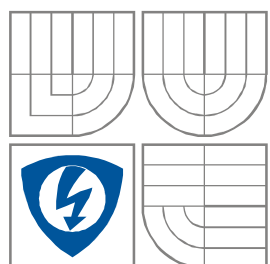


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ BIPOLÁRNÍCH
A UNIPOLÁRNÍCH TRANZISTORŮ**
BASIC MEASUREMENT OF BIPOLAR AND UNIPOLAR TRANSISTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

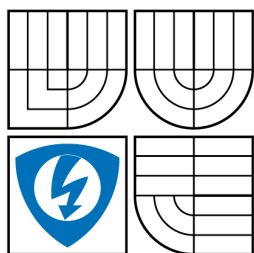
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LEOŠ KAŇA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ DŘÍNOVSKÝ, Ph.D.

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Leoš Kaňa

ID: 78068

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Měření vlastností bipolárních a unipolárních tranzistorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy měření základních parametrů polovodičových součástek (bipolárních a unipolárních tranzistorů atd.). Na základě těchto znalostí navrhnete měřicí pracoviště pro měření základních polovodičových součástek. Dále navrhnete univerzální měřicí přípravek pro laboratorní úlohu. Pro tato měření využijte vhodných laboratorních přístrojů (např. Agilent 34410A a E3646A).

V grafickém programovacím prostředí Agilent VEE Pro 8.0 naprogramujte automatické měření základních parametrů polovodičových součástek. Dále vytvořte přehledné ovládací prostředí. Vytvořený program opatřete stručným leč výstižným návodem, aby mohl posloužit jako podklady pro laboratorní úlohu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BOUŠEK, J., Elektronické součástky. Elektronický učební text, 240 stran, www.feec.vutbr.cz.

[2] Agilent, VEE Pro User's Guide, Agilent Technologies, USA, 657 stran, dostupné na <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/W1140-90036>.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 5.6.2009

Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Bibliografická citace dle ČSN ISO 690

KAŇA, L. *Měření vlastností bipolárních a unipolárních tranzistorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

Abstrakt

V rámci zefektivnění měření vlastností tranzistorů, ať už unipolárních (FET) nebo bipolárních (BJT), v laboratorních podmínkách a tím jejich lepší pochopení v rámci probírané látky, je žádoucí mít k dispozici pracoviště respektive přípravku, umožňující tato měření s obměnitelnými měřenými prvky. Práce je zaměřena nejen na návrh a vývoj takového přípravku, ale zároveň obsahuje stručný popis základních parametrů a vlastností tranzistorů. Dále se práce zabývá realizací programů pro měření statických charakteristik tranzistorů v prostředí programu VEE 8.0 Pro. Výstupem by tedy měla být komplexní laboratorní úloha zaměřená na bipolární a unipolární tranzistory včetně navržených programů. K vývoji DPS přípravku byl použit návrhový systém Eagle. V práci je samozřejmě obsažena i teorie potřebná pro měření a programování měřicích přístrojů. Kromě změny měřeného prvku je zde možnost obměny zapojení tranzistoru v obvodu a to jak pro BJT (SE, SC, SB) tak pro unipolární JFET (SS, SG, SD) tranzistory.

Klíčová slova

Deska plošných spojů, DPS, Návrhový systém, Bipolární, Unipolární, BJT, FET, SC (SD), SB (SG), SE (SS), Báze, Emitor, Kolektor, Drain, Gate, Source, Statické charakteristiky, VEE

Abstract

In terms of the better effectiveness in the sphere of transistor characteristics measuring, no matter unipolar (FET) or bipolar (BJT), in laboratory conditions and their better understanding in terms of thrash out a subject matter is desirable have to available workplace let us say preparation enabling this kind of measuring with modifiability wiring and with possibility to change measured component. This thesis isn't focused only on development of this kind of universal component for measuring but simultaneously contains brief summary about the theory and parameters of transistors. Next aim is the development and realisation of static characteristic measuring program in VEE 8.0 Pro environment. Finally the complex laboratory exercise has to be done for measuring of bipolar and unipolar transistor's static characteristics include programs for automatic measuring. For developing of DPS was used developing system named Eagle which gives us instrument with sufficiently accuracy. In thesis is contained theory needed for measuring and programming. Except possibility of measured component change we can change transistor connection in circuit on the board. This change is available for BJT (CE, CB, CC) and unipolar JFET (CS, CG, CD) transistor's.

Keywords

Transistor characteristics, Printed circuit board, PCB, Development system, BJT, FET, CC (CD), CB (CG), CE (CS), Base, Collector, Emitter, Drain, Gate, Source, Static characteristic, VEE

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření vlastností bipolárních a unipolárních tranzistorů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Dřínovskému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

OBSAH

1 Úvod	- 1 -
2 Tranzistory	- 2 -
2.1 Obecná charakteristika	- 2 -
2.2 Základní rozdělení tranzistorů.....	- 2 -
2.3 Bipolární tranzistory.....	- 4 -
2.3.1 Základní parametry, vlastnosti a využití bipolárních tranzistorů	- 4 -
2.3.2 Základní struktury a vnitřní zapojení bipolárních tranzistorů.....	- 8 -
2.3.3 Základní zapojení bipolárních tranzistorů pro měření statických charakteristik	- 9 -
2.3.4 Možnosti měření na BJT tranzistorech	- 11 -
Statické charakteristiky tranzistoru	- 11 -
2.4 Unipolární tranzistory.....	- 17 -
2.4.1 Použití, základní parametry a princip unipolárních tranzistorů	- 17 -
2.4.2 Možnosti měření unipolárních tranzistorů a jejich vlastností.....	- 19 -
2.4.3 Základní zapojení unipolárních tranzistorů.....	- 21 -
3 Měření na tranzistorech	- 23 -
3.1 Měření na bipolárních tranzistorech.....	- 23 -
3.1.1 Zapojení a postup pro měření statických charakteristik BJT.....	- 23 -
3.1.2 Nastavení přípravku pro měření statických charakteristik	- 25 -
3.1.3 Příprava tabulek pro měření.....	- 25 -
3.1.4 Zpracování naměřených hodnot do grafů	- 26 -
3.1.5 Zapojení a postup měření tranzistoru ve spínacím režimu (řízený odpor)	- 26 -
3.2 Měření na unipolárních tranzistorech.....	- 27 -
3.2.1 Zapojení a postup pro měření statických charakteristik FET	- 27 -
3.2.2 Nastavení přípravku pro měření statických charakteristik	- 29 -
4 Pracoviště	- 30 -
4.1 Skladba pracoviště a využívané přístroje	- 30 -
4.1.1 Zdroj.....	- 30 -
4.1.2 Multimetry.....	- 30 -
4.1.3 Přípravek pro měření	- 31 -
4.1.4 PC stanice s aplikací Agilent VEE Pro a příslušenstvím.....	- 31 -
5 Návrh přípravku	- 32 -
5.1 Vyhodnocení požadavků měření.....	- 32 -
5.2 Použité technologie, součástky a konstrukční prvky	- 32 -
5.2.1 Použité součástky.....	- 32 -
5.2.2 Použité vývojové aplikace	- 37 -
5.2.3 Použité technologie pro výrobu přípravku.....	- 37 -
5.2.4 Parametry přípravku	- 38 -
5.3 Finální produkt	- 38 -

5.3.1	Schématické zapojení pracoviště s měřicími přístroji.....	- 38 -
5.3.2	Deska plošných spojů	- 39 -
6	Automatizovaná měření.....	- 41 -
6.1	Charakteristika a vlastnosti aplikace VEE Pro 8.0.....	- 41 -
6.1.1	Komunikace PC-přístroj.....	- 41 -
6.1.2	Zpracování získaných dat.....	- 42 -
6.2	Programování v prostředí VEE Pro 8.0.....	- 42 -
6.2.1	Základy tvorby programu	- 42 -
6.2.2	Ovládání měřicí aplikace.....	- 43 -
6.2.3	Ukázka pracovního prostředí	- 43 -
7	Laboratorní měřicí úloha	- 44 -
7.1	Návrh laboratorní měřicí úlohy pro bipolární tranzistory	- 44 -
7.1.1	Zadání laboratorní úlohy pro zapojení SE	- 44 -
7.1.2	Teoretický úvod.....	- 45 -
7.1.3	Postup měření	- 46 -
7.1.4	Vypracování měřicí úlohy	- 49 -
7.1.5	Naměřené hodnoty	- 50 -
7.1.6	Zpracování naměřených hodnot	- 51 -
7.2	Návrh laboratorní měřicí úlohy pro unipolární tranzistory	- 53 -
7.2.1	Zadání laboratorní úlohy pro zapojení SE (S)	- 53 -
7.2.2	Teoretický úvod.....	- 54 -
7.2.3	Postup měření.....	- 55 -
7.2.4	Vypracování měřicí úlohy	- 58 -
7.2.5	Naměřené hodnoty	- 58 -
7.2.6	Zpracování naměřených hodnot	- 60 -
8	Závěr	- 62 -

1 Úvod

Tranzistor je diskretní elektronická součástka používaná dnes a denně v analogových a digitálních obvodech a aplikacích. V číslicových aplikacích jsou nejčastěji využívány pro spínací účely, nebo častěji a ve větší míře v digitálních komponentách obsahujících právě tranzistory. Tvoří například paměti, brány (základní stavební blok číslicových obvodů) nebo LCD displeje a mnoho dalších analogových i digitálních obvodů. V analogových obvodech, jsou nejčastěji využívány pro své zesilovací parametry. Například pro zesílení výkonu a podobně. Podle toho zda je tranzistor řízen polem nebo elektrickým proudem je označován jako FET (field-effect transistor) nebo BJT (bipolar junction transistor). V dnešní době již tranzistory téměř zcela vytlačily dříve hojně používaný elektronický prvek, a to elektronku oproti, které mají řadu výhod. Mimo jiné konstrukční velikost a provedení, delší životnost a rychlejší „použitelnost“. Navzdory znatelným výhodám má však i jednu nevýhodu a tou je velice malá odolnost proti elektromagnetickému rušení.

Vzhledem k velice častému využívání tranzistorů je vhodné se tímto prvkem zabývat v elektrotechnických oborech hlouběji a jako jakýsi základ je bráno měření vlastností tranzistorů, ať už statických či dynamických, a určování jejich parametrů a vlastností. Z hlediska měření vlastností tranzistorů je poměrně nenáročné, za pomoci jednoduchého zapojení změřit základní charakteristiky předloženého tranzistoru, máme-li k dispozici dostatečně vybavené pracoviště. Problém však nastává, požadujeme-li různé obměny zapojení nebo dokonce obměnu typů tranzistorů a to jak BJT tak FET ať už z hlediska flexibility měření nebo servisního zásahu (tranzistor mívá striktně udány mezní parametry, při jejichž překročení dojde k trvalému poškození). Z tohoto důvodu je žádoucí mít k dispozici přípravky umožňující právě tuto manipulaci, který nám dává svou univerzálností prostor, pro modifikace a změny v zapojení s přesností, dostačující pro kvalitní a přesná měření již výše zmiňovaných charakteristik.

Zároveň je, žádoucí mít možnost realizovat měření na dálku respektive bez nutnosti zásahu do přístrojů formou nastavování a mechanického odečítání hodnot nebo mít možnost realizovat dlouhodobá měření bez nutnosti zásahu do něj. Takovýto nástroj nám dává firma Agilent prostřednictvím poměrně univerzálního návrhového prostředí VEE 8.0 Pro, který jsem použil právě pro automatizaci měření na navrženém přípravku.

Výstupem bakalářské práce by tedy měl být takovýto univerzální přípravek pro měření základních charakteristik tranzistorů s možnostmi obměny zapojení a měřeného prvku. Přípravek je určen pro bipolární i unipolární tranzistory. Dalším bodem výstupu je pak návrh úkolů, postupu měření a samotného programu pro měření v prostředí VEE 8.0 Pro.

2 Tranzistory

2.1 Obecná charakteristika

Tranzistor je polovodičová součástka, kterou tvoří dvojice přechodů PN. Jedná se v podstatě o spojení dvou polovodičových diod v jedné součástce. Většinu vlastností tranzistoru však dvojicí diod nahradit nelze.

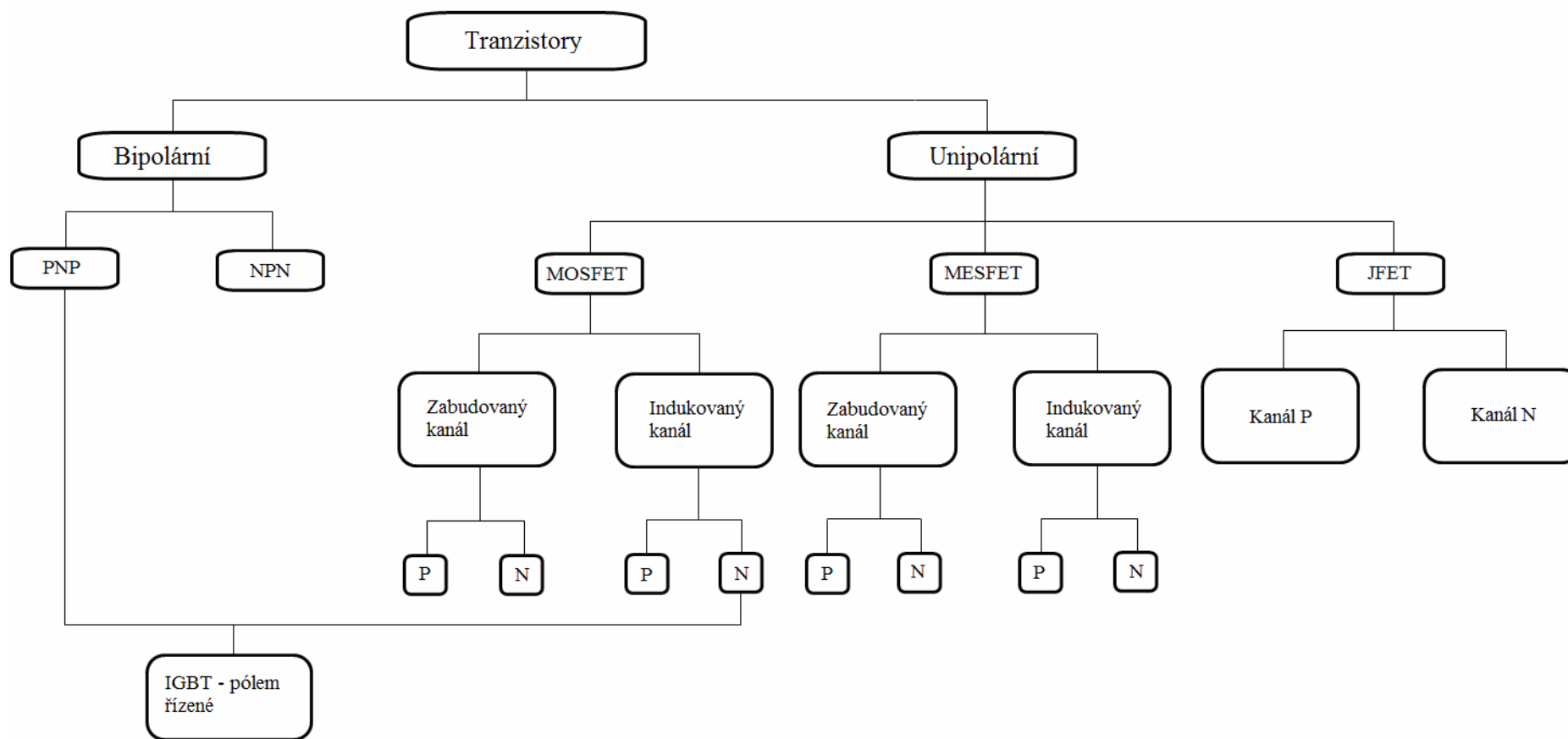
Tranzistorový efekt byl objeven a tranzistor vynalezen 16. prosince 1947 v Bellových laboratořích týmem, ve složení: William Shockley, John Bardeen a Walter Brattain. Za tento objev jim byla roku 1956 udělena Nobelova cena za fyziku. Jednalo se o velmi významný objev, který vedl k faktickému vědeckotechnickému převratu v oblasti aplikované elektrotechniky. V praxi se to projevuje zejména obrovskou mírou miniaturizace jednotlivých součástek a tím i neustálým zvyšováním koncentrace polovodičových součástek vztaženou na jednotku plochy.

Každý tranzistor má (nejméně) tři elektrody, které se u bipolárních tranzistorů označují jako *kolektor*, *báze* a *emitor*, u unipolárních jako *drain*, *gate* a *source*. Podle uspořádání použitých polovodičů typu *P* nebo *N*, se rozlišují dva typy bipolárních tranzistorů, NPN a PNP (prostřední písmeno odpovídá vždy *bázi*). Unipolární tranzistory jsou označovány jako NFET nebo PFET [8].

2.2 Základní rozdělení tranzistorů

Základní dělení tranzistorů z hlediska jejich vnitřní struktury a technologie použité pro výrobu, je vyobrazeno na obr. 2.1. Tranzistory se dále dělí podle použití. Můžeme je rozdělit na *zesilovací* a *spínací*, podle kmitočtových vlastností pak na *nízkofrekvenční*, *vysokofrekvenční* a *mikrovlnné*, a podle výkonu na *nízko výkonové*, *výkonové* a *vysoko výkonové*.

Část bipolární tranzistory v této práci je věnována nízkofrekvenčním výkonovým tranzistorům a to z praktických důvodů, jelikož tyto tranzistory nám poskytují proudovou odolnost a vyšší zatížitelnost, čímž částečně eliminujeme možnost zbytečných průrazů či jiných poškození tranzistoru během laboratorních měření. Výběru tranzistoru se blíže věnuji v kap. 5, která je zaměřená na samotný návrh a realizaci návrhu přípravku. Část unipolární tranzistory byla zaměřena na nízko výkonové JFET tranzistory a to z praktických důvodů, tedy aby bylo možné je osadit do stejného přípravku a měřit i jejich statické charakteristiky.



Obr. 2.1 Základní rozdělení tranzistorů z hlediska vnitřní struktury.

2.3 Bipolární tranzistory

Bipolární tranzistor je typ tranzistoru, u kterého se uplatňují jak většinové (majoritní), tak i menšinové (minoritní) nosiče náboje (tzn. nosiče obojí polarity), tedy elektrony i díry. Bipolární tranzistor je řízen vstřikováním (injektováním) menšinových nosičů do báze. Existují ve struktuře PNP i NPN, kde tyto jsou si rovny a liší se pouze v ohledu na polaritu napájecího napětí a směrů proudů.

Bipolární – BJT – je ovládán připojením elektrického proudu na bázi. Velikostí proudu připojeného na bázi se ovládá proud v obvodu mezi emitorem a kolektorem. Svorky tranzistoru BJT jsou kolektor, báze a emitor, běžně označované jako C, B, E podle jejichž zapojení rozeznáváme tři základní způsoby zapojení bipolárního tranzistoru a to: SE – zapojení se společným emitorem, SB – zapojení se společnou bází a SC – zapojení se společným kolektorem.

Vzhledem k tomu, že řídicí veličinou bipolárních tranzistorů je proud, vzniká při integraci velkého množství tranzistorů velké Jouleovo teplo, což je nepřijatelné a proto nejsou bipolární tranzistory efektivně použitelné pro výrobu IO (integrovaných obvodů).

Pro popsání principu funkce bipolárního tranzistoru lze použít následující definici: *bipolární tranzistor je aktivní polovodičová součástka, u které malý proud bázi vyvolá velký kolektorový proud.*

2.3.1 Základní parametry, vlastnosti a využití bipolárních tranzistorů

Bipolární tranzistor se používá nejčastěji ve dvou základních aplikacích jako lineární zesilovač nebo jako bezkontaktní spínač. Jeho zesilovacích účinků se využívá např. v zesilovací technice, oproti tomu jako spínač se využívá např. ve spínaných zdrojích. Vlastnosti bipolárního tranzistoru jsou popisovány stejnsměrnými (statickými) charakteristikami, které udávají vztahy veličin charakterizující tranzistor jako dvojbran. Nejčastěji se používají tyto závislosti:

Výstupní charakteristika:

$$I_C = f(U_{CE}), \text{ pro } I_B = \text{kon.} \quad (2.1)$$

Vstupní charakteristika:

$$I_B = f(U_{BE}), \text{ pro } U_{CE} = \text{kon.} \quad (2.2)$$

Převodní charakteristika:

$$I_C = f(I_B), \text{ pro } U_{CE} = \text{kon.} \quad (2.3)$$

Zpětná napěťová charakteristika:

$$U_{BE} = f(U_{CE}), \text{ pro } I_B = \text{kon.} \quad (2.4)$$

Což jsou charakteristiky měřené v zapojení SE. Blíže o nich bude pojednáno v kap. 2.3.4. Základní vlastností tranzistoru jako elektronického prvku, je jeho schopnost zesilovat výkon přivedeného signálu. Tento signál vzniká, je-li přechod B-E propustně polarizován a naopak, je-li B-C polarizován v závěrném směru.

Bipolárním tranzistorem tečou tři různé proudy a to:

I_C - kolektorový proud;
 I_B - proud báze;
 I_E - proud emitorem.

Mezi těmito proudy je definována závislost popsána rovnicí:

$$I_E = I_B + I_C. \quad [\text{A}] \quad (2.5)$$

Velikost jednotlivých proudů se odvíjí od dvou základních parametrů tranzistoru a to proudových zesilovacích činitelů α a β .

