, jako jsou například frekvenční nebo hybridní charakteristiky, které by bez grafů byly obtížné pochopitelné.

2.8 Měření statických charakteristik unipolárního tranzistoru

Na obrázku 3.6 je uvedeno zapojení pro měření statických charakteristik na MOSFET tranzistoru s N kanálem v zapojení společný source.



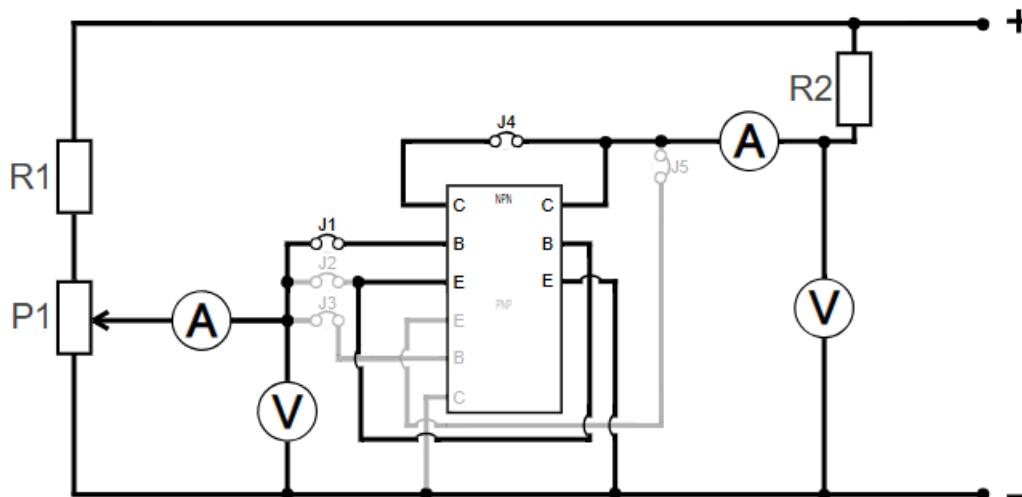
Obr. 3.6: Schéma zapojení pro měření statických charakteristik MOSFET N kanál.

Postup měření statických charakteristik:

1. Při měření výstupních charakteristik, je nejprve nutné nastavit určitou hodnotu napětí mezi gatem a sourcem, které zůstává konstantní po celou dobu měření pro každou jednotlivou výstupní charakteristiku. Je důležité dbát na správnou polaritu přiváděného proudu. Po změření charakteristiky s daným napětím se nastaví nová hodnota napětí mezi gatem a sourcem a měření se opakuje pro každou požadovanou hodnotu tohoto napětí.
2. Po nastavení napětí, můžeme začít měřit pro danou charakteristiku s nastavováním řídicí veličiny, kterou je napětí mezi drainem a sourcem. Měření začínáme od nulové hodnoty a postupně zvyšujeme až na maximum. Vzhledem k tomu, že charakteristika se při měření postupně linearizuje, není nezbytné ji měřit až do maximální hodnoty.
3. Pro každou hodnotu napětí mezi drainem a sourcem pro danou křivku odečítáme hodnotu proudu na drainu. Naměřené hodnoty vyneseme do grafu.

2.9 Měření zesílení Darlingtonova zapojení

Na obrázku 3.7 je zobrazeno zapojení pro měření zesílení Darlingtonova zapojení pomocí 2 NPN tranzistorů, v zapojení SE.



Obr. 3.7: Schéma zapojení pro měření zesílení Darlingtonova zapojení.

Postup měření:

1. Po zapnutí zdroje se postupně musí upravovat hodnoty potenciometrů. Nejprve musím nastavit hodnotu prvního potenciometru a sledovat, jak se změní bázev proud T1. Poté musím upravit druhý potenciometr a sledovat změny kolektorového proudu tranzistoru T2.
2. Během měření musím zapisovat hodnoty bázevého a kolektorového proudu pro různé nastavení potenciometrů a na základě těchto hodnot můžu vypočítat zesílení.
3. Posledním krokem je vynesení naměřených hodnot do grafu.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vytvořit přípravek pro měření tranzistorů, který umožní analyzovat jejich parametry. V rámci práce byl navržen a sestaven měřicí obvod, vyrobena deska plošných spojů a provedeno testování funkčnosti daného přípravku.

Teoretická část se věnuje principu činnosti tranzistorů, jejich charakteristikám a metodám měření. Na základě těchto poznatků byl navržen měřicí přípravek, který umožňuje testování bipolárních i unipolárních tranzistorů. Praktická část zahrnuje návrh schématu, výrobu desky plošných spojů a sestavení celého zařízení.

V experimentální části bylo provedeno měření statických charakteristik tranzistorů, kde byly zjištěny jejich výstupní a převodní charakteristiky. Výsledky měření byly zpracovány a vyneseny do grafů, což umožňuje lepší analýzu a pochopení chování jednotlivých součástek. Dále bylo provedeno měření zesílení Darlingtonova zapojení, které poskytuje důležité informace o jeho vlastnostech a využitelnosti v obvodech s vysokým proudovým zesílením.

Vytvořený měřicí přípravek splnil mé očekávání a umožňuje efektivní měření tranzistorů. Práce přispívá k lepšímu porozumění metodám měření a analýzy polovodičových součástek a poskytuje užitečné výsledky, které mohou být využity při studiu a aplikacích v elektronice.