Proudový zesilovací činitel α se využívá u zapojení SB, kde je vstupním proudem proud emitoru I_E a výstupním proudem je proud I_C , kde platí:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \Big|_{U_{CB} = \text{konst.}} \quad (2.6)$$

Dále pak můžeme psát že:

$$I_E = I_B + I_C \quad \text{je } I_E > I_C, \quad (2.7)$$

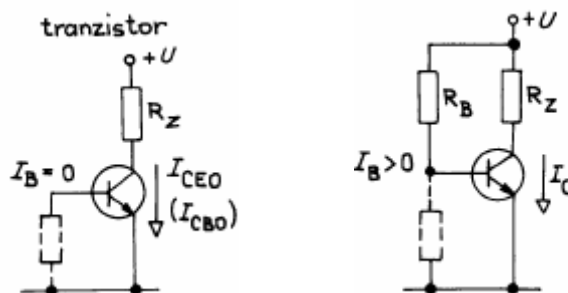
z čehož vyplývá, že zesilovací činitel $\alpha < 1$.

Proudový zesilovací činitel β se využívá v zapojení SE popřípadě SC. U tohoto zapojení je vstupním proudem proud báze I_B a výstupním proudem je proud kolektoru I_C . Jeho velikost se určí tak, že nastavíme proud I_B a napětí U_{CE} čímž nastavíme pracovní bod tranzistoru a pro určení činitele β změříme proud I_C a použijeme vztah:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \Big|_{U_{CE} = \text{konst.}} \quad (2.8)$$

Bipolární tranzistor jako spínač

Jak jsem se již zmínil, druhým častým použitím bipolárního tranzistoru je spínač. Výhodou je poměrně malá spotřeba výkonu ke spínání, krátká doba sepnutí a vysoký opakovací kmitočet. Tranzistor má ve spínaných obvodech pouze dva pracovní stavy *sepnuto* a *rozepnuto*. Na obr. 2.2 je principiální zapojení tranzistoru jako spínače.



Obr. 2.2 Tranzistor jako spínač a) v zavřeném stavu, b) v otevřeném stavu [1].

Je-li tranzistor v nevodivém stavu, prochází zatěžovacím odporem takzvaný zbytkový proud I_{CE0} a pokud chceme dosáhnout minimalizace zbytkových proudů, zapojíme bázi společně s emitorem (popřípadě zapojení ještě rozšíříme o odpor), čímž dosáhneme I_{CB0} . V tomto případě se dá tranzistor popsat jako velký odpor.

Je-li tranzistor ve vodivém stavu, prochází bází tak velký proud, že je tranzistor v nasyceném stavu. V tomto případě je jeho odpor velice malý.

Používáme-li tranzistor jako spínací prvek, je nezbytně nutné využívat výlučně jeho krajní stavy, které jsou *zavřen* a *otevřen*. Nejčastěji se však využívá zapojení SE a podle toho zda jde o typ PNP či NPN přivádíme na bázi záporné respektive kladné napětí o velikosti přibližně 1 V což nám zajistí sepnutí tranzistoru, a tak jako když byl tranzistor uzavřen procházelo I_{CB0} , tak i v případě otevření tranzistoru vnímáme parazitní jev v podobě úbytku napětí, způsobeného malým odporem mezi přechody C-E, který průchodem proudu zapříčiňuje úbytky do 1 V což nám ve většině aplikací nevádí, jen je potřeba tranzistor chladit protože vlivem úbytků na přechodu vzniká teplo. Je samozřejmostí, že se výrobci snaží (především u tranzistorů určených jako spínací) eliminovat parazitní jevy výše popsané.

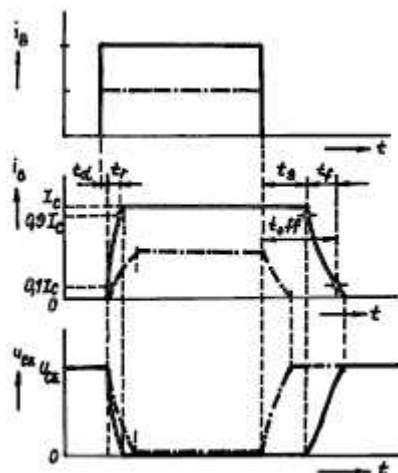
Na obr. 2.3 je vysvětlen princip činnosti tranzistoru jako spínače. Přivádíme-li na bázi pravoúhlý impuls, dojde ke zkreslení impulsu kolektorového proudu. Potom můžeme říci, že tranzistor impuls zkresluje a zkreslení lze vyjádřit v časové oblasti pomocí popisu signálu časovými značkami:

- t_D doba zpoždění;
- t_r doba čela;
- t_s doba přesahu;
- t_f doba týlu;
- t_{on} doba sepnutí

$$t_{on} = t_d + t_r \approx t_r; \quad (2.9)$$

- T_{off} doba vypnutí

$$t_{off} = t_s + t_f. \quad (2.10)$$



Obr. 2.3 Časové průběhy napětí a proudů při spínání (plnou spínání do saturace, čerchovanou spínání do aktivní oblasti) [1].

Teplotní závislost tranzistoru

Důležitou vlastností pro tranzistory obecně, je jejich teplotní závislost. Spíše než vlastnost by se teplotní závislost tranzistoru dala hodnotit jako citelná nevýhoda, jelikož tento efekt ovlivňuje parametr tranzistoru a tím i průběhy měřených charakteristik.

Vzhledem k této závislosti tranzistoru lze o něm říci, že jde o prvek řízený teplotou, a od toho se musí odvíjet rovněž jednak případná pracoviště specializovaná na jejich měření, ale hlavně přípravky využívající právě tranzistorů ve svých strukturách. Nejúčinnější způsob omezení vlivu teploty na tranzistor je jeho chlazení a to jak aktivní tak pasivní podle maximálního vyzařovaného výkonu tranzistoru, popřípadě podle množství tranzistorů instalovaných v aplikaci. Proto jsou tranzistory určené jako výkonové, do aplikací jakými jsou například zesilovače, umístěny v pouzdrech umožňující dobrý odvod tepla. Návrhu chladiče je věnována kap. 5, ve které je popsán i návrh chladiče celého přípravku. Druhou možností kompenzace teplotního vlivu je použití záporné zpětné vazby.

Kromě okolní teploty musíme tedy zohlednit i teplotu přechodu. Největší ztrátový výkon je na kolektorovém přechodu, což je dáno zápornou polarizací, proto jsou tranzistory konstruovány tak, že největší kontaktní plochu má právě kolektor, aby byl umožněn co nejefektivnější odvod tepla. Takto způsobené ztráty se nazývají kolektorové.

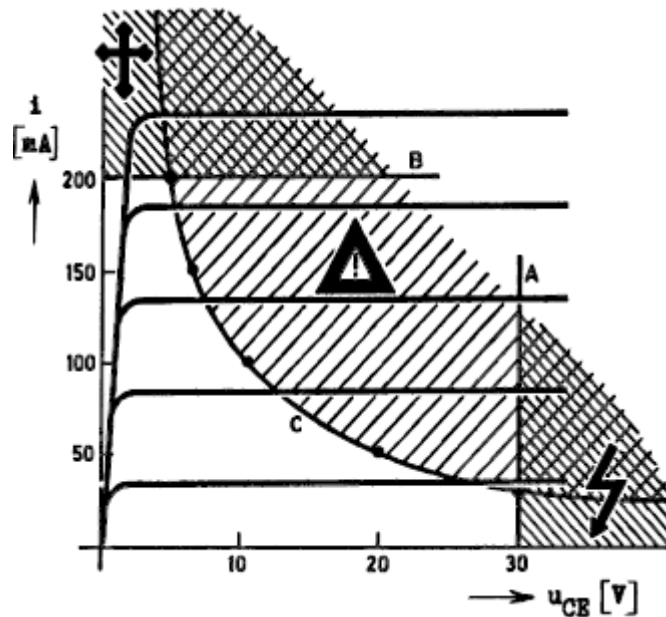
V katalogových listech výrobců tranzistorů bývá u každého vyráběného typu tranzistoru zveřejněn graf závislosti veličin tranzistoru na teplotě. Ukázka je v kap. 4, která je mimo jiné věnována výběru vhodného typu tranzistoru pro mou měřicí aplikaci.

Pracovní oblast charakteristik tranzistoru, kterou lze skutečně využít, je omezena třemi faktory popsanými níže:

1. *maximální kolektorovou ztrátou* PC_{\max} (je určena maximální dovolenou teplotou přechodu a chlazením tranzistoru);
2. *maximálním kolektorovým proudem* IC_{\max} (je určen konstrukcí tranzistoru a dovoleným oteplením);
3. *maximálním kolektorovým napětím* UCE_{\max} (je omezeno průrazem kolektoru).

Na obr. 2.4 jasně vidíme omezení pracovní oblasti tranzistoru, zde konkrétně v zapojení SE s vyznačením maximálních hodnot veličin $U_{CE\max}$, I_{\max} a $P_{C\max}$. Při běžném provozu tranzistoru nesmí pracovní bod překročit čáry A a B a hyperbolu maximální kolektorové ztráty smí překročit jen ve spínacím režimu.

Je-li tranzistor připojen k chladiči jak je již zmíněno výše, je odpovídajícím způsobem zvýšena jeho přípustná kolektorová ztráta. Proto je dobré případná zapojení s tranzistory realizovat i s chladiči [1].

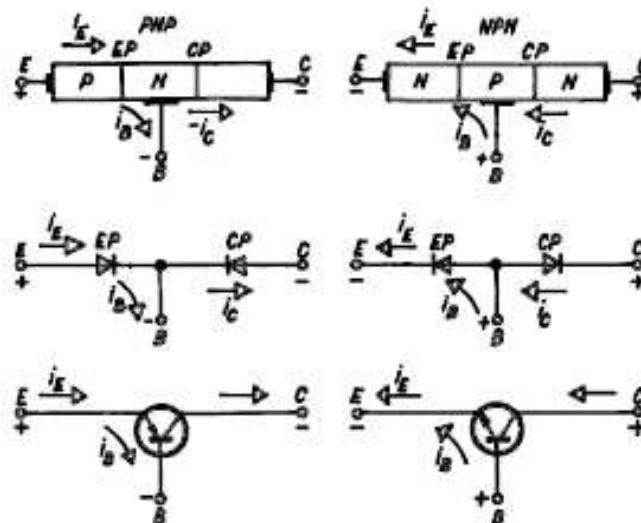


Obr. 2.4 Omezení pracovní oblasti tranzistoru v zapojení SE s vyznačením maximálních veličin: ($U_{CEMax} = 30 \text{ V}$, $I_{Max} = 200 \text{ mA}$ a $P_{CMax} = 1 \text{ W}$) [1].

2.3.2 Základní struktury a vnitřní zapojení bipolárních tranzistorů

Bipolární tranzistor se při odpojené bázi chová jako dvě diody se spojenými anodami, jejichž katody tvoří kolektorovou a emitorovou elektrodu. Po připojení napětí mezi bázi a emitor se nám pak projeví naplno tranzistorový jev, což je umožněno jeho vnitřní strukturou. Náznak vnitřní struktury zapojení tranzistorů je patrné z obr 2.5, na kterém je jasně vidět polarita jednotlivých proudů pro jednotlivá zapojení (PNP, NPN), u kterých hraje roli polarita přiváděného proudu. Při zapojení NPN je nutné na řídicí vstup přivést signál s kladnou polaritou, opačně pak u PNP kde požadujeme signál s polaritou zápornou.

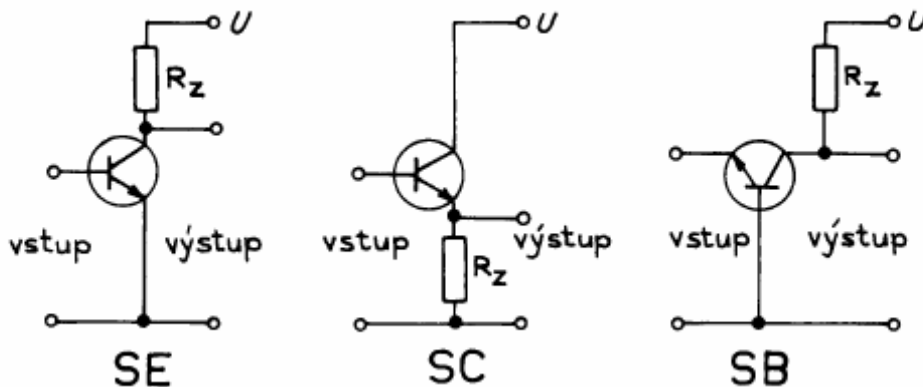
V případě nedodržení této konvence by vůbec nedošlo k otevření tranzistorového přechodu a celý prvek by postrádal svůj význam.



Obr. 2.5 Struktury, zjednodušená diodová náhradní schémata a schematické značky obou typů bipolárních tranzistorů [1].

2.3.3 Základní zapojení bipolárních tranzistorů pro měření statických charakteristik

Na obr. 2.6 jsou zobrazena tři základní zapojení bipolárního tranzistoru NPN s ohledem na jeho vývody označované jako C, B, E (kolektor, báze, emitor). Jeden z vývodů je vždy chápán jako společný, proto jsou zapojení označována jako SB, SE, SC (společná báze, emitor nebo kolektor). Pro tranzistor PNP jsou jednotlivá zapojení totožná, pouze se mění polarita řídicího signálu.



Obr. 2.6 Zapojení tranzistoru NPN a) se společným emitorem, b) se společným kolektorem, c) se společnou bází [1].

Každé z těchto běžně používaných zapojení má své parametry, kterých je schopno dosáhnout. Každé zapojení má rovněž své výhody a nevýhody. Pro jednotlivá zapojení tedy stručně platí:

1) **Zapojení SE:** výkonové zesílení je největší ze všech sledovaných zapojení, ale je velmi závislé na parametru h_{21e} . Napěťové zesílení se pohybuje ve stovkách, ale zapojení otáčí fází 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 $k\Omega$.

2) **Zapojení SC:** napěťové 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 zdrojů s velkým vnitřním odporem (např. krystalové přenosky), nebo k přizpůsobení výstupu zesilovače na malý zatěžovací odpor (např. na koaxiální kabel).

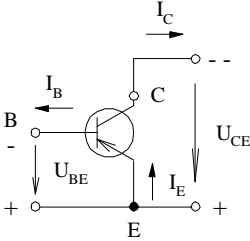
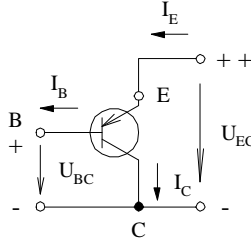
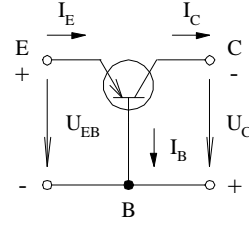
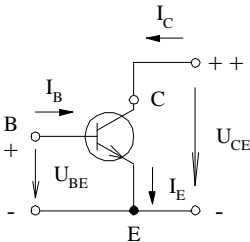
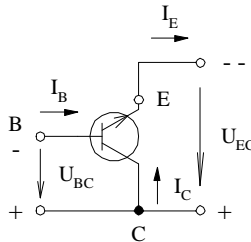
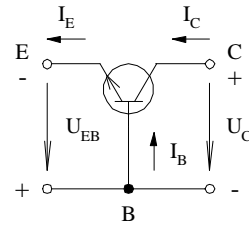
3) **Zapojení SB:** napěťové zesílení je velké (jako u zapojení SE), výstupní signál je ale ve fázi se vstupním. Proudové zesílení je vždy menší než jedna. Vstupní odpor je malý (jednotky až desítky ohmů), výstupní odpor je velký (stovky $k\Omega$ až jednotky $M\Omega$). Zapojení se používá k snímání signálů zdrojů s malým vnitřním odporem (antény, termočlánky).

Shrnutí jednotlivých minimálních požadavků pro práci tranzistoru v daném režimu (PNP, NPN) nalezneme v tab. 2.1, kde jsou zároveň i stručně popsány jeho hlavní vlastnosti v daný okamžik. Tabulka je realizována pro tranzistory v zapojení SE.

Smysl polarizačních proudů a napětí pro jednotlivé typy zapojení s danou vodivostí

Jak již bylo zmíněno výše, pro jednotlivá zapojení jsou zásadní polarity přiváděného signálu. Proto zde pro přehlednost uvádím ještě tabulku naznačující smysl polarizačních proudů a napětí tab. 2.2. Tato tabulka potvrzuje předchozí myšlenku zaobírající se nutností správné volby polarity jak proudů tak napětí pro jednotlivé dva druhy zapojení (NPN a PNP). Tato tabulka nám tedy ukazuje polarity veličin pro tři základní zapojení tranzistoru (SE, SC, SB) jako lineárního zesilovače pro malé signály a pro daný typ vodivosti a navíc nám udává představu o vlastnostech tranzistoru v daném zapojení a jeho zesilovacích účincích.

Tab. 2.2 Smysl polarizačních proudů a napětí pro jednotlivé typy zapojení s danou vodivostí.

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 výstupním napětím a proudem	180° 0°	0° 180°	0° 0°
Výhody	nejlepší přizpůsobení velké zesílení	vhodný jako měnič impedance	nejvyšší f_{mez} vhodný jako měnič impedance

Tab. 2.1 Hlavní vlastnosti bipolárního tranzistoru v zapojení SE v režimech PNP a NPN.

Hlavní vlastnosti tranzistoru NPN	Hlavní vlastnosti tranzistoru PNP
Napětí mezi kolektorem a bází (emitorem) musí být kladné $U_{CB} > 0$	Napětí mezi kolektorem a bází (emitorem) musí být záporné $U_{CB} < 0$
Napětí mezi bází a emitorem musí být kladné $U_{BE} > 0$	Napětí mezi bází a emitorem musí být záporné $U_{BE} < 0$
Dioda mezi bází a emitorem je polarizována v propustném směru	Dioda mezi bází a emitorem je polarizována v propustném směru
Napětí mezi bází a emitorem U_{BE} je rovno napětí na diodě v propustném směru.	Napětí mezi bází a emitorem U_{BE} je rovno napětí na diodě v propustném směru.
Dioda mezi kolektorem a bází je polarizována v závěrném směru	Dioda mezi kolektorem a bází je polarizována v závěrném směru
Je-li přechod mezi bází a emitorem uzavřen, je uzavřen i tranzistor a neprotéká kolektorový proud	Je-li přechod mezi bází a emitorem uzavřen, je uzavřen i tranzistor a neprotéká kolektorový proud
Proudový zesilovací činitel β dosahuje hodnot desítek až stovek. Menší je u výkonových tranzistorů a naopak větší u malovýkonových	Proudový zesilovací činitel β dosahuje hodnot desítek až stovek. Menší je u výkonových tranzistorů a naopak větší u malovýkonových
Saturační napětí je zbytkové napětí mezi kolektorem a emitorem, když je tranzistor plně otevřen	Saturační napětí je zbytkové napětí mezi kolektorem a emitorem, když je tranzistor plně otevřen

2.3.4 Možnosti měření na BJT tranzistorech

Statické charakteristiky tranzistoru

Asi nejčastěji měřené charakteristiky bipolárních tranzistorů jsou takzvané statické charakteristiky vyjadřující závislost proudů, respektive napětí, při určité řídicí veličině takzvaném parametru. Statické charakteristiky bipolárního tranzistoru můžeme názorně vidět na obr. 2.7, který platí pro tranzistor NPN v zapojení se společným emitorem (SE).

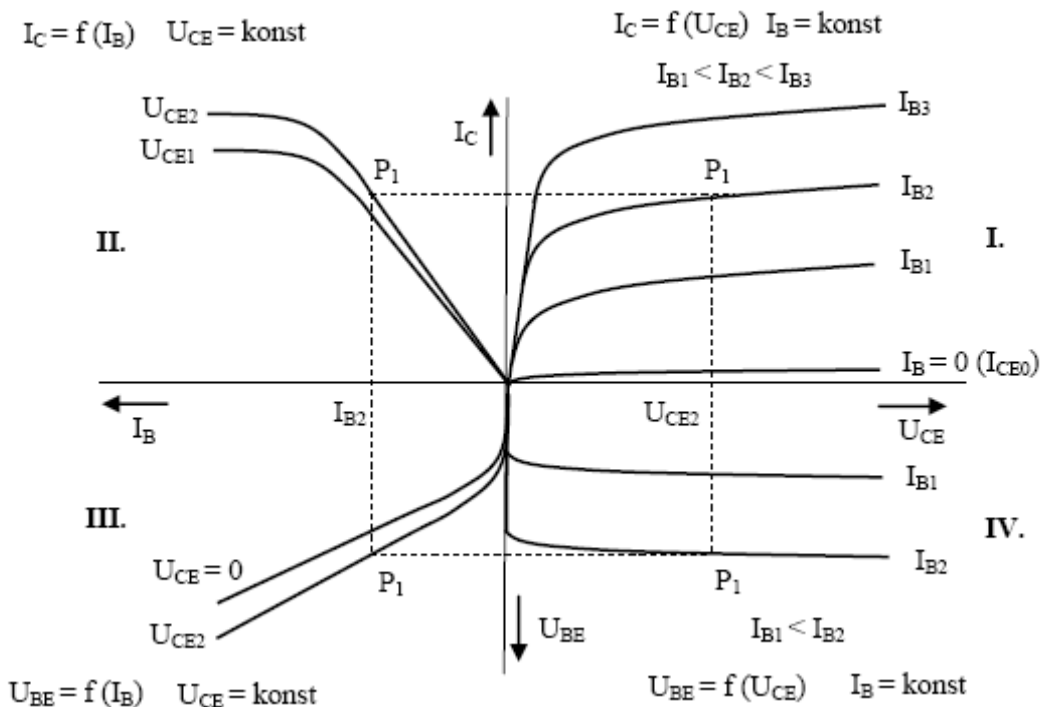
Jednotlivé kvadranty měřených statických charakteristik reprezentující dané závislosti jsou označovány jako:

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

Pro jasnou názornost rozdělení dále reprezentuje obr. 2.8, ze kterého jsou charakteristiky a jejich názvy zcela patrné.

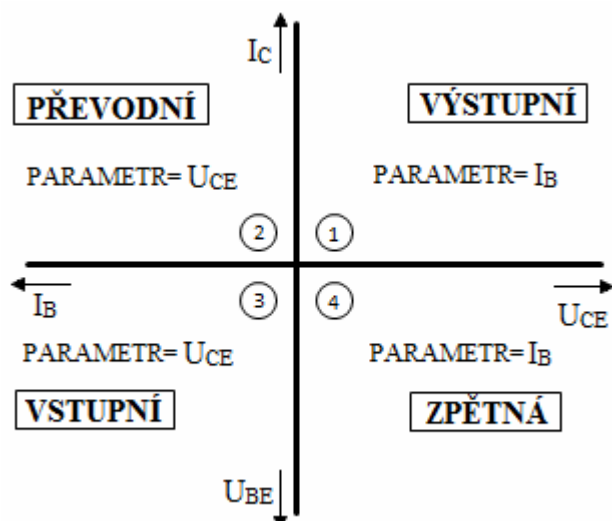
Obecně nám pak statické charakteristiky bipolárního tranzistoru umožňují:

- 1) Přehledným způsobem zjistit statické (klidové) hodnoty proměnných veličin v závislosti na pracovních podmínkách (poloze pracovního bodu) a vhodně nastavit vnější napájecí obvody.
- 2) Stanovit velikosti parametrů (např. h , y) kvazilineárního režimu malých signálů a odhadnout jejich průběh v závislosti na poloze pracovního bodu.
- 3) Graficky řešit statické poměry při vybuzení do režimu velkých signálů, jak je to potřeba při navrhování výkonových zesilovačů a použití tranzistoru jako spínacího prvku.
- 4) Společně se zakreslením mezních čar (I_{Cmax} , U_{CEmax} , P_{Cmax}) zvolit polohu pracovního bodu tak, aby nebyla snížena spolehlivost tranzistoru.
- 5) Odhadnout i některé dynamické vlastnosti tranzistoru v kvazistatickém režimu, jako je velikost zkreslení, průběh výstupního signálu při daném průběhu vstupního napětí atd.



Obr. 2.7 Statické charakteristiky bipolárního tranzistoru NPN pro zapojení SE [21].

Abychom získali lepší přehled o jednotlivých kvadrantech, můžeme si je popsat následujícím způsobem. Tento popis by zároveň mohl sloužit jako jednoduchý návod pro měření v jednotlivých kvadrantech. Nicméně detailnějším popisem měření se zabývám v kap. 3.



Obr. 2.8 Rozdělení kvadrantů statických charakteristik bipolárních tranzistorů.

- **I.kvadrant**

V tomto kvadrantu jsou zaneseny výstupní charakteristiky, které nám dávají představu o závislosti výstupního proudu I_C tranzistoru na výstupním napětí při určité hodnotě proudu báze I_B a vyjadřují vztah

$$I_C = \beta \cdot i_B + I_{CE0} \quad (2.9)$$

Parametrem výstupních charakteristik je jedna ze vstupních veličin, např. může jít o vstupní proud I_B . Druhou vstupní veličinou je napětí U_{BE} . Pro názornost řekněme, že pro určitou velikost proudu báze I_B při zvětšování napětí mezi kolektorem a emitorem od 0 do U_{CEmax} pak průběh odpovídá křivkám I_B viz. obr. 2.5.

Z výstupních charakteristik můžeme rovněž určit statický odpor tranzistoru

$$R_{výst} = \frac{U_{CE}}{I_C} \Big|_{I_B = konst.} \quad (2.10)$$

- **II. kvadrant**

Ve druhém kvadrantu můžeme pozorovat převodní charakteristiky. Kde tyto udávají závislost výstupního proudu I_C na vstupní veličině I_B nebo U_{BE} . Na vodorovné ose musí být pro tento kvadrant vynesena stejný parametr, jaký mají výstupní charakteristiky.

Z převodních charakteristik pak můžeme číst statický proudový zesilovací činitel β jako poměr

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} [-]. \quad (2.12)$$

- **III. kvadrant**

Ve třetím kvadrantu můžeme pozorovat průběhy odpovídající V-A charakteristikám polovodičové diody B-E v propustném směru. Tyto charakteristiky jsou ovlivňovány velikostí U_{CE} , proto je měříme při určitých hodnotách U_{CE} , které je parametrem těchto charakteristik. Ze vstupních charakteristik pak můžeme určit vstupní statický odpor jako poměr:

$$R_{vstupni} = \frac{U_{BE}}{I_B} \Big|_{U_{CE} = U_{CEparam}} \quad (2.13)$$

Vstupní charakteristiky jsou závislé na výstupním napětí pouze málo, proto není potřeba proměřovat velké množství vstupních charakteristik a většinou si vystačíme s jednou, která je směrodatná.

- **IV. kvadrant:**

V tomto kvadrantu jsou vyobrazeny charakteristiky, znázorňující zpětný vliv výstupních parametrů tranzistorů na vstupní. Parametrem je zde stejná vstupní veličina jako u výstupních charakteristik.

Zatěžovací přímka

Význam zjišťování polohy zatěžovací přímky je jasný určením proudu I_C . Po umístění rezistoru R_C do kolektoru je možné zjišťovat právě výše uvedenou velikost kolektorového proudu I_C . Napětí na rezistoru $U_{RC} = R_C \cdot I_C$ je přímo úměrné velikosti proudu I_C , což se nám projeví na velikosti napětí U_{CE} .

$$U_{CE} = U_N - U_{RC} = U_N - R_C \cdot I_C \quad (2.14)$$

Pro konstrukci zatěžovací přímky využijeme výstupních charakteristik 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

Nahlížíme-li se na tranzistor jako na čtyřpól (dvojbran), lze jeho vlastnosti vyjádřit pomocí čtyřpólových rovnic. Pro oblast nízkých kmitočtů se využívají takzvané hybridní parametry (h-parametry) a pro oblast vysokých kmitočtů jsou to pak admitanční parametry (y-parametry). Při použití hybridních parametrů je vstup tranzistoru modelován zapojením pomocí Théveninovy a výstup podle Nortonovy poučky

$$U_{BE} = h_{11} \cdot I_B + h_{22} \cdot U_{CE}, \quad (2.15)$$

$$I_C = h_{21} \cdot I_B + h_{22} \cdot U_{CE} \quad (2.16)$$

Tyto vztahy platí pro zapojení SE viz. kap. 2.3.3.

Vycházíme-li z těchto základních vztahů pak můžeme určit jednotlivé *h-parametry* a jejich význam:

1. vstupní odpor tranzistoru při výstupu nakrátko

$$h_{11} = \frac{U_1}{I_1} \mid U_2 = 0 \quad [\Omega], \quad (2.17)$$

2. zpětný napěťový přenos při vstupu naprázdno

$$h_{12} = \frac{U_1}{U_2} \mid I_1 = 0 \quad [-], \quad (2.18)$$

3. proudový zesilovací činitel při výstupu nakrátko

$$h_{21} = \frac{I_2}{I_1} \mid U_2 = 0 \quad [-], \quad (2.19)$$

4. výstupní vodivost tranzistoru při vstupu naprázdno

$$h_{22} = \frac{I_2}{U_2} \mid I_1 = 0 \quad [S]. \quad (2.20)$$

Výše uvedené vztahy platí pro stejnosměrné parametry, které nám slouží pro popis tranzistoru v určitém pracovním bodě není-li přiveden signál. Jde tedy o vyjádření závislosti stejnosměrných napájecích napětí a proudů. Samozřejmě je možné měřit i střídavé parametry.

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 parametrů jsou velice podobné, pouze využívají střídavých veličin a konstantních hodnot na vstupech potažmo výstupech. Pak můžeme psát:

1. výstupní odpor, zátěž nakrátko

$$h_{11} = \frac{u_1}{i_1} \mid U_2 = konst., u_2 = 0 \quad [\Omega], \quad (2.21)$$

2. zpětný napěťový činitel

$$h_{12} = \frac{u_1}{u_2} \mid I_1 = konst., \quad (2.22)$$

3. proudový zesilovací činitel, zátěž nakrátko

$$h_{21} = \frac{i_2}{i_1} \mid U_2 = konst., u_2 = 0, \quad (2.23)$$

4. výstupní vodivost

$$h_{22} = \frac{i_2}{u_2} \mid I_1 = konst., i_1 = 0 \quad [S]. \quad (2.24)$$

Jak jsem již zmínil výše, je možné model tranzistoru znázornit také pomocí admitančních parametrů. Použijeme-li admitanční parametry, je vstup i výstup tranzistoru modelován pomocí Nortonovy poučky. Vstupní i výstupní parametry jsou pak vyjádřeny jako součet proudů:

$$I_B = y_{11} \cdot U_{BE} + y_{12} \cdot U_{CE}, \quad (2.25)$$

$$I_C = y_{21} \cdot U_{BE} + y_{22} \cdot U_{CE}. \quad (2.26)$$

Tyto vztahy platí pro zapojení SE viz. kap. 2.3.3.

Je známo, že mezi jednotlivými h a y parametry platí vztahy pro jejich vzájemný přepočet. Tyto vztahy jsou uvedeny v tab. 2.3.

Tab. 2.3 Vztahy pro vzájemný přepočet mezi hybridními a admitančními parametry.

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

Tranzistor jako spínač

V kap. 2.1.3 je popsána funkce tranzistoru jako spínače a principiální zapojení ve spínacím režimu, je zde rovněž popsáno. V případě, že popisujeme, respektive máme tranzistor zapojený jako spínač, je nutné přivést na vstup například obdélníkový řídicí signál, podle kterého bude tranzistor řídit sepnutí a rozepnutí. Zapojíme-li na vstup a výstup dvoukanálový osciloskop, můžeme pak porovnávat zkreslení respektive zpoždění signálu způsobené právě tranzistorem. Jednotlivé časy podílející se na zkreslení signálu jsou popsány rovněž v kap. 2.1.3. Zapojení a popis měření tranzistoru ve spínacím režimu jsou popsány v kap. 3. Nevýhodou je nutnost mít k dispozici alespoň dvoukanálový osciloskop, abychom mohli porovnávat rozdíly mezi vstupujícím a vystupujícím signálem a odečítat potřebné časy hran a zkreslení. Zdroj signálu musí umožňovat generování obdélníkových impulsů.

2.4 Unipolární tranzistory

Unipolární tranzistor je založen na principu řízení pohybu nosičů náboje za pomoci elektrického pole. Unipolární tranzistory jsou označovány jako unipolární, proto že k vedení využívají pouze jeden typ nosičů a to buď díry a nebo elektrony. Elektrody unipolárních tranzistorů se označují jako „*drain*“, „*source*“ a „*gate*“. Plní stejnou funkci jako u bipolárních tranzistorů. Mezi elektrodami „*drain*“ a „*source*“ je takzvaný vodivý kanál (P a nebo N), kterým protéká proud. „*Gate*“ jinak řečeno hradlo je kovová elektroda izolovaná od kanálu. Jako izolace se velice často používá oxid křemíku (SiO_2). Na rozdíl od bipolárních tranzistorů jsou unipolární tranzistor řízeny napětím a to tak, že napětím přivedeným na hradlo se nám vodivý kanál buď zužuje nebo rozšiřuje čímž tranzistor otevíráme nebo zavíráme.

Hlavními představiteli unipolárních tranzistorů jsou tranzistory řízené elektrickým polem (FET- z angl. **F**ield **E**ffect **T**ranzistor). Od bipolárního se liší hlavně tím, že kolektorový proud není řízen vstupním proudem, ale napětím jak je již zmíněno výše.

U bipolárních tranzistorů byla vodivost řízena injektováním minoritních nosičů do báze tranzistoru. U unipolárních tranzistorů je vodivost řízena dvěma způsoby a to:

- 1) změnou průřezu vodivého kanálu rozšiřováním depletiční vrstvy přechodu PN nebo MS pólovaného v závěrném směru rozšiřováním závěrné vrstvy, tj. účinkem prostorového náboje přechodu PN;
- 2) změnou koncentrace majoritních nosičů v inverzním kanálu (inverzní povrchové vrstvě) pod izolační vrstvou dielektrika, tj. účinkem indukovaného náboje pod vrstvičkou izolantu.

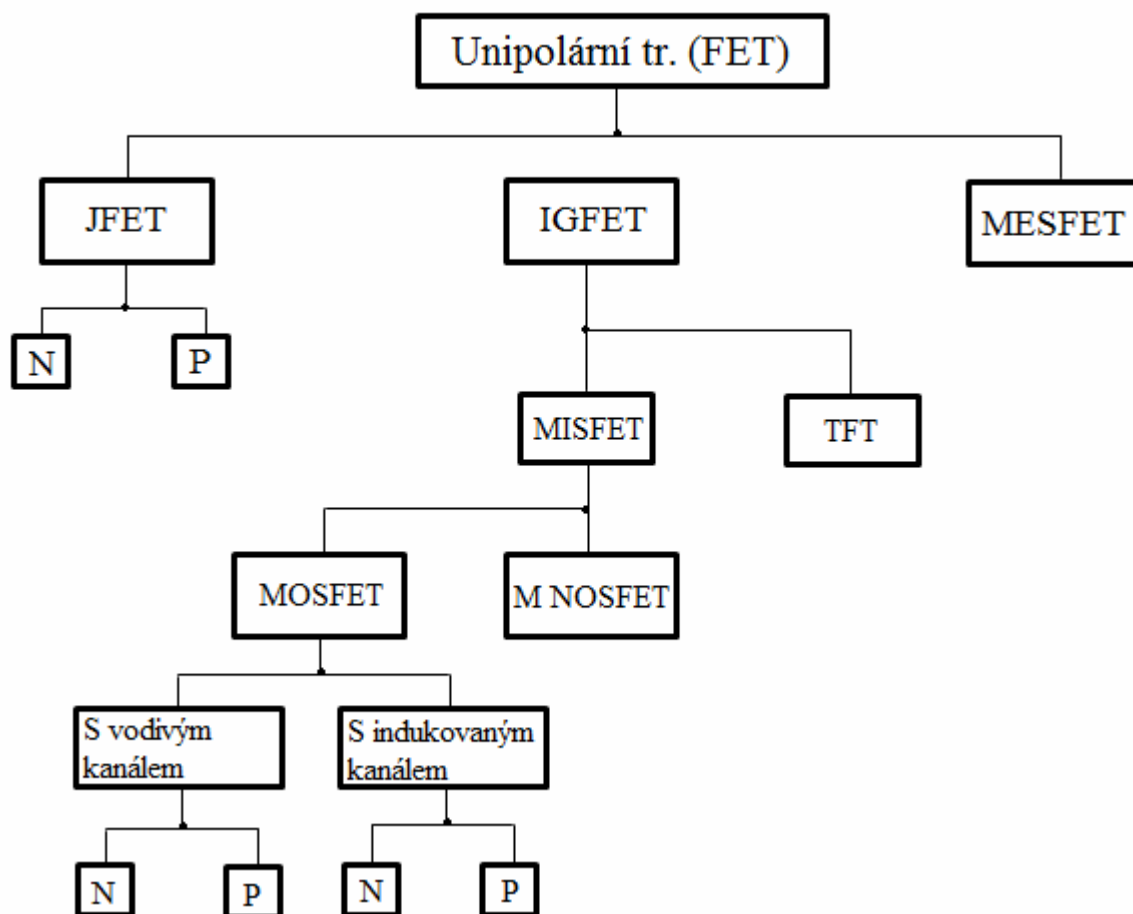
U unipolárních tranzistorů se setkáme s celou škálou typů tranzistorů. Názorná ukáзка rozdělení je uvedena na obr. 2.9.

2.4.1 Použití, základní parametry a princip unipolárních tranzistorů

Hlavní přínos unipolárních tranzistorů je pravděpodobně v oblastech, kde vyžadujeme vysokou hustotu integrace tranzistorových prvků. Na rozdíl od bipolárních tranzistorů, kde z principu funkce je jasné, že primární veličinou ve vstupním obvodu je proud který teče do řídicí elektrody tranzistoru, jsou unipolární tranzistory řízeny napětím. Jejich vstupním obvodem tedy neteče proud (je-li řídicí elektroda izolovaná od řídicího obvodu vrstvičkou SiO_2 – u MOSFETu) nebo jen velmi malý proud odpovídající proudu diody v závěrném směru, což zamezuje vzniku velkého množství Jouleova tepla a umožňuje nám tak vysokou hustotu integrace.

Mezi hlavní vlastnosti unipolárních tranzistorů patří:

- velký vstupní odpor;
- použitelnost na vysokých kmitočtech;
- velká náchylnost na elektrické rušení nebo velký proud řídicí elektrodou.



Obr. 2.9 Ukázka dělení unipolárních tranzistorů.

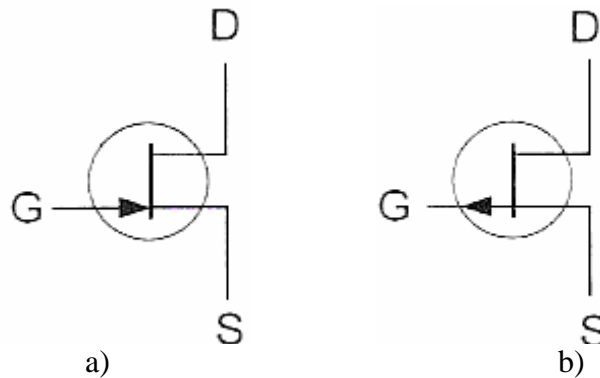
Využití nacházejí bipolární tranzistory jako součásti integrovaných obvodů, jako spínací součástky, v zesilovačích (výkonové) a jako anténní zesilovače (vysokofrekvenční) a v mnoha dalších aplikacích.

Jak je patrné z rozdělení na obr. 2.9, lze unipolární tranzistory rozdělit na dva hlavní typy a to JFET a MOSFET. Pro přiblížení funkce unipolárních tranzistorů využijí typu JFET. Jelikož tyto tranzistory nejsou tak výrazně náchylné na poškození, což je dáno tím že hradlo a kanálu tvoří diodu. Nejčastějším problémem bývá pro unipolární tranzistor překročení mezního napětí hradla vůči kanálu respektive substrátu (MOS).

Podobně jako u bipolárních tranzistorů i u unipolárních rozlišujeme základní zapojení označována SS, SD a SG a stejně jako u bipolárních tranzistorů i zde je nejpoužívanější varianta se společným emitorem (source). Teplotní závislost je menší než u bipolárního tranzistoru. Důvod této závislosti byl zmíněn v úvodu. Základní výhodou je velký vstupní odpor. Na obr. 2.10 je schématická značka patřící unipolárnímu tranzistoru konkrétně JFETu s označenými svorkami, aby byla patrná podobnost s bipolárními tranzistory.

Tento typ tranzistoru je řízen elektrickým polem, u kterého je nahrazen izolant mezi elektrodou a kanálem tranzistoru přechodem PN, který působí v závěrném směru. Základním „kamenem“ JFET tranzistoru je polovodičová destička s nevlastní vodivostí typu N (P), která má na obou koncích kontakty sloužící jako kontaktní plošky pro

vývody. Do dolní a horní stěny základní desky jsou difúzí vytvořeny silně dotované oblasti s opačným typem vodivosti proti základní destičce.

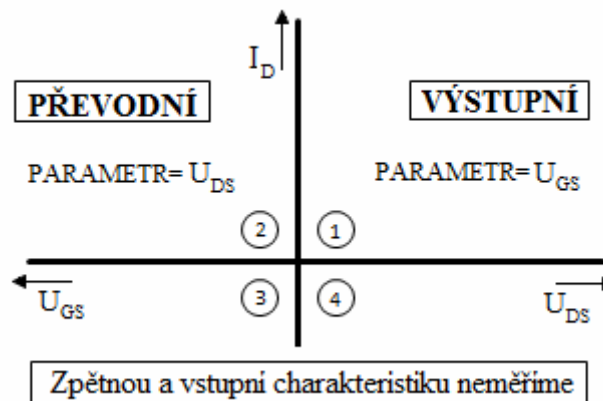


Obr. 2.10 Schématická značka JFET tranzistoru pro a) NJFET, b) PJFET [20].

Pro unipolární tranzistory typu JFET platí jedno zásadní omezení, které říká že přechod P+N nesmí mít v žádném místě kanálu kladné napětí.