3 POUŽITÁ LITERATURA

1. PÁPEŽOVÁ, J. Tranzistory – slejdy [online]. [cit. 3. 4. 2025]. Dostupné z: https://elektro.fs.cvut.cz/ZS/stare0304/2141015.pdf/papezova/Tranzis_slejdy.pdf.
2. ELEKTROSS. Bipolární tranzistor – princip činnosti [online]. [cit. 3. 4. 2025]. Dostupné z: https://elektross.gjn.cz/skripta/kap2/2_3_1.html.
3. Experiment 6 – Teorie [online]. [cit. 3. 4. 2025]. Dostupné z: <https://remote-lab.fyzika.net/experiment/06/experiment-6-teorie.php?lng=cs>,
4. Tranzistory [online]. 2019 [cit. 3. 4. 2025]. Dostupné z: [Tranzistory – Elektronika](#).
5. Tranzistory – rozdělení, základní zapojení, výstupní VA charakteristika, použití [online]. [cit. 3. 4. 2025]. Dostupné z: [Tranzistory – rozdělení, základní zapojení, výstupní VA charakteristika, použití – mylms](#),
6. Učební text – polovodiče [online]. [cit. 3. 4. 2025]. Dostupné z: www.ssenajizdarne.cz.
7. Teplotní stabilizace pracovního bodu tranzistoru [online]. [cit. 3. 4. 2025]. Dostupné z: [Teplotní stabilizace pracovního bodu tranzistoru | ELUC](#).
8. Bipolární tranzistory – schémata [online]. [cit. 3. 4. 2025]. Dostupné z: [Náhradní schémata](#).
9. Základní parametry bipolárních tranzistorů [online]. [cit. 3. 4. 2025]. Dostupné z: [Základní parametry bipolárních tranzistorů | ELUC](#),
10. Princip činnosti základních typů JFET tranzistorů [online]. [cit. 3. 4. 2025]. Dostupné z: [Princip činnosti základních typů JFET tranzistorů | ELUC](#).
11. Princip činnosti základních typů MOSFET tranzistorů [online]. [cit. 3. 4. 2025]. Dostupné z: [Princip činnosti základních typů MOSFET tranzistorů | ELUC](#).
12. KRAEMER, Jindřich a Jaroslav NÝVLT. Elektrotechnická měření II. 2. nezměněné vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1983.
13. ŠÍR, Jaroslav. Tranzistory a jejich aplikace. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1960.
14. MALINA, Vladimír. Měření v polovodičové technice. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1972.
15. HORÁK, Jiří. Tranzistorová technika. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1965.

4 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

4.1 Seznam obrázků

- Obr. 2.1: Schéma bipolárního tranzistoru (NPN).
Obr. 2.2: Vstupní charakteristika bipolárního tranzistoru.
Obr. 2.3: Výstupní charakteristika bipolárního tranzistoru.
Obr. 2.4: Převodní charakteristika bipolárního tranzistoru.
Obr. 2.5: Teplotní stabilizace pomocí diody.
Obr. 2.6: Zapojení tranzistoru NPN a) se společným emitorem, b) se společným kolektorem, c) se společnou bází.
Obr. 2.7: Statické charakteristiky bipolárního tranzistoru, zapojení SE.
Obr. 2.8: Model bipolárního tranzistoru pomocí h-parametrů.
Obr. 2.9: Model bipolárního tranzistoru pomocí y-parametrů.
Obr. 2.10: Princip tranzistoru JFET.
Obr. 2.11: Principy, uspořádání a schematické značky JFET.
Obr. 2.12: Schematické značky jednotlivých druhů tranzistorů MOSFET.
Obr. 2.13: Zapojení unipolárních tranzistorů (NJFET).
Obr. 2.14: Polarita přiváděného napětí na FET tranzistor v zapojení SS, a) kanál N, b) kanál P.
Obr. 2.15: Výstupní VA charakteristika.
Obr. 2.16: Rozdělení kvadrantů statických charakteristik unipolárních tranzistorů.
Obr. 2.17: Statické charakteristiky tranzistoru JFET s vodivostí N, 1 a 2 kvadrant.
Obr. 3.1: Horní část krabičky, vytvořeno v programu FreeCAD. Foto autor.
Obr. 3.2: Spodní část krabičky, vytvořeno v programu FreeCAD. Foto autor.
Obr. 3.3: Spodní část krabičky, vytvořeno v programu FreeCAD. Foto autor.
Obr. 3.4: Schéma zapojení pro měření statických charakteristik NPN BJT.
Obr. 3.5: Schéma zapojení pro měření statických charakteristik PNP BJT.
Obr. 3.6: Schéma zapojení pro měření statických charakteristik MOSFET N kanál.
Obr. 3.7: Schéma zapojení pro měření zesílení Darlingtonova zapojení.

4.2 Seznam tabulek

- Tab.2.1: Porovnání vlastností zapojení SE, SC, SB.
Tab.2.2: Vztahy pro vzájemný přepočet mezi hybridními a admitančními parametry.
Tab.2.3: Tabulka zapojení a funkce unipolárních tranzistorů.
Tab.3.1: Tabulka pro měření výstupních charakteristik BJT.
Tab.3.2: Tabulka pro měření převodních charakteristik BJT.