2.4.2 Možnosti měření unipolárních tranzistorů a jejich vlastností

Unipolární tranzistor je čtyřpólová součástka z čehož plyne, že pro něj platí měření čtyřpólových charakteristik (měříme však pouze v kvadrantech I. a II.). Na obr. 2.11 je uvedeno rozdělení jednotlivých kvadrantů, které koresponduje s bipolárními tranzistory. Níže uvedené vztahy a ukázky charakteristik platí pro tranzistory typu JFET. Lze tedy psát závislosti pro jednotlivé kvadranty jako:



Obr. 2.11 Rozdělení kvadrantů statických charakteristik unipolárních tranzistorů.

- **I. kvadrant:**

V tomto kvadrantu jsou měřeny tzv. výstupní charakteristiky. Tyto charakteristiky nám dávají představu o závislosti proudu I_D na řídicím napětí U_{DS} při konstantních hodnotách parametru U_{GS} . Ukázka výstupních charakteristik JFET tranzistoru s vodivostí N je na obr. 2.12.

$$I_D = f(U_{DS}) \text{ pro } U_{GS} = \text{konst.} \quad (2.27)$$

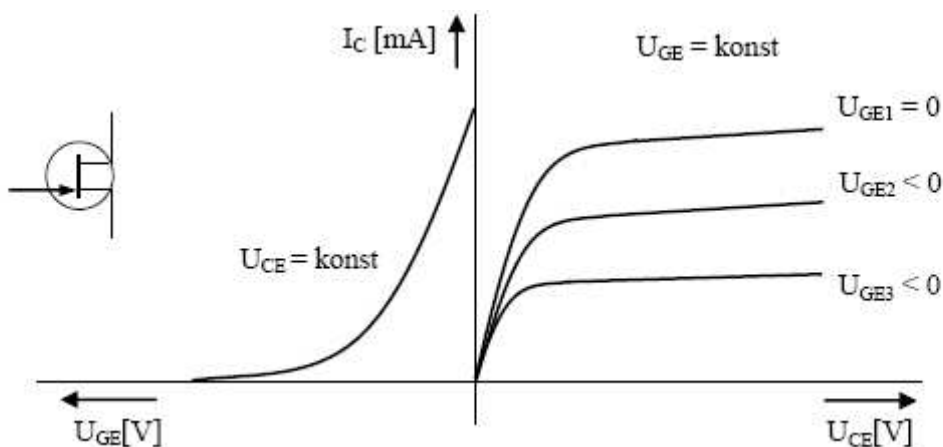
- **II. kvadrant:**

V druhém kvadrantu analogicky jako v případě bipolárních tranzistorů jsou charakteristiky převodní. Jde o závislost proudu I_D na řídicím napětí U_{GS} při konstantních hodnotách napětí U_{DS} . Ukázka je na obr. 2.12. Ze vztahů (2.33) a (2.34) je pak patrné určování parametrů pro jednotlivé kvadranty I. a II.

$$I_D = f(U_{GS}) \text{ pro } U_{DS} = \text{konst.} \quad (2.28)$$

U unipolárních tranzistorů navzdory tomu, že měření čtyřpólových charakteristik je možné, ale zbytečné provádíme zpravidla měření pouze charakteristiky převodní a vstupní jejichž ukázka je znázorněna na obr. 2.12. Důvodem je fakt, že proud hradlem (G) je velice malý (zanedbatelný) při $u_{GS} < 0$ což činí vstupní a zpětnou charakteristiku nepoužitelnou. Někdy se neměří ani převodní charakteristika neboť je snadno určitelná z charakteristiky výstupní.

Na obr. 2.12 je ukázka statických charakteristik (I. a II. kvadrantu) pro JFET unipolární tranzistor s vodivostí N. Je potřeba mít na paměti, že napětí, kterým tranzistor otevíráme respektive zavíráme je dáno typem jeho vodivosti (N nebo P). Lze tedy říci, že je nutné přivést takové napětí, které udržuje řídicí přechod PN v závěrném směru. (Na rozdíl od MOSFETU kde je možné přivést obě polarity).



Obr. 2.12 Statické charakteristiky tranzistoru JFET s vodivostí N (I. a II. kvadrant)[20].

Pro popsání vlastností unipolárních tranzistorů se zpravidla používají admitanční parametry jejich přehled a vztah s parametry impedančními je ukázán v tab. 2.3. Admitanční parametry se pro popis využívají zejména pro jejich vhodnost s ohledem na jejich velké impedance. Níže jsou uvedeny vzorce typické pro zapojení SE (SS)

$$i_1 = y_{11} \cdot u_1 + y_{12} \cdot u_2, \quad (2.29)$$

$$\Delta I_G = y_{11} \cdot \Delta U_{GS} + y_{12} \cdot \Delta U_{DS}, \quad (2.30)$$

$$i_2 = y_{21} \cdot u_1 + y_{22} \cdot u_2, \quad (2.31)$$

$$\Delta I_D = y_{21} \cdot \Delta U_{GS} + y_{22} \cdot \Delta U_{DS}. \quad (2.32)$$

Jelikož však platí $I_G \rightarrow 0$, 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

$$y_{21} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_1} = \frac{i_2}{u_1} \quad \text{pro } u_2 = \Delta U_{DS} = \text{konst.} \quad (2.33)$$

Výstupní admitance nakrátko

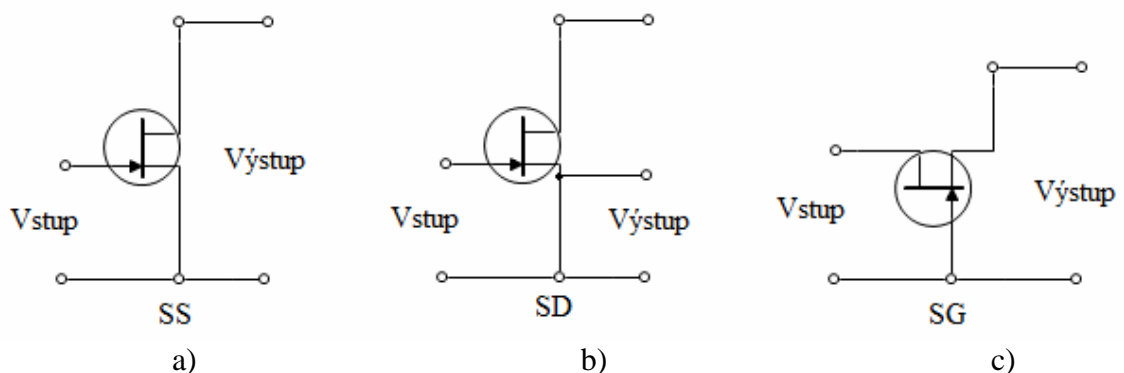
$$y_{22} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{DS}} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} = \frac{i_2}{u_2} \quad \text{pro } u_2 = \Delta U_{GS} = \text{konst.} \quad (2.34)$$

2.4.3 Základní zapojení unipolárních tranzistorů

Jak jsem se již zmínil, principy měření jsou velice podobné jako u bipolárních tranzistorů a proto i základní zapojení jsou obdobná (SG, SS, SD)

- se společným hradlem (gate);
- se společným emitorem (source);
- se společným kolektorem (drain).

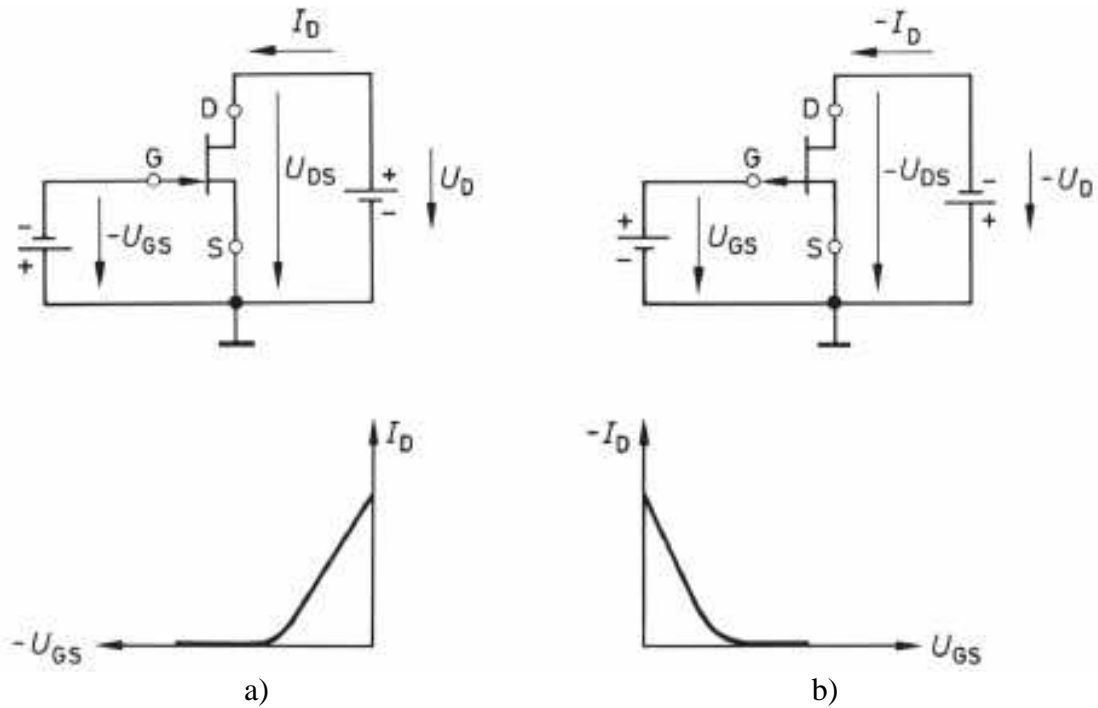
U unipolárních tranzistorů lze říci, že nejpoužívanějším zapojením je zapojení se společným emitorem (source) a se společným kolektorem (drain). U zapojení se společným hradlem je mimo jiné výrazná jeho hlavní nevýhoda a to nezachování velkého vstupního odporu což jej činí v praxi nevyužitelným z hlediska používání FET tranzistorů. Jednotlivá zapojení pro měření vlastností jsou zobrazena na obr. 2.13.



Obr. 2.13 – Zapojení unipolárních tranzistorů (N-JFET) a) společný emitor, b) společný kolektor, c) společné hradlo.

Při měření například statických charakteristik, což je náš případ, je potřeba mít neustále na paměti nutnost dodržování správné polaroty přiváděného napětí pro N respektive P kanálem. Na obr. 2.14 je uveden příklad přiváděných napětí pro oba kanály pro zapojení unipolárního tranzistoru se společným emitorem (SS) a jednotlivé náležitosti převodní charakteristiky, aby byl patrný rozdíl.

Obecně stejně jako bipolární tranzistory nabízejí i tranzistory JFET široké možnosti aplikací, kde je možné je využívat. Pouze namátkou může jít o aplikace určené pro zpracování analogových signálů nebo ve dvoustavových aplikacích. Ve zmíněných spínaných aplikacích je v závislosti na vstupním signálu kanál buď otevřený (má malý odpor) nebo zavřený. Jinak pro spínací režim platí obdobné zásady, jaké jsou popsány v kap. 2.1.3.



Obr. 2.14 Polarita přiváděného napětí na FET tranzistor v zapojení SS.a) kanál N, b) kanál P[20].

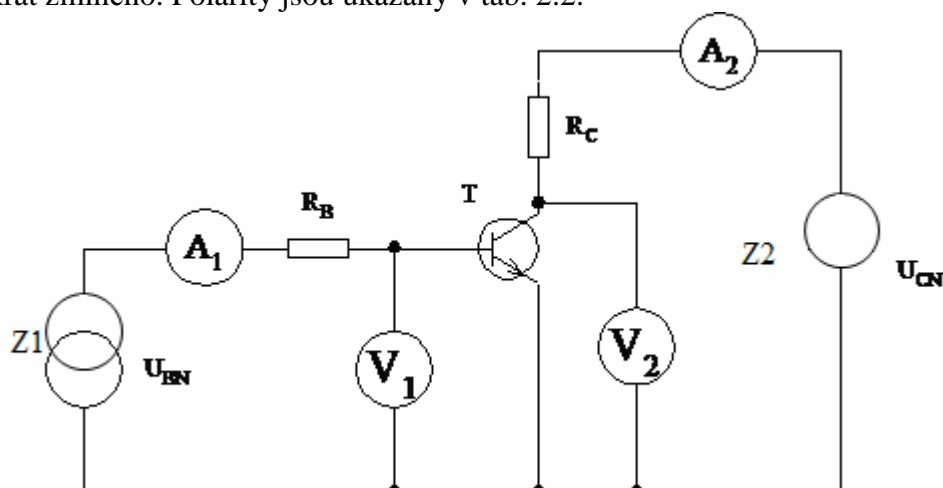
3 Měření na tranzistorech

3.1 Měření na bipolárních tranzistorech

Princip fungování bipolárního tranzistoru je popsán v kap. 2.1 a možnosti měření jsou popisovány v kap. 2.3.4, kde jsou popsány jednotlivé měřené charakteristiky a závislosti v takto měřeném. Tato kapitola je věnována možnostem zapojení a využití jednotlivých přístrojů používaných pro měření, výstupy měření a jejich zpracování a možnosti využití.

3.1.1 Zapojení a postup pro měření statických charakteristik BJT

Na obr. 3.1 je zapojení pro měření statických charakteristik bipolárních tranzistorů v zapojení se společným emitorem (SE). Zapojení je velice podobné pro všechna měření (SB i SC) které jsou na obr. 3.2 a 3.3 směry jednotlivých proudů a napětí, jsou součástí tabulky tab. 2.2. Jednotlivá zapojení se týkají NPN tranzistorů a pro PNP verzi, jsou totožná pouze se mění polarita zdrojů, jak již bylo několikrát zmíněno. Polarita jsou ukázány v tab. 2.2.



Obr. 3.1 Schéma zapojení pro měření statických charakteristik BJT tranzistorů (SE).

V tomto zapojení je využito nastavitelného zdroje proudu, kterým regulujeme proud báze I_B , a nastavitelný zdroj napětí kterým regulujeme napětí mezi kolektorem a emitorem U_{CE} . Pro odečítání proudu I_C použijeme ampérmetr (zde je to A_2). Toto je pouze stručný postup měření výstupních charakteristik tranzistoru NPN v zapojení SE. Detailní postup pro měření je v následujícím odstavci.

Princip měření statických charakteristik (výstupních)

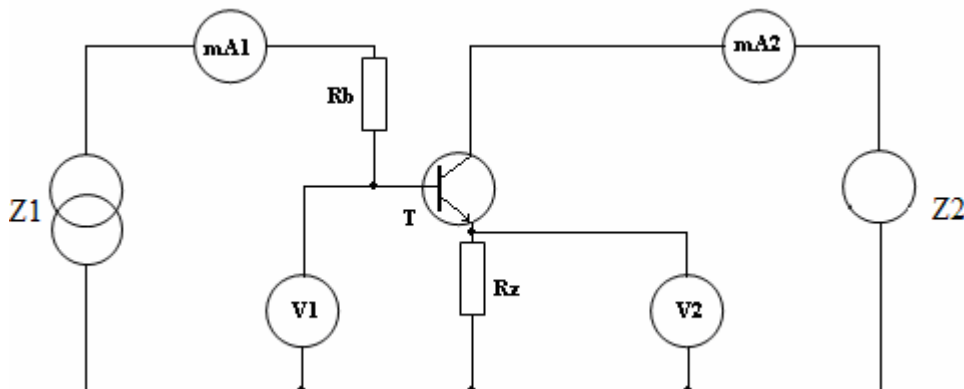
1. Proud báze musíme nastavit na určitou hodnotu, vždy vycházíme z katalogových hodnot. Nesmíme překročit uvedené mezní hodnoty a katalog nám dává dobrou představu, v jakých hodnotách by se měl nastavovaný proud pohybovat. Proud báze je pro měření každé jedné charakteristiky vždy po celou dobu jejího měření konstantní a po jejím odměření se mění jeho hodnota na další požadovanou hodnotu pro měření;

2. dalším krokem je postupné nastavování napětí U_{CE} vždy od nulové hodnoty až po maximum dané katalogým listem. Není nezbytně nutné dosáhnout U_{CEmax} , jelikož charakteristika se stává od určité hodnoty U_{CE} lineární, je tedy zbytečné proměřovat ji celou. Ušetříme tak čas pro měření jednotlivých „laloků“ charakteristiky ale i samotný tranzistor;
3. proud I_C odečítáme pro každé jednotlivé nastavené napětí U_{CE} ;
4. dalším bodem je pak zpracování naměřených hodnot ve vhodné formě. Naměřené hodnoty tedy vyneseme do grafu.

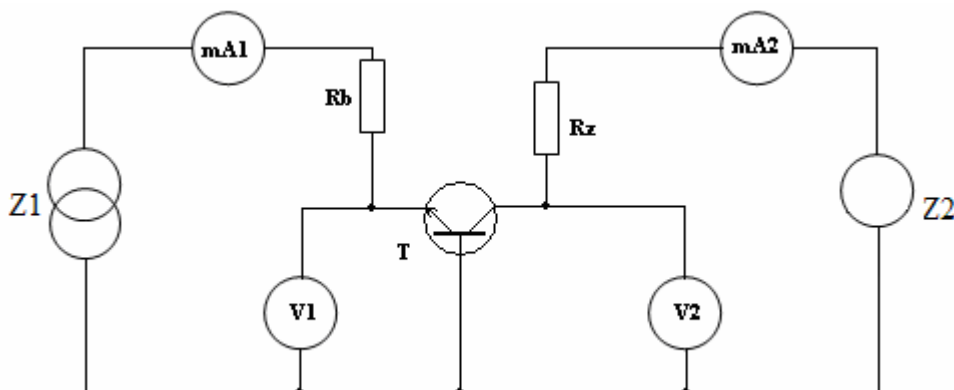
Stejný postup lze aplikovat i pro měření výstupních charakteristik pro zapojení SB a SC, kde jediným rozdílem je parametr vstupních charakteristik, kde u SB je jím proud I_E a zapojení tranzistoru.

Obdobným způsobem se měří i zbylé charakteristiky princip se liší pouze v řídicích, nastavovaných a odečítaných veličinách což je popsáno v kap. 2.3.4.

Výstupem takového měření je tedy soustava charakteristik tranzistoru, ze které lze stanovit například výše zmiňované hybridní parametry, pracovní oblast a oblast saturace tranzistoru a další parametry.



Obr. 3.2 Schéma zapojení pro měření statických charakteristik BJT tranzistorů (SC).



Obr. 3.3 Schéma zapojení pro měření statických charakteristik BJT tranzistorů (SB).

3.1.2 Nastavení přípravku pro měření statických charakteristik

Popis přípravku a pracoviště je součástí kap. 4 a 5, zde jsou jednotlivá nastavení přepínačů pro měření bipolárních tranzistorů v zapojeních SE, SB a SC.

Jak je uvedeno v dokumentaci použitých součástek, v zapojení se nachází pětice páčkových přepínačů umožňujících nám modifikaci měřicího zapojení. Na obr. 3.4 je zjednodušeně zobrazen přepínač a možné polohy páčky. Ve skutečnosti je přípravek zakryt deskou, na které jsou označeny polohy přepínače. V tab. 3.1 jsou uvedeny jednotlivé polohy přepínačů, ve kterých musejí být, aby byl obvod zapojen v požadovaném režimu. Tabulka vychází z obr. 3.4.



Obr. 3.4 Označení poloh páčkového přepínače.

Tab. 3.1 Nastavení páčkových přepínačů pro jednotlivá zapojení pro BJT.

Zapojení	SE	SC	SB
	Poloha	Poloha	Poloha
Přepínač			
SW1	2	1	2
SW2	2	2	1
SW3	1	2	1
SW4	2	1	1
SW5	2	2	1

Po změření jednotlivých charakteristik v požadovaném zapojení tranzistoru a zapsání hodnot do tabulek, provedeme buď na milimetrový papír, nebo pomocí nějakého editoru grafů vynesení naměřených hodnot do příslušného kvadrantu a sestavíme tak soustavu statických charakteristik bipolárního tranzistoru jak je popsána v kap. 2.

3.1.3 Příprava tabulek pro měření

Tabulky je potřeba navrhnout tak, aby pokryly dostatečnou plochu charakteristiky a z naměřených hodnot pak byl jasný její průběh. Ke správnému návrhu můžeme použít například katalogové listy měřených prvků, ze kterých zjistíme přibližné hodnoty, které je potřeba nastavit, aby odečtené hodnoty měly potřebnou vypovídací úroveň. Ukázka tabulky pro vstupní charakteristiky je v tab. 3.2. Další tabulky jsou podobné a liší se pouze v nastavovaných a odečítaných veličinách, které jsou popisovány v kap. 2.3.4.

Tab. 3.2 Ukázka tabulky pro měření vstupních charakteristik BJT tranzistoru (SE).

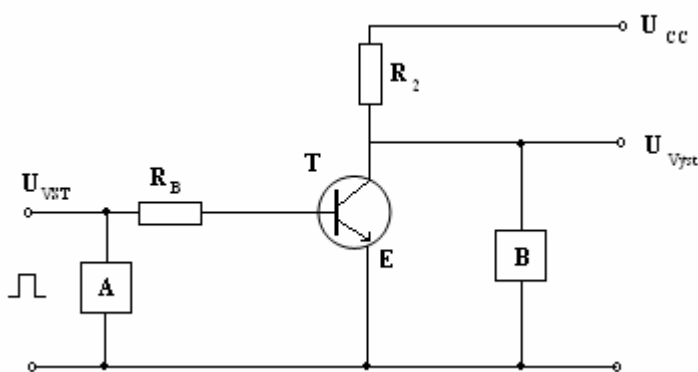
Č.m.	$U_{CE} = \dots V$		$U_{CE} = \dots V$		$U_{CE} = \dots V$	
	$U_{BE} [V]$	$I_B [\mu A]$	$U_{BE} [V]$	$I_B [\mu A]$	$U_{BE} [V]$	$I_B [\mu A]$
1						
2						
3						
4						
5						

3.1.4 Zpracování naměřených hodnot do grafů

Jak už jsem jednou zmínil, naměřené hodnoty je potřeba vykreslit do patřičných kvadrantů, tedy podle nastavovaných odečítaných a řídicích veličin. Grafy je možno kreslit ručně na milimetrový papír, ale snazší je použít program pro zpracovávání hodnot, který nám potřebné křivky vykreslí do zadaného souřadného systému a umožní nám snadný popis naměřených charakteristik. Dále můžeme naměřené hodnoty využít pro výpočet např. hybridních parametrů viz. kap. 2.3.4. V kap. 8 je ukázka naměřených a zpracovaných hodnot pro realizovaný přípravek.

3.1.5 Zapojení a postup měření tranzistoru ve spínacím režimu (řízený odpor)

V kapitole 2.1.3 je zmíněna teorie funkce tranzistoru jako spínače. Zde je popsán návod a ukázán návrh zapojení (obr. 3.6) pro měření časových závislostí spínání bipolárního tranzistoru. Jak jsem už zmínil, nejčastěji bývá tranzistor zapojen se společným editorem, neboť nám na ovládání stačí podstatně menší výkon, než např. u zapojení SB. Pracoviště musí být modifikováno respektive rozšířeno o zdroj obdélníkových impulsů a dvoukanálový osciloskop.



Obr. 3.6 Schéma zapojení pro měření tranzistoru ve spínacím režimu.

Přípravek nastavíme podle **tab. 3.1** tak, aby byl tranzistor vhodně zapojen podle požadavků zadání.

Princip měření je snadný, na vstup přivádíme obdélníkový signál dále pak napájecí napětí U_{CC} .

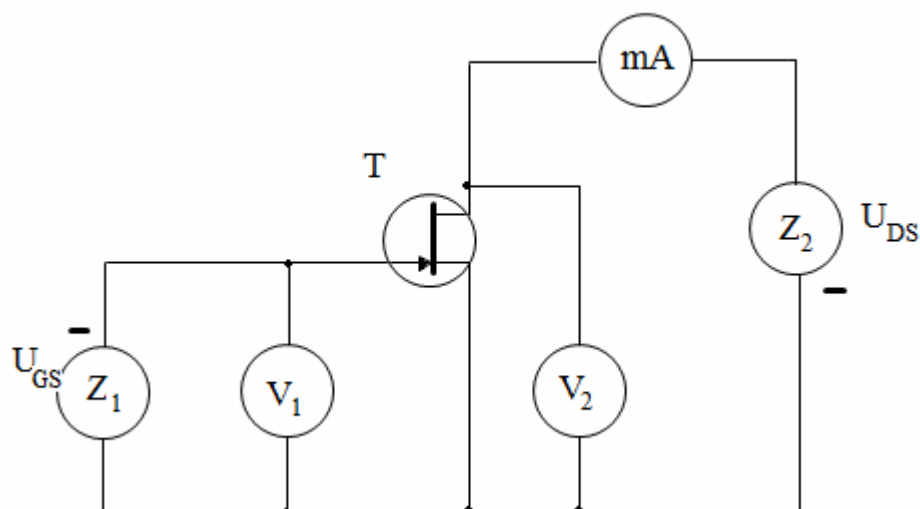
Vstupní a výstupní signál kontrolujeme pomocí dvoukanálového osciloskopu. Výstupní signál je oproti vstupnímu zkreslen (posunut). Pomocí kurzorů na osciloskopu určíme zkreslení signálu viz kap. 2.1.3 a zakreslíme vstupní a výstupní signál na milimetrový papír i s vyznačením časů jednotlivých zkreslení. V případě že máme pracoviště vybaveno tiskárnou připojenou k osciloskopu je možné průběhy vytisknout. Další možností je jejich přímé zpracování na PC je-li k dispozici počítač a sběrnice pro připojení měřících přístrojů. Výstupem měření jsou časové průběhy signálu na vstupu a výstupu obvodu a zkreslení respektive posunutí výstupního signálu.

3.2 Měření na unipolárních tranzistorech

V kap. 2.2 je popsán princip fungování obecně FET tranzistorů a možnosti měření charakteristik na které s zaměřují, jsou pak zmíněny v kap. 2.4.3, kde s zaměřují na jednotlivé měřené statické charakteristiky, jejich závislosti a zjistitelné parametry měřeného JFET tranzistoru. V této kapitole jsou zmíněny zapojení nejčastěji používané pro měření statických charakteristik unipolárního tranzistoru, používané přístroje a možnosti využití naměřených hodnot z praktického hlediska.

3.2.1 Zapojení a postup pro měření statických charakteristik FET

Jak již bylo několikrát zmíněno např. v kap. 2.4.3 je možno i unipolární tranzistor zapojit do obvodu několika různými způsoby a pro tato zapojení viz. obr. 2.13 měřit statické (vstupní a převodní) charakteristiky přiloženého tranzistoru. Na obr. 3.7 je tedy uvedeno zapojení pro měření statických charakteristik na JFET tranzistoru s N kanálem v zapojení SS (společný source). Jde o obdobu zapojení SE u bipolárních tranzistorů. Dále na obr. 3.8 je zapojení SD. Zapojení SG se obvykle neproměruje pro jeho nevhodné vlastnosti. Stejná zapojení pouze s odlišnou polaritou přiváděného napětí platí i pro kanál P tranzistoru JFET. V tab. 2.4 jsou pak ukázány polarity jednotlivých zapojení pro oba kanály.



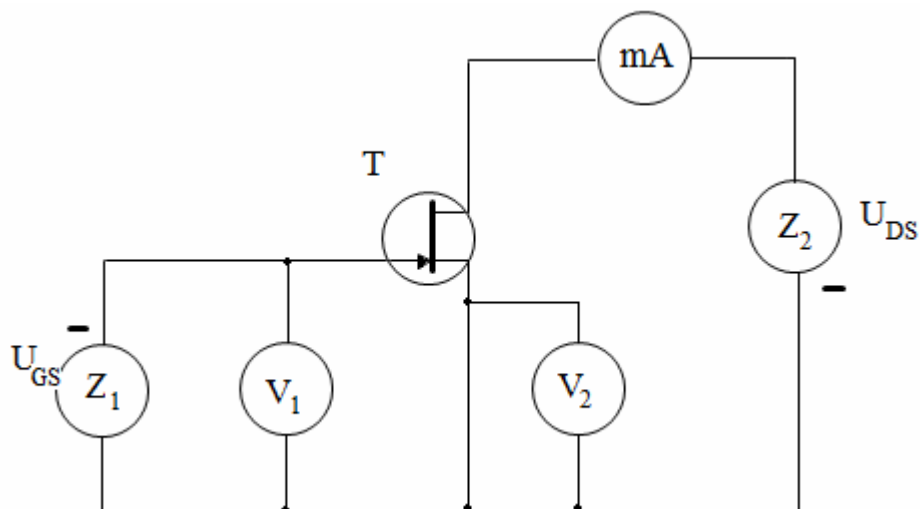
Obr. 3.7 Zapojení pro měření statických charakteristik tranzistoru NJFET v zapojení SS.

V zapojení je využito dvou nastavitelných zdrojů napětí. Z definic pro jednotlivé kvadranty vyplývá potřeba těchto dvou zdrojů, kde pro výstupní charakteristiky nastavujeme napětí U_{DS} při pro jednotlivé charakteristiky vždy konstantní hodnotě napětí U_{GS} a ampérmetrem odečítáme proud I_D . Tak lze ve stručnosti popsat měření výstupních charakteristik tranzistoru JFET v zapojení SS s N kanálem.

Princip měření statických charakteristik (výstupních)

1. Při měření výstupních charakteristik jak je popsáno výše je nejprve potřeba nastavit určitou hodnotu napětí U_{GS} a tato hodnota zůstává v průběhu měření pro každou jednu výstupní charakteristiku konstantní. Je potřeba dbát na polaritu přiváděného proudu podle kanálu tranzistoru. Po odměření charakteristiky vždy nastavíme novou hodnotu tohoto napětí a měření opakujeme;
2. máme tedy nastavený proud U_{GS} a nyní můžeme začít pro danou charakteristiku nastavovat řídicí veličinu a tou je napětí U_{DS} měřit začínáme vždy od nulové hodnoty až po maximum dané katalogem. Vzhledem k tomu, že charakteristika se časem linearizuje není nezbytně nutné proměřovat ji až do hodnoty U_{DSmax} stejně jako u bipolárních tranzistorů šetříme tím nejen čas potřebný k měření ale i tranzistor samotný;
3. pro každou jednotlivou hodnotu U_{DS} pro danou křivku odečítáme hodnotu proudu I_D ;
4. naměřené hodnoty zpracujeme do grafu.

Pro měření v jiných zapojeních je postup vždy stejný jediným rozdílem je pak pouze zapojení a parametr. Stejně jako výstupní charakteristiky se měří i převodní pouze se liší parametr a řídicí a odečítaná veličina viz. kap. 2.4.2. Po změření charakteristik dostaneme jejich soustavu, která nám může sloužit pro určení např. pracovního bodu, admitančních parametrů, a všeobecně lépe zjistit vlastnosti předloženého prvku.



Obr. 3.8 Zapojení pro měření statických charakteristik tranzistoru NJFET v zapojení SD.

3.2.2 Nastavení přípravku pro měření statických charakteristik

Popis přípravku a pracoviště je součástí kap. 4 a 5, zde jsou jednotlivá nastavení přepínačů pro měření unipolárních tranzistorů v zapojení SS, SG a SD.

Jak je uvedeno v dokumentaci použitých součástek, v zapojení se nachází pětice páčkových přepínačů umožňujících nám modifikaci zapojení. Na obr. 3.4 je zjednodušeně zobrazen přepínač a možné polohy páčky. Ve skutečnosti je přípravek zakryt deskou, na které jsou označeny polohy přepínače. V tab. 3.2 jsou polohy přepínačů, ve kterých musejí být, aby byl obvod zapojen v požadovaném režimu. Tabulka vychází z obr. 3.9.



Obr. 3.9 Označení poloh páčkového přepínače.

Tab. 3.2 Nastavení páčkových přepínačů pro jednotlivá zapojení pro unipolární tranzistoru.

Zapojení	SS	SD	SG
	Poloha	Poloha	Poloha
Přepínač			
SW1	2	1	2
SW2	2	2	1
SW3	1	2	1
SW4	2	1	1
SW5	2	2	1

Další kroky potřebné pro bezproblémový průběh měření jsou téměř zcela shodné s kroky při měření BJT tranzistorů. Tedy postup při přípravě tabulek, zpracování naměřených hodnot a podobně je v kap. 3.1.3, 3.1.4, a 3.1.5.

4 Pracoviště

4.1 Skladba pracoviště a využívané přístroje

Pracoviště, na kterém bude využíván přípravek a na němž bude umožněno měření charakteristik tranzistorů, bude opatřeno jednak tedy přípravkem samotným, dále pak zdrojem Agilent typ E3631A (kap. 4.1.1) a multimetry Agilent typ 34410A (kap. 4.1.2). Tyto přístroje je zároveň možno jednoduše připojit k PC a pomocí toho realizovat automatizovanou měřicí úlohu pomocí aplikace *Agilent VEE Pro*. Dále je samozřejmostí příslušný počet propojovacích kabelů s patřičným zakončením a případně PC stanice vybavena výše zmíněným programovacím prostředím *Agilent VEE Pro*, které se využívá v kombinaci s měřicími přístroji pro programování automatizovaných měřících úloh.

4.1.1 Zdroj

Jak bylo již zmíněno, jde o zdroj od firmy Agilent Technologies s typovým označením E3631A. Jde o 80 W trojitý zdroj. Umožňující napájení jednak 6 V stejnosměrně na výstupu 1 při proudu 0 – 5 A a dále + 25 V (1A) na výstupu 2 a nakonec -25V (1A) na výstupu 3. Tento typ zdroje umožňuje velice jemné nastavování výstupních parametrů a měření. Výrobce udávané hodnoty přesnosti při teplotě 25°C ±5°C jsou jak pro programování, tak pro měření totožné a sice:

- napětí: 0,05 % + 10 mV, 0,05 % + 10 mV, 0,1 % + 5 mV;
- proud: 0,15 % + 4 mA, 0,15 % + 4 mA, 0,2 % + 10 mA.

Tento zdroj je možné pro měření využívat bez dalších měřících přístrojů sloužících pro kontrolu velikosti nastavovaných parametrů. Pro přesná měření je však dobré používat v kombinaci s tímto zdrojem i další měřicí přístroj, což nám umožní jemnější a přesnější korekci nastavovaných hodnot.

Katalogové listy pro příslušný přístroj by měl být vždy k dispozici na pracovišti, abychom znali mezní hodnoty přístroje a v případě velice přesných měření zahrnujících i chyby přístrojů slouží pro zjištění přesností přístroje garantovaných výrobcem. Toto platí pro přístroje a měření všeobecně ne pouze pro tento daný zdroj.

4.1.2 Multimetry

Multimetr je rovněž produktem firmy Agilent Technologies s typovým označením 34410A. Jde o rychlý 6½ místný digitální multimetr. Tento přístroj lze připojit k PC stanici prostřednictvím USB či GPIB rozhraní a tudíž jej použít v automatizovaných měřících aplikacích. Jde o velice přesné zařízení umožňující kromě měření proudů a napětí také měření teploty a kapacity. Přístroj disponuje rychlostí až 10 000 odečtů/s při rozlišení 6½ a zároveň i přenos do PC právě prostřednictvím zmíněných portů. Přístroj samotný je vybaven pojistkami proti úrazu elektrickým proudem a proti poškození přístroje. Nesmí však dojít k překročení maximálních hodnot, které jsou uvedeny jak v katalogových listech přístroje, tak na předním a zadním panelu u jednotlivých svorek.

Pro přesná měření je opět k dispozici katalogový list od výrobce, obsahující tabulky přesností pro jednotlivé typy měření a vnější vlivy (teplota).

4.1.3 Přípravek pro měření

Pro samotné měření bude využíván univerzální přípravek umožňující výměnu měřeného typu tranzistoru rovněž s možností záměny typu vodivosti (PNP a NPN) a zároveň možnost obměny zapojení se společnou bází, emitorem a kolektorem (SB, SE, SC). Právě přípravek je hlavním výstupem této práce a je mu věnována kap. 5. Jednotlivým možnostem zapojení a měření tranzistoru se hlouběji věnuje kap. 3, kde jsou rozebrány kromě zapojení i jednotlivé charakteristiky a způsob jakým se tyto charakteristiky měří. To znamená nastavované a odečítané parametry respektive naměřené hodnoty pro jednotlivé typy tranzistoru, zapojení a příslušné měřené charakteristiky.

Na přípravku je rovněž možno měřit statické charakteristiky unipolárních tranzistorů a to za pomoci redukce umožňující snadné připojení unipolárního (FET) tranzistoru na stávající patici. V kap. 3 je zmíněno nastavování přípravku pro měření zmíněných charakteristik a v kap. 5 se věnují popisu redukce a volby tranzistorů pro měření.

4.1.4 PC stanice s aplikací Agilent VEE Pro a příslušenstvím

Pomocí počítače a vývojové aplikace Agilent VEE Pro lze automatizovat běžné měřicí úlohy a zpracování naměřených dat. Vývojové prostředí nám umožňuje přesně nadefinovat jednotlivé kroky potřebné ke korektnímu odměření požadované závislosti měřené součástky v mém případě tranzistoru. Značnou výhodou je kromě automatizace měření i možnost poměrně snadného zpracování výstupních dat, které je ukládáno v počítači a umožňuje použití v dalších aplikacích nebo například vykreslení grafických závislostí, můžeme nastavit přímo jako jeden z výstupů našeho automatizovaného měření. Samozřejmostí je možnost tisku či exportu dat, je-li připojeno potřebné zařízení a je-li program vhodně navržen.

5 Návrh přípravku

Tranzistoru jako prvku, ať už unipolárnímu nebo bipolárnímu, jsem se věnoval v kap. 2 a jednotlivé možnosti řešení zapojení pro měření daných charakteristik, jsou rozebrány v kap. 3. Tato kapitola je věnována návrhu a vývoji univerzálního přípravku sloužícího právě pro měření, která jsou uváděna v kap. 3 a podrobněji rozebrána a navržena v kap. 7.

5.1 Vyhodnocení požadavků měření

Hlavním požadavkem na přípravek byla jeho univerzálnost pro dostupná měření a snadná manipulace právě při obměnách měřeného prvku. Navíc je přípravek opatřen možností změny zapojení, což bylo již několikrát zmíněno. Přípravek by měl být přehledný, snadno dostupný pro obměny, ale zároveň zajišťující jistou míru zabezpečení proti zbytečnému kontaktu měřícího studenta s vodivými cestami a zapojením samotným. Přípravek je koncipován pro měření tranzistorů v pouzdrech s označením TO220 v případě bipolárních tranzistorů a v případě unipolárních jsem volil tranzistory v pouzdře TO-92 (nejde o tranzistory výkonové). Výběru typu tranzistoru a popisu pouzdra je věnována kap. 5.2.1

Přípravek je realizován pomocí dvou desek plošných spojů, kde jedna slouží právě pro rozvedení vodivých cest a rozložení součástek nezbytných pro toto měření. A druhá deska slouží spíše jako „kryt“, lépe řečeno oddělení měřitele a zapojení a zároveň pro zpevnění uchycení jednotlivých konektorů a přepínačů, které jsou použity. Zároveň jsou na ní označeny příslušné svorky a přepínače, aby byl přípravek pro měřitele přehledný a jasný, aby nedošlo např. k záměně svorek či nastavení přepínače do špatné polohy.

Ze zadní strany desky spojů je pak umístěna patice respektive svorkovnice, sloužící pro uchycení tranzistoru a vodivé propojení se stranou spojů tudíž začlenění měřeného tranzistoru do měřícího obvodu. Dále pak chladič sloužící pro odvod tepla z kolektorové svorky tranzistoru. A distanční sloupky sloužící jako „nožky“ pro stabilizaci přípravku na pracovišti. A jako rozšiřující prvek redukce pro snazší připojení unipolárních tranzistorů z toho důvodu, že tranzistor v pouzdru TO-92 má jinak rozvrženy vývody.

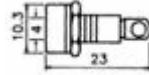
5.2 Použité technologie, součástky a konstrukční prvky

V této podkapitole bude věnována prostředkům použitým pro vývoj přípravku a výběru součástí použitých v zapojení. Dále se zde věnuji výběru vhodných typů tranzistorů pro měření. V závěru je popsána technologie výroby desky plošných spojů, která se pro výrobu přípravku využívala.

5.2.1 Použité součástky

- *DPS*: základem celé konstrukce je deska plošných spojů vyrobená z materiálu FR4. Dále pak horní deska rovněž z FR4, sloužící pro zpevnění konstrukce přehlednost a upevnění konektorů.

- *Konektory*: typové označení SBZ v počtu 16 kusů. Vybrány byly hlavně kvůli své snadné instalaci a vhodné výšce, která koresponduje s distanční výškou přepínačů, což nám umožňuje instalaci do stejné roviny a zapuštění do vrchní desky obr. 5.1.



Obr. 5.1 Konektor SBZ [7].

- *Páčkové přepínače*: byl zvolen jednopólový a dvoupolohový páčkový přepínač s typovým označením MTS500 APC uzpůsobený pro snadnou montáž přímo na DPS. Přepínač je uzpůsoben pro 2,5A/250V. Zvolen byl stejně jako konektory pro svou vhodnou korigovatelnou distanční výšku, obr. 5.2.



Obr. 5.2 Páčkový přepínač MTS 500 APC.

- *Rezistory*: byly zvoleny drátové s keramickým tělískem, výkonové (5 W +/- 5 %) s typovým označením AX5W. Hodnoty odporů: 33 Ω, 5 Ω a 10 Ω. Rezistory plní v obvodu ochranou a zatěžovací funkci.
- *Chladič*: slouží k odvodu tepla ze stykové plochy tranzistoru. Jeho návrh je následující:

1) Stanovíme teplotu pouzdra

$$v_C = v_T - P_{\max} (R_{tv} - R_{ts}), \quad (5.1)$$

- kde
- v_C - teplota pouzdra;
 - v_T - maximální teplota čipu;
 - P_{\max} - maximální ztrátový výkon;
 - R_{tv} - katalogová hodnota tepelného odporu pouzdro -> přechod;
 - R_{ts} - tepelný odpor pouzdro -> chladič (v případě že je použita elektrická izolace v podobě slídové podložky je nutno tuto brát podložku v úvahu a připočítat jí k celkové hodnotě).

2) Tepelný odpor chladiče

$$R_{tc} = \frac{T_C - T_o}{P}, \quad (5.2)$$

- kde
- T_C - teplota okolí;
 - T_C - teplota pouzdra;
 - P_{tot} - maximální ztrátový výkon.

3) Maximální ztrátový výkon součástky

$$P_{C \max} = I_C \cdot U_{CE} \cdot \quad (5.3)$$

4) Výslednou plochu chladiče stanovíme následujícím způsobem:

$$S = \frac{C_1 \cdot 7,6 \cdot 10^2 \cdot C_2}{R_{tc} - C_1 \cdot 2,73} \cdot \quad (5.4)$$

Po dosazení vyšla plocha chladiče pro zvolený typ tranzistoru přibližně $S=90\text{cm}^2$. Což přibližně odpovídá rozměrům 10×10 cm. Chceme-li ušetřit plochu, respektive místo, je možné chladič dimenzovat tak že „paprsky“ chladiče budou ohnuty do tvaru písmene U a chladič bude potažen černou matnou barvou. Tím snížíme plochu potřebnou pro chladič.

Pro unipolární tranzistory, které jsem z praktických důvodů volil nízkou výkonovou, není chladič nutný, proto při zapojení unipolárního tranzistoru nemá měřený prvek kontakt se stykovou plochou chladiče.

- *Tranzistory:* (bipolární část) hlavním požadavkem měření byla univerzálnost a tudíž možnost obměny měřeného tranzistoru. Pro tento účel byl vybrán tranzistor s pouzdrem TO220 obr. 5.5 a) jehož konstrukční vlastnosti umožňují zapojit tranzistor do svorkovnice a vodorovně uchytit k chladiči. Dalším důvodem byla cenová dostupnost a odolnost. Zvolené tranzistory mají označení 2SC 1061 (NPN) a 2SA 473 (PNP). Jde o tranzistory výkonové, které mají mezní hodnoty dostatečně velké pro případ, že by došlo k chybě v zadávání řídicích hodnot napětí a proudů a tím k jeho nevratnému poškození tranzistoru.

Přehled výrobcem udávaných mezních hodnot tranzistoru 2SC1061 jsou přehledně uvedeny v tab. 5.1 a na obr. 5.3 jsou výrobcem udávané výstupní charakteristiky tranzistoru. Zde zmiňuji pouze základní mezní parametry, které považuji za zásadní. V katalogových listech tranzistoru jsou uvedeny kompletní mezní parametry a dynamické vlastnosti daného tranzistoru.

(unipolární část) zde byla má volba řízena především možnostmi přípravku, jelikož tento přípravek byl původně míněn jako přípravek pro měření bipolárních tranzistorů, ale po detailnější analýze a konzultaci jsem se rozhodl, využít jej i pro tranzistory unipolární. Zde však již nebylo možné použít výkonový tranzistor neboť přípravek a měřicí technika, která mi byla dána k dispozici by nedostačovali technickým nárokům výkonových unipolárních tranzistorů (zejména z proudového hlediska). Proto jsem vybral tranzistory s označením 2SK170 s vodivostí N (JFET) a 2N3820 s vodivostí P (JFET). Pouzdra ve kterých jsou unipolární tranzistory zality jsou TO-92 a ukázka je na obr. 5.5 b).

V tab. 5.3 a 5.4 jsou výrobcem udávané mezní hodnoty parametrů tranzistorů a ukázka statických charakteristik je uvedena na obr. 5.4. K dispozici by pak na pracovišti měly být katalogové listy měřených prvků, ve kterých jsou kompletní mezní a charakteristické hodnoty jednotlivých tranzistorů.

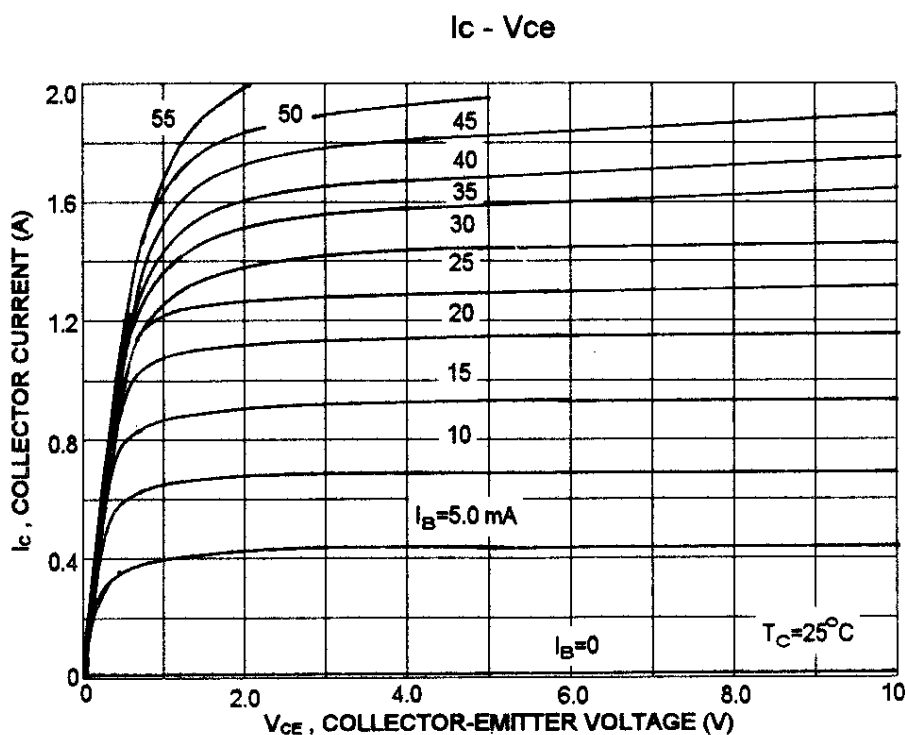
Tab. 5.1 Mezní hodnoty pro tranzistor 2SC1061 udávané výrobcem ($T_A=25^{\circ}\text{C}$).

Charakteristika	Označení	Velikost	Jednotka
Napětí kolektor-emitor	U_{CE0}	50	V
Napětí kolektor-báze	U_{CB0}	50	V
Napětí emitor-báze	U_{EB0}	4	V
Kolektorový proud – trvalý	I_C	3	A
Proud bází	I_B	0.5	A
Maximální ztrátový výkon při $T_c=25^{\circ}\text{C}$	P_D	25	W

Tab. 5.2 Mezní hodnoty pro tranzistor 2SA473 udávané výrobcem ($T_A=25^{\circ}\text{C}$).

Charakteristika	Označení	Velikost	Jednotka
Napětí kolektor-emitor	U_{CE0}	-30	V
Napětí kolektor-báze	U_{CB0}	-30	V
Napětí emitor-báze	U_{EB0}	-5	V
Kolektorový proud – trvalý	I_C	-3	A
Kolektorové ztráty	P_C	10	W

Stejně jako pro předchozí typ i pro PNP tranzistor 2SA473 jsou mezní hodnoty udávané výrobcem v tab. 5.2.



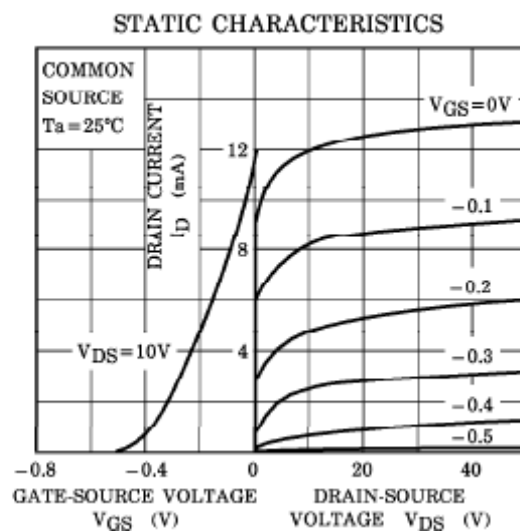
Obr. 5.3 Katalogové výstupní charakteristiky tranzistoru 2SC1061 ($T_A=25^{\circ}\text{C}$) [14].

Tab. 5.3 Mezní hodnoty pro tranzistor 2SK170 udávané výrobcem ($T_A=25^0\text{C}$).

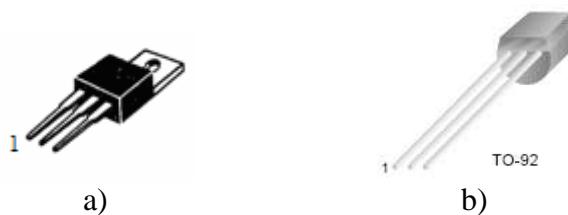
Charakteristika	Označení	Velikost	Jednotka
Napětí gate-drain	U_{GD}	-40	V
Proud hradlem	I_G	10	mA
Výkonové ztráty na kolektoru	P_D	400	mW
Teplota přechodu	T_j	125	^0C
Rozsah pracovních teplot	T_{stg}	-55~125	^0C

Tab. 5.4 Mezní hodnoty pro tranzistor 2N3820 udávané výrobcem ($T_A=25^0\text{C}$).

Charakteristika	Označení	Velikost	Jednotka
Napětí drain-gate	U_{DG}	-20	V
Napětí gate-source	U_{GS}	20	V
Závěrné napětí hradlem	I_{GF}	10	mA
Rozsah pracovních teplot	T_{stg}	-55~150	^0C



Obr. 5.4 Katalogové výstupní charakteristiky tranzistoru 2SK170 ($T_A=25^0\text{C}$) [16].



Obr. 5.4 Pouzdro TO220 a), Pouzdro TO-92 b) [7].

Přípravek není samozřejmě určen pouze pro tyto typy tranzistorů. Výběr byl v mém případě založen pouze na podmínce pouzdra a dostatečných mezních hodnot bipolárního tranzistoru. Bylo vybíráno podle maximální přípustné velikosti kolektorového proudu z kategorie tranzistorů do 10 A (v případě bipolárních) a z kategorie do 0,1 A (v případě unipolárních). V případě potřeby lze použít téměř jakýkoliv tranzistor v libovolném pouzdru pouze je potřeba dbát na rozložení pinů tranzistoru a podle toho jej do přípravku zapojit a samozřejmě je nutností dbát na maximální hodnoty, které je přípravek schopen přenášet a se kterými je schopen pracovat, případně se kterými jsme schopni v rámci pracoviště měřit.

K pouzdrům je ještě nutné dodat že u typu TO-220 jsou svorky v pořadí viz. obr. 5.4 a) a to 1) B – báze, 2) E – emitor, 3) C – kolektor a u typu TO-92 viz. obr. 5.4 b) je to 1) D – drain, 2) G – gate, 3) S – source.

- *Patice:* jde vlastně o svorkovnici plnící funkci patice pro výměnu tranzistorů. Pro snadný přístup je umístěna na spodní straně DPS (pájená na horní), kde je umístěna pouze tato svorkovnice, tranzistor a chladič. V přípravku byla použita svorkovnice s označením AKR550/3.
- *Ostatní:* distanční sloupky posloužily jako „nožky“, na kterých přípravek stojí a jako úchyt pro šroub uchycující tranzistor k chladiči. Dále pak byly použity běžné konstrukční prvky.
- *Redukce:* jde o malou DPS osazenou druhou svorkovnicí typu AKR550/3 a drátovými vývody pro zapojení do původní svorkovnice umístěné na vlastním přípravku. Slouží pro snazší a rychlejší zapojení unipolárních tranzistorů v pouzdru TO-92 (je realizovatelná pro téměř jakékoliv pouzdro).

5.2.2 Použité vývojové aplikace

Pro vývoj desky respektive desek bylo využito programu EAGLE verze 4.16r2. Program jsem zvolil proto, že jsou k němu snadno dostupné návody a program má poměrně uživatelsky příjemné prostředí. Dalším důvodem byla možnost tvorby vlastních knihoven součástí, což bylo nezbytné a v neposlední řadě volně šířitelná studentská verze dostačující mým potřebám.

Vlastní program pak umožňuje jak tvorbu obvodu, rozumějme zapojení, tak tvorbu respektive návrh samotné desky plošných spojů (DPS). A v neposlední řadě kontrolu správnosti návrhu podle předdefinovaných nebo vlastních kritérií. Po dokončení návrhu je vygenerována matrice s možností tisku a následného nanesení na desku a odleptání. Více informací pak obsahuje kap. 5.3.

5.2.3 Použité technologie pro výrobu přípravku

Pro výrobu byla využita studentská dílna Ústavu radioelektroniky. Zde jsou k dispozici prostředky pro odleptání DPS. Pro samotné osazování, vrtání a finální úpravy desky respektive desek, byly z časových důvodů použity domácí prostředky.

K výrobě jsem tedy využil běžně dostupných technologií leptání jednostranných desek, vrtání a pájení.

5.2.4 Parametry přípravku

Byla použita nekomerční verze programu Eagle, ve které je možný návrh desky do maximální velikosti 100×80 mm. Pro návrh přípravku jsem využil celé plochy dostupné v programu. Důvodem je poměrně velké množství konektorů pro připojení měřicích přístrojů a přepínačů sloužících pro změnu jednotlivých zapojení. Tyto přepínače zabírají poměrně velkou část desky a vzhledem k tloušťce spoje (2,54 mm) při výšce mědi $0,18 \mu\text{m}$ dimenzovaného pro přenos proudu až do 4 A, by bylo značně nepřehledné desku více miniaturizovat. Také vzhledem k tomu že jde o měřicí přípravek a přehlednost a jasnost je vhodná, a to jednak pro případné opravy, ale také pro názornost a zřejmost pro studenta, který na přípravku bude měřit. Z těchto důvodů jsem zůstal u maximální dostupné velikosti desky.

Jak už jsem zmínil dříve jde tedy o dvouúrovňový, respektive tříúrovňový měřicí přípravek viz. Obr. 5.5, který dává představu o rozvržení přípravku a jeho skladbě.



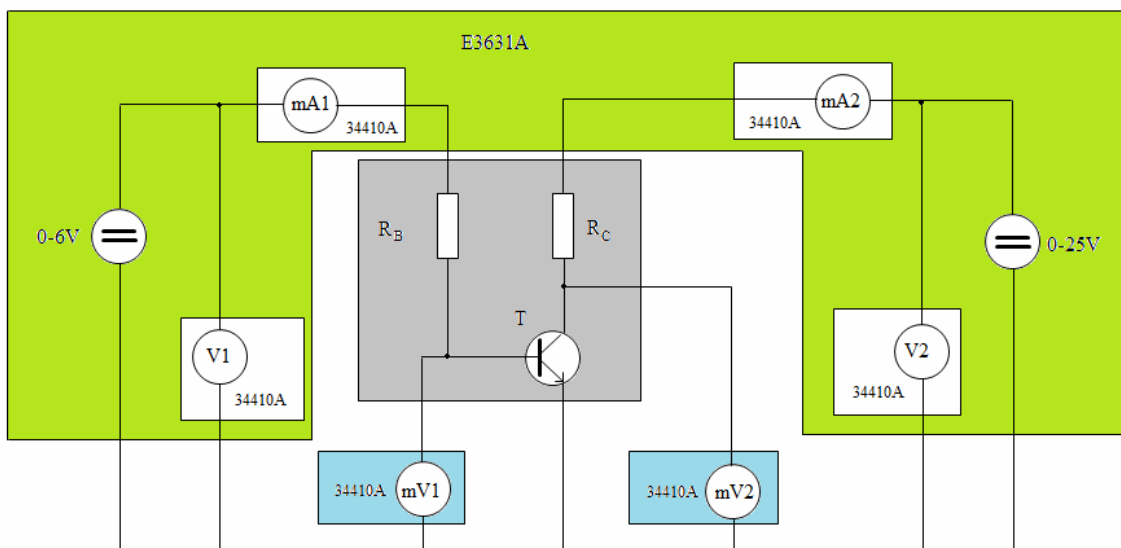
Obr. 5.5 Fotodokumentace přípravku pro měření vlastností bipolárních tranzistorů.

5.3 Finální produkt

5.3.1 Schématické zapojení pracoviště s měřicími přístroji

Vybavení pracoviště je popsáno v kap. 3.1, zde je na obr. 5.6 pro úplnost blokové schéma pracoviště pro měření BJT tranzistorů konkrétně v zapojení SE (NPN). Je patrné, že co se týče přístrojů, je pracoviště dostatečně modifikovatelné. Podle možností laboratoře a dostupnosti přístrojů je možné zdrojem E3631A, poměrně dostatečně jemně regulovat proudy a napětí přiváděné do obvodu, respektive je možné z displeje číst jejich s dostačující přesností.

V případě, že žádáme vyšší přesnost při nastavování jednotlivých hodnot a tím i celého měření, můžeme do obvodu připojit dodatečně multimetry. Přípravek je koncipován pro připojení až šesti měřicích přístrojů a dvou zdrojů, což by nám mělo zajistit dostatečnou přesnost měření s ohledem na přesnost použitých přístrojů a laboratorních pomůcek.

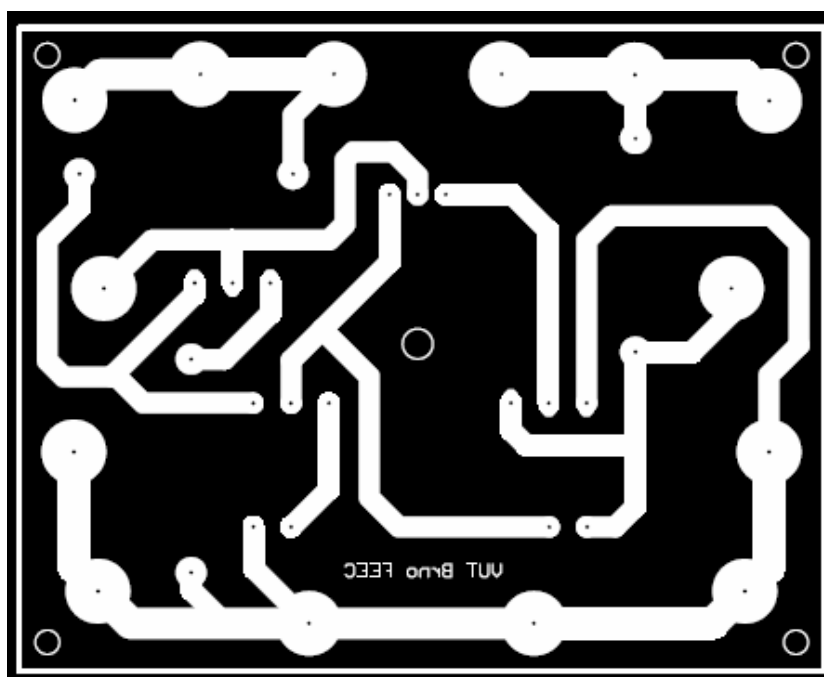


Obr. 5.6 Blokové schéma pro měření statistik tranzistorů (SE).

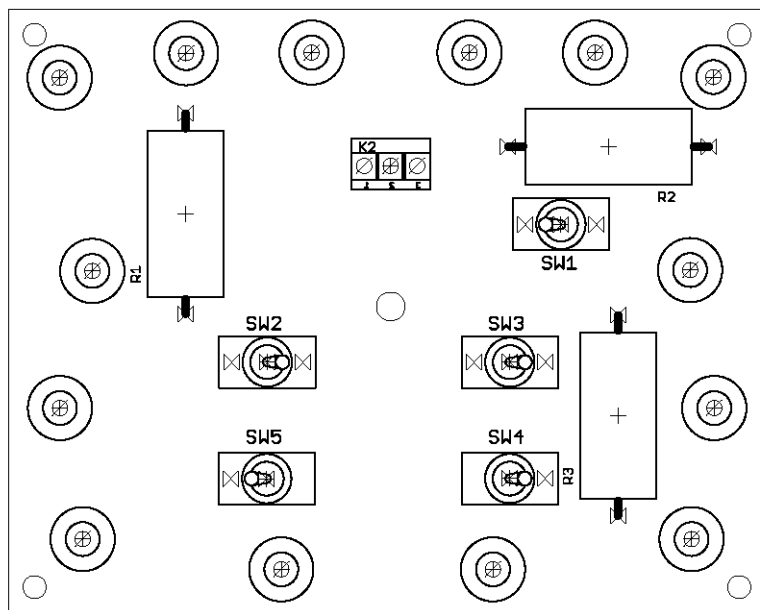
Vlastnosti jednotlivých měřicích přístrojů a zdrojů jsou stručně zmíněny v kap. 4, podrobnější informace jsou pak dostupné v katalogových listech jednotlivých přístrojů.

5.3.2 Deska plošných spojů

Hlavním výstupem práce je tedy DPS, respektive přípravek pro měření, který je na desce realizován. Na obr. 5.7 je výstup CAM procesoru programu Eagle sloužící jako předloha pro výrobu desky. Na obr. 5.8 je výstupem CAM procesoru sloužící jako předloha pro osazení desky součástkami a na obr. 5.9 je předloha pro odvrtání děr. Předloha pro foto-tisk je uvedena v zrcadlovém otočení potřebném pro technologii osvitu.

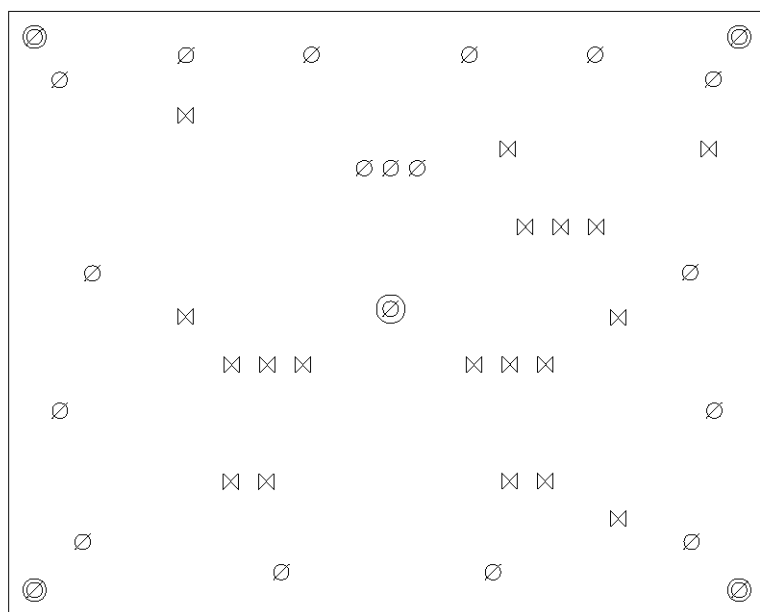


Obr. 5.7 Výstup programu Eagle použitelný pro vynesení cest na desku.



Obr. 5.8 Výstup programu Eagle sloužící pro osazování desky.

Na obr. 5.9 je uvedeno rozvržení děr. Toto není příliš nutné uvádět, jelikož nejde o sériově vyráběnou desku, ale slouží spíše pro orientaci a lepší představu o desce.



Obr. 5.9 Matice sloužící pro odvrtání děr na DPS.

6 Automatizovaná měření

V rámci měření na realizovaných přípravcích, ale nejen na těchto, ale i v rámci měření v elektrotechnice všeobecně je velice výhodné realizovat tento typ měření za pomoci PC s vhodným softwarem. Takovým softwarem je například aplikace VEE, která představuje vizuální vývojové prostředí umožňující navrhnout strukturu reálného pracoviště za pomoci PC a omezuje tak nutnost nepřetržité přímé a krokové manipulace s přístroji díky možnosti individuálního nastavení měřicích přístrojů pomocí programu a naplánování průběhu měření a nebo případně vzdálená měření tedy bez nutnosti přítomnosti na měřicím pracovišti. Další nespornou výhodou je možnost využití pro dlouhodobá měření.

V rámci této práce bylo využito vývojové prostředí Agilent VEE Pro 8.0, kde v následujících podkapitolách jsou stručně charakterizovány vlastnosti a možnosti tohoto prostředí a dále je pak uveden příklad měřicí aplikace navržené v tomto softwaru.

Pojem automatizované měření respektive automatický měřicí systém skrývá sestavu přístrojů, přípravků, měřicích modulů, generátorů, zdrojů a mnoho dalšího využívaného pro měření v oblasti elektrotechniky. Tato zařízení spolu vzájemně komunikují a tato komunikace je mapována potažmo snímána počítačem, se kterým jsou tato zařízení propojena, což nám umožňuje komplexní řešení zadané úlohy. Zařízení jsou připojena k počítači za pomoci přístrojové sběrnice viz. kap. 6.1.1. Jedním z hlavních bodů realizace automatizovaného měření je výběr vhodných měřicích a jiných přístrojů, tedy fyzický návrh pracovního prostředí. Této problematice je věnována kap. 4. Druhým bodem je pak samotný návrh a odladění programového vybavení měřicí úlohy.

6.1 Charakteristika a vlastnosti aplikace VEE Pro 8.0

Jak jsem již zmínil, jde o vývojové prostředí dodávané firmou Agilent Technologies. Jedná se o poměrně moderní a novodobý prvek užívaný v oblasti návrhu a realizace automatizovaného měření. Tento programový systém s výhodou využívá grafický programovací jazyk. Takovéto prostředí s graficky orientovaným jazykem se nazývají „prostředí pro virtuální instrumentaci“. Toto prostředí obsahuje velké množství ovladačů (driverů) pro velké množství měřicích přístrojů a samozřejmě obsahují i možnost snadného rozšíření knihoven s ovladači. Toto prostředí dává potenciálnímu programátorovi možnost zabývat se pouze řešením zadaného problému a nikoliv se starat o problematiku způsobu ovládní přístrojů. Naměřená data je samozřejmě nutné vhodným způsobem prezentovat a nebo dále distribuovat což je zde umožněno ať už za pomoci archivace dat, odesílání dat mezi počítači nebo jednoduše na tiskárnu.

6.1.1 Komunikace PC-přístroj

Jak již bylo napsáno, jde o prostředí komunikující s přístroji za pomoci sběrnic. Vzhledem k nejednotnosti rozhraní, která používají jednotliví výrobci je nanejvýš vhodné, aby byla komunikace umožněna po různých typech sběrnic. Mezi sběrnice

podporované prostředím VEE patří: *VXI*, *PXI*, *USB*, *GPIB*, *RS-232*. V tomto našem případě byla použita sběrnice GPIB a USB. Je zde možnost i připojení do lokální počítačové sítě za pomoci LAN rozhraní což umožňuje ovládat a přistupovat k zařízení vzdáleně.

6.1.2 Zpracování získaných dat

Pro úpravu a zpracování naměřených dat je program vybaven celou řadou matematických modulů. Je zde rovněž možnost grafické prezentace naměřených výsledků jako například display, kontrolky, grafy a podobně. V neposlední řadě je zde možnost exportu získaných hodnot pro vlastní zpracování za pomoci jiných programů nebo prostě odeslání naměřených hodnot či vytvořených grafů pomocí tiskárny.

6.2 Programování v prostředí VEE Pro 8.0

Hlavní výhoda tvorby programů respektive měřicích sekvencí spočívá ve způsobu návrhu měření. VEE s výhodou využívá možností objektového programování, což značně ulehčuje práci oproti nutnosti programovat každý blok a jeho funkce samostatně za pomoci klasického programování za pomoci kódu. Zároveň je okamžitě patrná skladba pracoviště a úlohy což zjednodušuje nejen programátorovi představu o stavu úlohy, ale hlavně je tímto navržený program zcela průhledný případně třetí straně. Kromě objektového programování je zde samozřejmě možnost využití běžných programovacích jazyků jako např. Pascal apod.

6.2.1 Základy tvorby programu

Jak jsem již zmínil základem je objektové programování což znamená, že v menu vybereme objekt, který chceme použít (jsou již navrženy v rámci přístrojů a běžných funkcí) a po umístění jej propojíme se zbytkem již umístěných objektů. Je zde možnost objekty různě editovat a přizpůsobovat ať už funkcí či vzhledem. Databáze, která je přímo součástí VEE obsahuje velké množství předpřipravených objektů a funkcí používaných v běžných měřicích aplikacích, ale nabízí se i možnost tvorby vlastních funkcí či podprogramů.

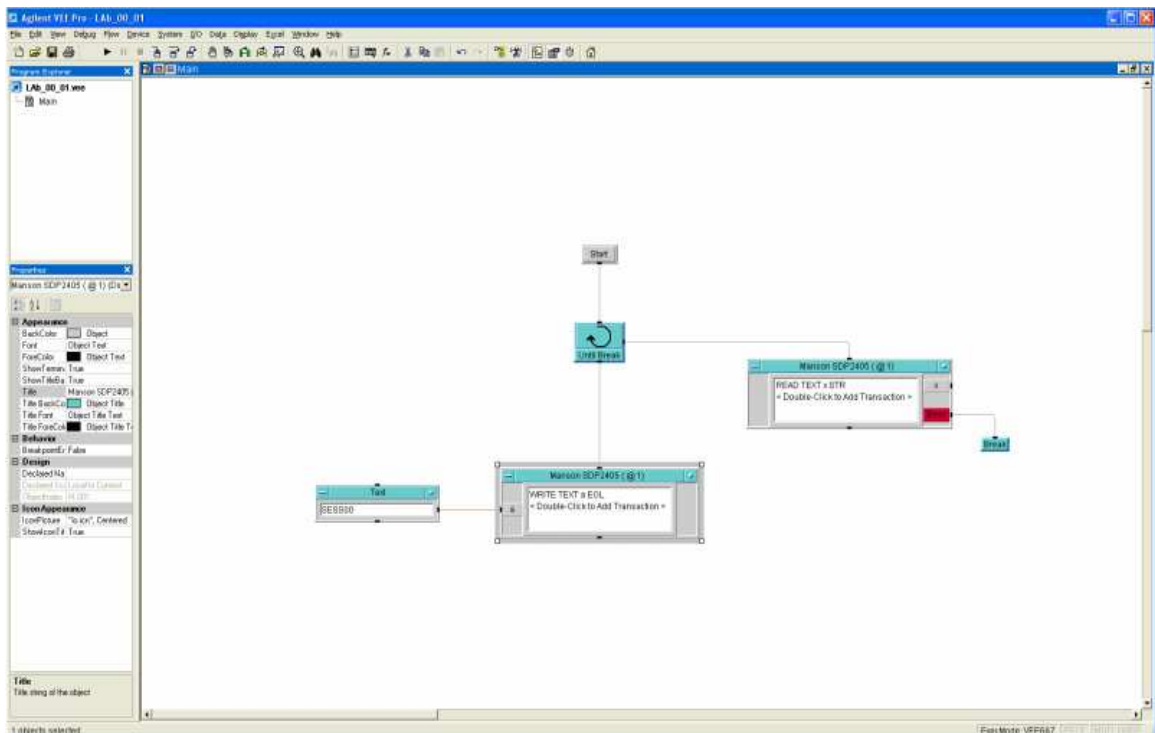
Po seskládání objektů na „pracovní ploše“ a jejich nastavení podle potřeb (např. u generátorů signálu nastavíme periodu, frekvenci atd.) je tedy propojíme podle požadavků zadání, aplikaci odladíme za pomoci menu *Debug* a za pomoci tlačítka *Start* ji spustíme. Program je možné krokovat nebo nechat běžet v realtime módu. Většinu programů koncipujeme formou vnořených smyček a podmínek obsluhujících podprogramy. Jako příklad mohu uvést níže popsané programování měření statických charakteristik, kde je potřeba nastavovat a krokovat dva parametry což se realizuje právě pomocí vnořených smyček a podmínky obsluhující podprogram pro obsluhu exportu naměřených dat. Ukázky programů jsou v příloze na CD.

6.2.2 Ovládání měřicí aplikace

Ovládání je zcela intuitivní v případě, že chceme, aby program byl snadno použitelný i pro člověka, který jej nenavrhol a nemá s prostředím VEE příliš zkušeností. Lze potřebné ovládací prvky jako start, stop, restart, okno grafu, kolonky pro zadávání kroků a řídicích veličin a podobně umístit do panelu, kde jsou tedy pouze zásadní prvky přehledně popsány a rozloženy, aby i neznalý uživatel mohl tedy program využít. Samozřejmě to není podmínkou a ovládání se dá provádět i přímo nastavováním potřebných prvků přímo v těle programu, ale i pro samotného programátora je využití panelu přehlednější a efektivnější.

6.2.3 Ukázka pracovního prostředí

Vzhledem k tomu, že programy jsou povětšinou poměrně rozsáhlé uvedu zde jen ilustrační příklad pro názornost a utvoření si představy o prostředí, ve kterém se pracuje.



Obr. 6.1 Ukázka prostředí programu VEE.

7 Laboratorní měřicí úloha

V této kapitole jsou jednak zadání laboratorních úloh včetně návodu, a to jak pro unipolární (kap. 7.2) tak pro bipolární tranzistory (kap. 7.1) což dává možnost použití ve školních laboratořích dvou podobných laboratorních úloh. Dále jsou ve zmíněných kapitolách ukázky měření a zpracování naměřených dat jak programem VEE 8.0 Pro tak extrahovaných dat programem Excel.

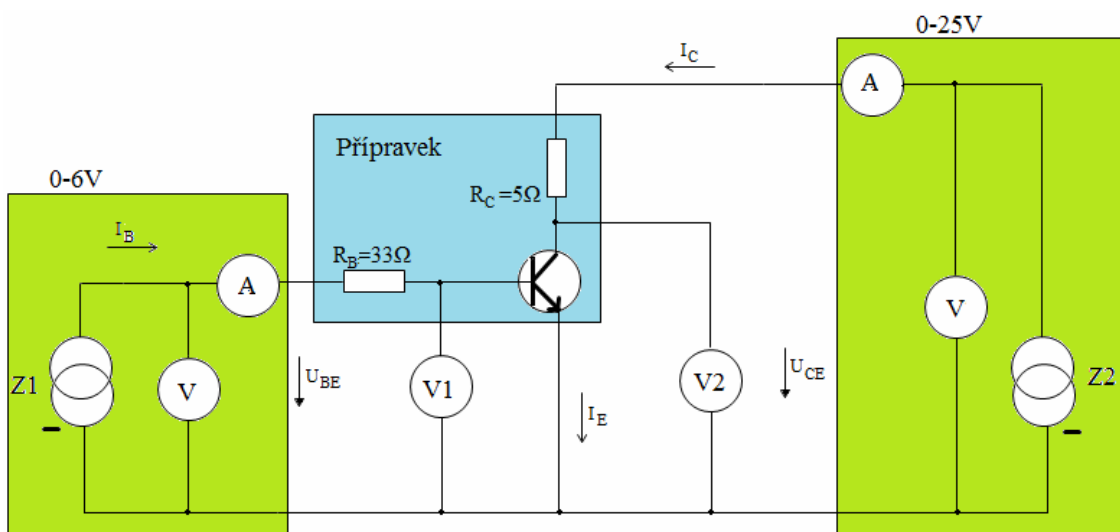
7.1 Návrh laboratorní měřicí úlohy pro bipolární tranzistory

Vzhledem k tomu, že máme k dispozici přípravek pro měření charakteristik tranzistorů dalším krokem je návrh úlohy, která bude na přípravku realizovatelná a použitelná ve školních podmínkách. V kap. 2 a 3 jsou popsány vlastnosti tranzistorů, možnosti jejich měření a stručný popis měření tranzistorů jak jej znám z různých laboratoří. V této kapitole je sepsána úloha určená přímo pro měření na přípravku navrhovaném v kap. 5. Dále je zde uvedeno i její vypracování.

Měření je možné samozřejmě tak jak jej známe za pomoci přístrojů a zanášením naměřených hodnot do tabulek a nebo s využitím prostředí VEE umožňujícího nám automatizované měření jak je popsáno v kapitole 6.

7.1.1 Zadání laboratorní úlohy pro zapojení SE

1) Projděte si pozorně zapojení měřicích přístrojů a především jejich zapojení v rámci měřicího přípravku podle obr. 7.1. Zvláštní pozornost věnujte zapojení napájecích zdrojů a jejich polaritě závislé na typu použitého tranzistoru. Dále zkontrolujte polohy páčkových přepínačů, zda odpovídají zapojení, které vám zadal vyučující. Tabulka poloh je k dispozici na pracovišti.



Obr. 7.1 Zapojení pracoviště pro měření statických charakteristik s NPN tranzistorem SE.

2) Vypočítejte mezní parametry tranzistorů, nebo je určete z příložených katalogových listů a striktně je dodržujte. Zvláštní pozornost věnujte řádům, které používáte při zadávání napětí (proudů) na příloženém zdroji!

3a) V prostředí VEE sestavte program umožňující měření výstupních charakteristik tranzistorů. Snažte se přitom vyvarovat zadávání hodnot bázeového proudu a kolektorového napětí pomocí samotných přístrojů, ale koncipujte program tak, že zadávání bude umožněno pomocí bloku ovládacího panelu přímo ve vámi navrhovaném programu. Funkčnost programu ověřte proměřením výstupních charakteristik příloženého tranzistoru a zobrazením naměřených hodnot a grafu na uživatelském panelu. Změřte alespoň 4 charakteristiky.

3b) Navrhněte program pro měření převodní charakteristiky tranzistoru a zároveň navrhněte způsob pro zjištění parametru h_{21e} tedy proudového zesilovacího činitele. Výstupem tohoto bodu necht' je graf převodní charakteristiky, graf závislosti proudového zesilovacího činitele na velikosti proudu I_C a určete maximum parametru h_{21e} . Stačí změřit pouze jednu charakteristiku. Volte vhodné přístroje, tak aby měření bylo co nejpřesnější.

3c) Dále navrhněte program pro měření vstupních charakteristik BJT tranzistoru. Změřte dvě charakteristiky pro zvolené velikosti U_{CE} . Dále program modifikujte, tak aby jste byli schopni určit velikost parametru h_{11e} , který náleží tomuto kvadrantu.

4) Modifikujte měření tak, že všechny jeho části spojíte do jednoho měření, které bude sekvenčně vykonávat jednotlivá měření.

7.1.2 Teoretický úvod

Jak vyplývá již ze zadání, prvním a hlavním krokem by mělo být určení mezních parametrů měřeného prvku, při jejichž překročení často dochází k jeho nevratnému poškození tranzistorů. V souvislosti s určenými limitními hodnotami měřeného prvku musíme stanovit i limitní hodnoty měřících přístrojů a tyto před samotným měřením nastavit. Podle toho zda měříme na bipolárním či unipolárním tranzistoru se liší veličiny, jejichž velikost je pro prvek kritická. Pro BJT tranzistory jsou to tedy napětí U_{CE} , U_{CB} , I_C , U_{EB} , mezní teplota přechodu (pouzdra) a maximální výkonová ztráta, která závisí na podmínkách v jakých je tranzistor provozován. Ztrátový výkon je vyzařován do okolí (pouzdro) a v případě využití výkonových tranzistorů se navíc využívá pro odvod tepla chladič (aktivní nebo pasivní) [2].

Pro měření je využit tranzistor 2SC1061 (NPN), nebo jiný předložený, s maximální výkonovou ztrátou 25 W. Této hodnoty však nedosáhneme vzhledem k limitním hodnotám použitým při měření. Nicméně jde o maximální hodnotu a z této můžeme vycházet při určování limitních parametrů napájecích zdrojů. Přípravek s požadovaným proměřovaným prvkem zapojíme podle obr. 8.1. Přípravek je koncipován, tak že v bázeovém a kolektorovém obvodu jsou umístěn rezistory sloužící zároveň jako ochrana před zničením měřeného prvku. Jejich zapojení a hodnoty uvedeny ve schématu zapojení. Pro měření jsou v obvodu umístěny dva voltmetry V1 a V2 dbejte na jejich správné zapojení a dobře volte jejich využití pro měření. Ve

VEE jsou voltmetry vedeny jako ag34410a@UsbDevice1 (V1) a g34410a@UsbDevice2 (V2) Dalším přístrojem je napájecí zdroj dodávající potřebnou energii do bazového i kolektorového obvodu (dvou-hladinový)

Použité přístroje:

Agilent E34410A....Voltmetr 1 (V1) – ve VEE evidován jako ag34410a@UsbDevice1;
Agilent E34410A....Voltmetr 2 (V2) – ve VEE evidován jako ag34410a@UsbDevice2;
Agilent E3631A.....Zdroj (Z1, Z2) – ve VEE evidován jako hpe3631a@GPIB s adresou 5;

Přípravek pro měření;

Propojovací vodiče;

PC s příslušenstvím a softwarem VEE 8.0 Pro.

K proměření jsou zadány výstupní, převodní, vstupní a zpětné charakteristiky popřípadě h parametry náležící jednotlivým kvadrantům. Výstupní charakteristika je závislost kolektorového proudu I_C na napětí U_{CE} při konstantních hladinách bazového proudu I_B . Výstupní charakteristika je nejdůležitější z charakteristik a pomáhá nám určit chování tranzistoru v obvodech ať už jako spínače nebo zesilovače. Druhou charakteristikou je převodní a to je závislost I_C a I_B při U_{CE} konstantním. Za použití těchto dvou charakteristik lze zbylé charakteristiky dopočítat, nicméně my je proměříme jak je uvedeno v zadání. Tedy další charakteristika je vstupní, jde o závislost napětí U_{BE} na proudu I_B při konstantní hodnotě U_{CE} a nakonec zpětná charakteristika vyjadřující závislost napětí U_{BE} na napětí U_{CE} při konstantní hodnotě proudu I_B . Dalšími měřebními body jsou takzvané h parametry, ty jsou jednoznačně definovány a vycházejí z jednotlivých měřených závislostí. Jde tedy o vzájemnou konfrontaci naměřených hodnot v závislosti na jedné veličině pro každý z h parametrů.

$$h_{11} = \frac{U_1}{I_1} | U_2 = 0 \quad [\Omega], \quad (7.1)$$

$$h_{12} = \frac{U_1}{U_2} | I_1 = 0 \quad [-], \quad (7.2)$$

$$h_{21} = \frac{I_2}{I_1} | U_2 = 0 \quad [-], \quad (7.3)$$

$$h_{22} = \frac{I_2}{U_2} | I_1 = 0 \quad [S]. \quad (7.4)$$

7.1.3 Postup měření

Prvním krokem tedy bude určení mezních parametrů předložené součástky. Ty spočtete na základě přiložených hodnot v katalogových listech a maximální výkonovou ztrátu volte maximálně 15 W. Tranzistor i obvod jsou sice koncipovány pro vyšší hodnoty, ale vzhledem k četnosti prováděných měření nedoporučuji tranzistor plně zatěžovat.

Jakmile máme určeny mezní hodnoty a zkontrolováno zapojení a používané přístroje můžeme přikročit k samotné konfiguraci a programování ve VEE. Na ploše naleznete ikonu pro spuštění vývojového prostředí.

Vkládání zdrojů, měřicích přístrojů a podobných se realizuje pomocí menu I/O v záložce Instrument manager. Zkontrolujte, zda jsou v programu „namapovány“ příslušné přístroje správně. Zároveň si přístroje prověřte přímo v těle programu, aby nedošlo ke zbytečné záměně. Seznam přístrojů použitých pro tuto úlohu je sepsán v teoretickém úvodu.

Seznam hlavních příkazů potřebných pro sestavení vhodného programu je uveden níže, nicméně nejde o kompletní seznam a kompletní návod měření, zde je pak vyžadována vaše spoluúčast a kreativita. Snažte se postupovat co nejušporněji, a tak aby výsledný program byl co nejefektivnější a změřené výstupy co nejpřesnější.

Seznam příkazů pro úlohu:

- *RST - restart měřicího přístroje;
- *IDN - odešle inicializaci měřicího přístroje;
- *WAI - vyšle na měřicí přístroj dotaz, který se vrátí zpět jakmile je dokončena vykonávaná operace;

- MEAS:VOLT? - změří napětí na zvoleném (nastaveném) přístroji;
- MEAS:CURREN? - změří proud na zvoleném přístroji;
- INST:SEL P6V - nastaví zdroj do režimu zadávání parametrů a měření, a volí používanou hladinu zdroje – zde to je 0-6 V;
- INST:SEL P25V - nastaví zdroj do režimu zadávání parametrů a měření, a volí používanou hladinu zdroje – zde to je 0-25 V;

- VOLT xxxV - slouží pro nastavení hodnoty napětí pro příslušnou hladinu zdroje. Automaticky je hodnota xxxV ve voltech a může jít o libovolné reálné číslo, kromě tohoto zápisu je možný i zápis s určením jednotek zadávané hodnoty mV, V úloze používejte zápis s jednotkami je zde menší pravděpodobnost chyby při zadávání;
- CURR xxxA - stejně jako VOLT xxxV, ale nastavují se hodnoty proudového omezení;

- OUTPUT ON - příkaz uvede všechny zdroje do pohotovostního stavu jsou tedy aktivní a připojeny k výstupním svorkám;
- OUTPUT OFF - uvede všechny zdroje do stavu nečinnosti a výstupní svorky nejsou připojeny.

Na začátku měření restartujte jednotlivé měřicí přístroje popřípadě příkazem OUTPUT OFF odpojte měřený tranzistor od zdroje a po dokončení měření vždy deaktivujte zdroj!!! V případě ponechání zdroje v aktivním režimu, zdroj neustále dodává výkon do zátěže dle posledních zadaných hodnot což jsou v tomto případě ty nejvyšší hodnoty a i když je tranzistor dimenzován na vysoké hodnoty mohlo by dojít k jeho poškození.

K samotné struktuře programu určeného k měření výstupních charakteristik, ale i ke struktuře programů všeobecně s dá přistupovat jako k programování. Hlavní program se skládá z vnořených smyček tedy jakýchsi podprogramů. Počet vnořených smyček je prakticky neomezený, ale s jejich množstvím samozřejmě roste složitost programu proto je dobré počet smyček volit co nejmenší před měřením je tedy potřeba si uvědomit kolik charakteristik pro jaký kvadrant budeme měřit a kolik parametrů pro ně bude třeba v jednotlivých programech definovat. Smyčky v našem případě budeme volit typu **For Range** (lze volit i jiné) při nastavování jednotlivých řídicích parametrů si dobře uvědomte v jaké hladině zdroje jej budete nastavovat a podle toho se mezi zdroji přepínajte.

POZOR: Každé měření vždy zabezpečte tak, že po jeho skončení se automaticky odpojí výstup zdroje!

Ad 3a). Pro měření výstupních charakteristik (7.5) v první smyčce aktivujeme zdroj hladiny 0-6 V, který jsme na začátku uvedli do proudového režimu. Tímto zdrojem budeme nastavovat proud tekoucí do báze. Jak je zmíněno výše proud zadávejte ve formě xxxmA a jako maximum volte 8mA. Ve druhé smyčce je potřeba aktivovat hladinu 0-25 V, kterou jsme uvedli na začátku programu do napěťového režimu a pomocí této hladiny zdroje nastavovat hodnoty napájecího napětí kolektorového obvodu (tento zdroj bude zvyšovat napětí až do hodnoty nastaveného proudového limitu). Celé měření máme vynést do grafu na což použijeme např. objekt *X vs Y Plot* a budeme měřit hodnotu výstupního proudu přímo na zdroji (v případě, že máme k dispozici multimetr odečítáme s jeho pomocí kolektorový proud), který odpovídá hodnotě kolektorového proudu I_C a z V_2 pro tyto hodnoty odečítáme hodnotu napětí U_{CE} . Do objektu *X vs Y Plot* je potřeba vložit řídicí vstup **Next Curve** (aktivován vždy po dokončení měření křivky pro zadaný bázový proud) abychom zamezili zápisu hodnot v invertovaném pořadí. Opatřete měření podmínkou **If/Then/Else** která při dosažení limitně nastaveného proudu přeruší měřicí cyklus a zároveň odpojí vstupy

$$I_C = f(U_{CE}), I_B = konst. \quad (7.5)$$

Ad 3b) Pro měření převodní charakteristiky (7.6) a proudového zesilovacího činitele (7.3) nejprve nastavte hladiny zdroje a to hladinu P6V do napěťového režimu s proudovou pojistkou na 50 mA. Hladina P25V bude nastavená jako pevná a to na hodnoty napětí $U=6$ V a proudu $I=1$ A je tedy jasné, že měřit charakteristiky budeme pouze pro jednu hodnotu U_{CE} . Z teoretického úvodu víme, že převodní charakteristika je závislost I_B na I_C , ale ačkoliv by bylo možné měření realizovat, tak že bychom požadované parametry nastavovali přímo pomocí zdroje, musíme zde vzít potaz nepřesnost nastavování bázového proudu přímo na zdroji, proto měření koncipujte tak, že budete nastavovat napájecí napětí bázového obvodu (odečet nastavovaných hodnot provádějte ze zdroje) a zároveň budete měřit pomocí V1 napětí báze-emitor. Za pomoci vhodného objektu (např. **Formula**) a za předpokladu, že odpor v obvodu báze má hodnotu 33Ω proveďte výpočet odpovídajícího I_B . Graf závislosti převodní charakteristiky nechte vykreslit pomocí objektu **X vs. Y plot**.

Poté opět za pomoci vhodného nástroje vypočítejte proudový zesilovací činitel pro změřenou charakteristiku a do grafu nechte zobrazit jeho závislost na proudu I_C . Obvod opatřete podmínkou ošetřující přerušení (objektem Break) měření po dosažení saturačního proudu I_C . Dále určete maximální hodnotu h_{21e} za pomoci nástroje **Collector** na který přivádějte naměřené hodnoty které se zde budou kumulovat.

Jednotku nechte vytvořit jednorozměrný vektor (*1 Dim Array*), který zašle hodnoty na výstup jakmile dojde k aktivaci řídicího vstupu **XEQ**. Vektor zpracujte pomocí objektu **Formula** (funkci *max(a)*), který najde maximum z přivedených hodnot, a tuto hodnotu zobrazte na display

$$I_C = f(I_B), U_{CE} = konst. \quad (7.6)$$

Ad 3c) Pro měření vstupní charakteristiky (7.7) hladinu P6V zdroje nastavte do proudového režimu a hladinu zdroje P25V nastavte do napět'ového režimu. V programu by měly být dvě smyčky např. opět **For Range**, kde v první smyčce na hladině P25V nastavujete napětí U_{CE} . Měřte pro dvě napětí například 3 a 10 V a ve druhé smyčce na zdroji P6V nastavujte proud I_B který omezte na maximálně 100 mA omezení proveďte podmínkou. Do grafu **X vs Y plot** nechte vykreslit průběhy vstupních charakteristik a za pomoci objektu **Formula, Collector** a vhodných podmínek nechte pro obě křivky určit maximální hodnotu h_{11e} . Při využití více podmínek není nutné na další podmínku po nesplnění předchozí odkazovat rozhodovacím výstupem **Else** pouze na následující podmínku přiveďte vstup a vyřešte rozhodování, kam data zaslat v případě, že je podmínka splněna a tak vždy pro každou další podmínku

$$I_B = f(U_{BE}), U_{CE} = konst. \quad (7.7)$$

Všechna měření jsou si velice podobná a principiálně jde pouze o obměny jednoho programu, proto vám doporučuji vždy vycházet z jednoho programu a modifikovat jej ušetříte tím výrazně čas. Do každého měření zakomponujte smyčku která na konci měření odpojí automaticky výstup napájecího zdroje, aby nedošlo k zbytečnému zahřívání tranzistoru viz. krok 3a. Snažte se využívat pro měření podmínek zamezujících překračování stanovených mezních parametrů.

7.1.4 Vypracování měřící úlohy

Na přiloženém CD obsahujícím elektronickou verzi práce jsou k dispozici vzorové programy napsané pro výše zmíněné úlohy. Jde o programy s označením

- Výstupní ch. - tento program je napsaný pro měření výstupních charakteristik;
- Převodní ch. - tento program je napsaný pro měření převodních charakteristik a h_{21e} parametru;
- Vstupní ch. - tento program je pro měření vstupní charakteristiky a parametru h_{11e} ;
- Zpětná ch. - měření sestavené pro zpětnou charakteristiku a h_{12e} parametr.

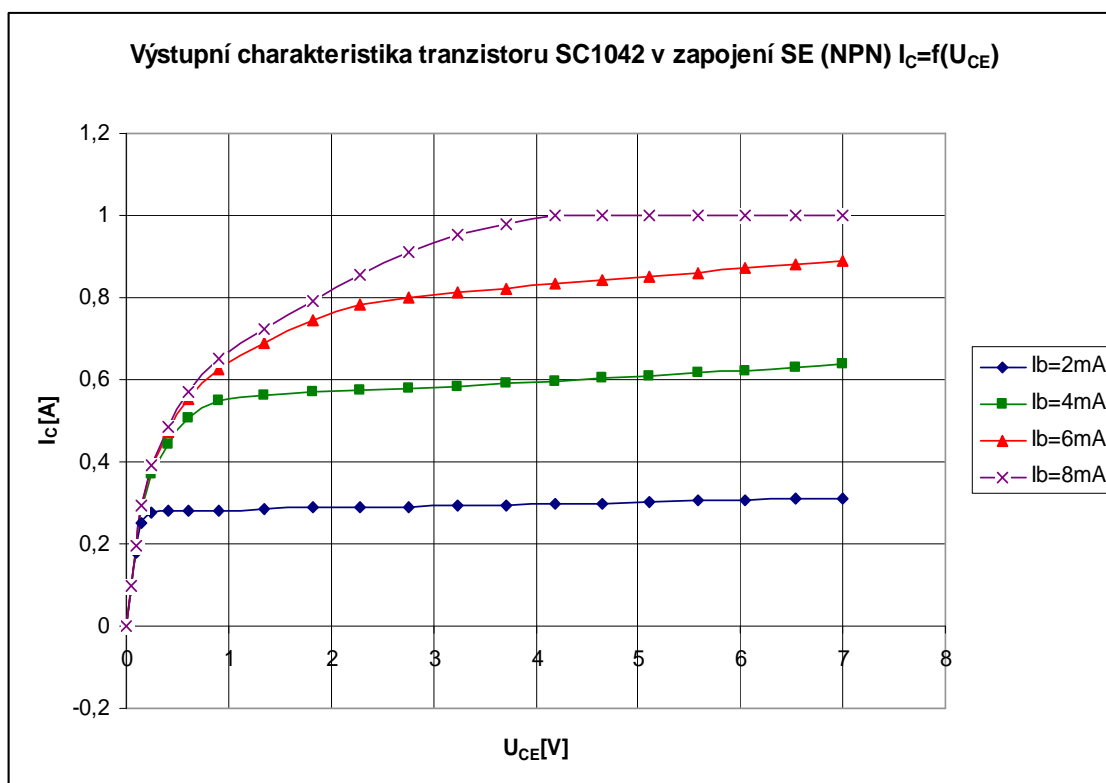
Kromě zmíněných souborů, přiložené CD obsahuje i upravené verze programu umožňující export naměřených dat do tabulek pro jejich další zpracování.

7.1.5 Naměřené hodnoty

V tab. 7.1 je ukázka hodnot naměřených pro výstupní charakteristiku BJT (NPN) tranzistoru v zapojení SE. Tedy tranzistoru měřeného za pomoci přípravku. Hodnoty jsou vyexportovány za pomoci programu v prostředí VEE a zpracovány pomocí programu Excel. Jde pouze o ukázku, další příklady pro měření zbylých charakteristik jsou umístěny na CD formou přílohy, zde pouze demonstrují naměřená data.

Tab. 7.1 Hodnoty naměřené pro výstupní charakteristiky BJT tranzistoru v zapojení SE (NPN).

I_B [mA]	2	4	6	8
U_{CE} [V]	I_C [A]	I_C [A]	I_C [A]	I_C [A]
0,001361552	-0,00073	-0,00087	-0,00092	-0,00091
0,047739253	0,09074	0,095408	0,097186	0,098124
0,092845564	0,180157	0,191813	0,195395	0,197227
0,150895142	0,249881	0,285451	0,292468	0,295674
0,248681797	0,275421	0,370965	0,386679	0,392506
0,40333654	0,279069	0,444302	0,473851	0,485348
0,609932469	0,281045	0,5064	0,552172	0,571233
0,911553041	0,282897	0,548222	0,623913	0,650294
1,3486974	0,28492	0,56142	0,688691	0,724139
1,8157962	0,287318	0,568111	0,743914	0,79276
2,29035648	0,288739	0,573619	0,783071	0,855429
2,76420787	0,290222	0,579524	0,801581	0,910445
3,2366651	0,29356	0,585042	0,812789	0,953265
3,70861283	0,294718	0,590679	0,823073	0,980738
4,18087419	0,296848	0,596974	0,832226	0,998066
4,65363277	0,299437	0,602637	0,84163	1,000709
5,11636586	0,301695	0,609968	0,850709	1,000722
5,58982492	0,304266	0,616293	0,861062	1,000721
6,05298608	0,30742	0,623021	0,871618	1,00071
6,5315804	0,310153	0,629603	0,880537	1,000709
6,99671095	0,312148	0,636689	0,890436	1,000717

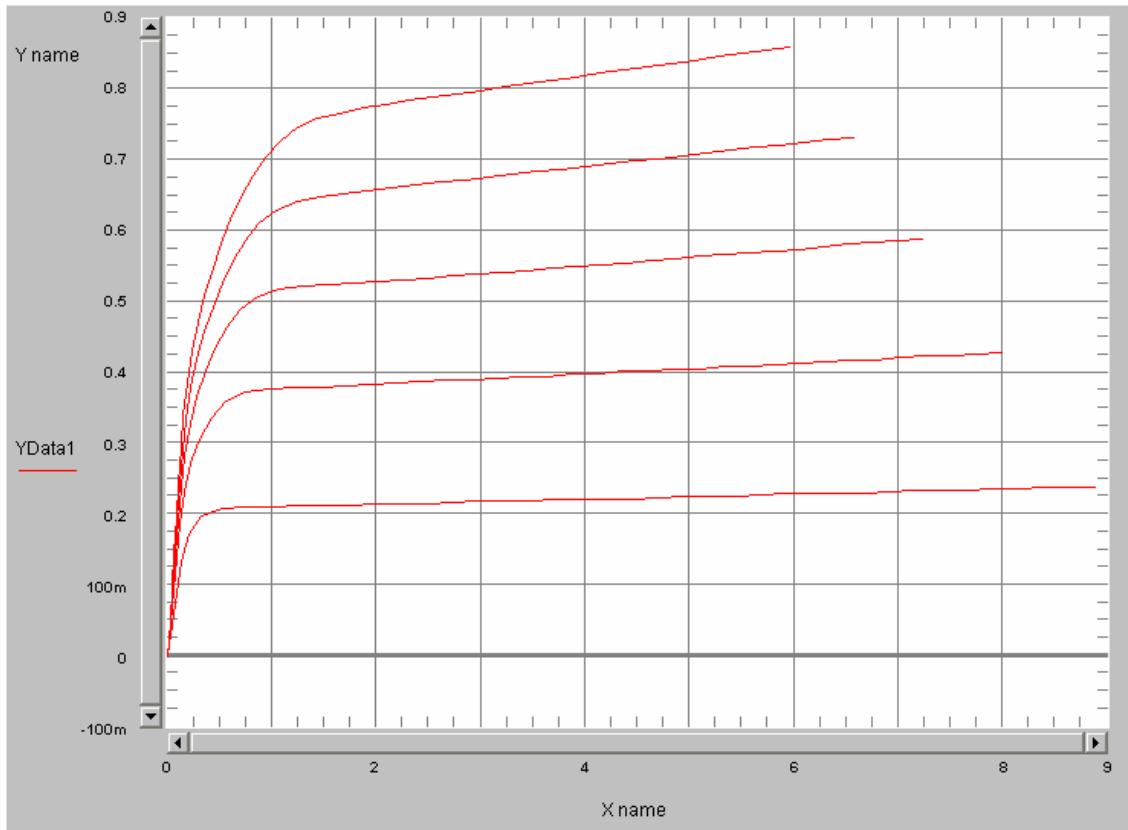


Obr 7.2 Grafické zobrazení výstupních charakteristik zpracované v programu Excel.

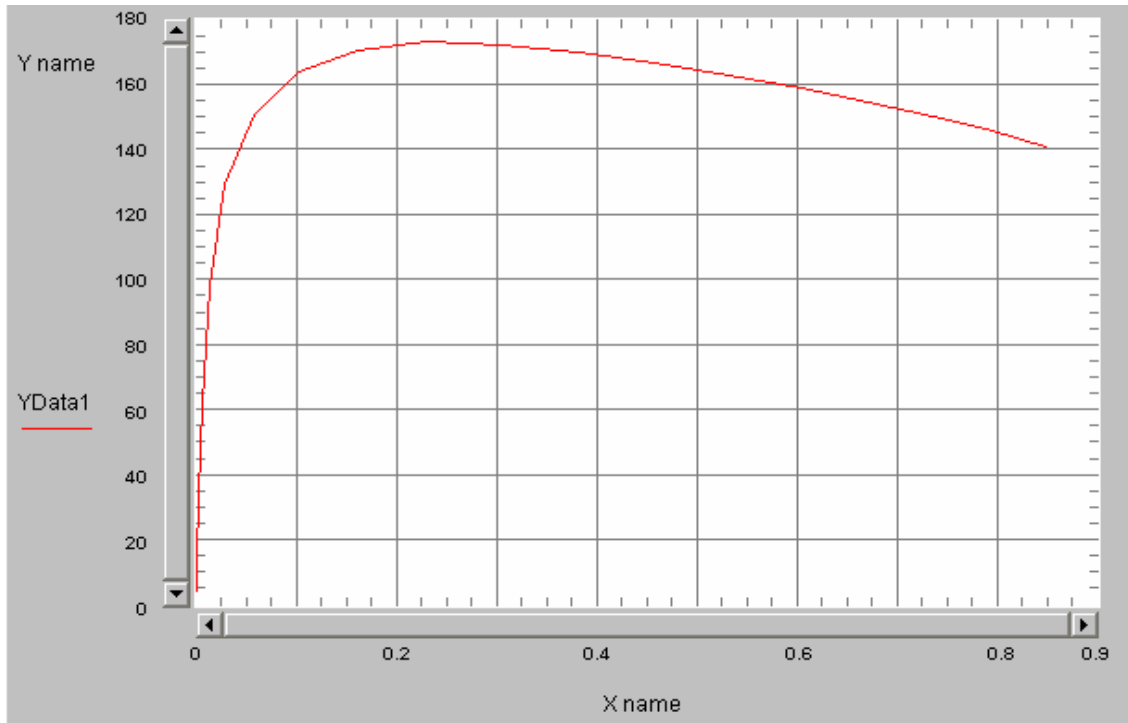
7.1.6 Zpracování naměřených hodnot

Data je samozřejmě možné nechat vykreslit přímo do grafu v programu navrženém ve VEE jak je ukázáno na obr. 7.3, kde je uvedena ukázka výstupních charakteristik BJT tranzistoru a obr. 7.4, kde je závislost $h_{21e}=f(I_C)$ při $U_{CE}=konst.$ Chceme-li však s daty dále pracovat je možné nechat data exportovat viz. tab. 7.1 a různě modifikovat a zpracovat i jinými programy. Ukázka zpracování programem Excel je uvedena na obr. 7.2. Toto však není jediná možnost, ovšem zpracovávání dat není předmětem této práce. Pro export naměřených hodnot je nutno hlavní program ve VEE opatřit vhodným podprogramem zajišťujícím extrakci potřebných dat více je tato problematika diskutována v v kap. 6.

Zde jde pouze o ukázky měření na realizovaném přípravku v přílohách jsou na CD uloženy programy pro další možná měření na přípravku. Zde chci pouze demonstrovat funkčnost a vybraných příkladech.



Obr 7.3 Ukázka grafických průběhu zpracovaných v prostředí VEE (výstupní charakteristiky $I_C=f(U_{CE})$ při $I_B=\text{konst.}$ v zapojení SE (NPN)).



Obr 7.4 Ukázka grafických průběhu zpracovaných v prostředí VEE (graf závislosti $h_{21e}=f(I_C)$ při $U_{CE}=\text{konst.}$ v zapojení SE (NPN)).

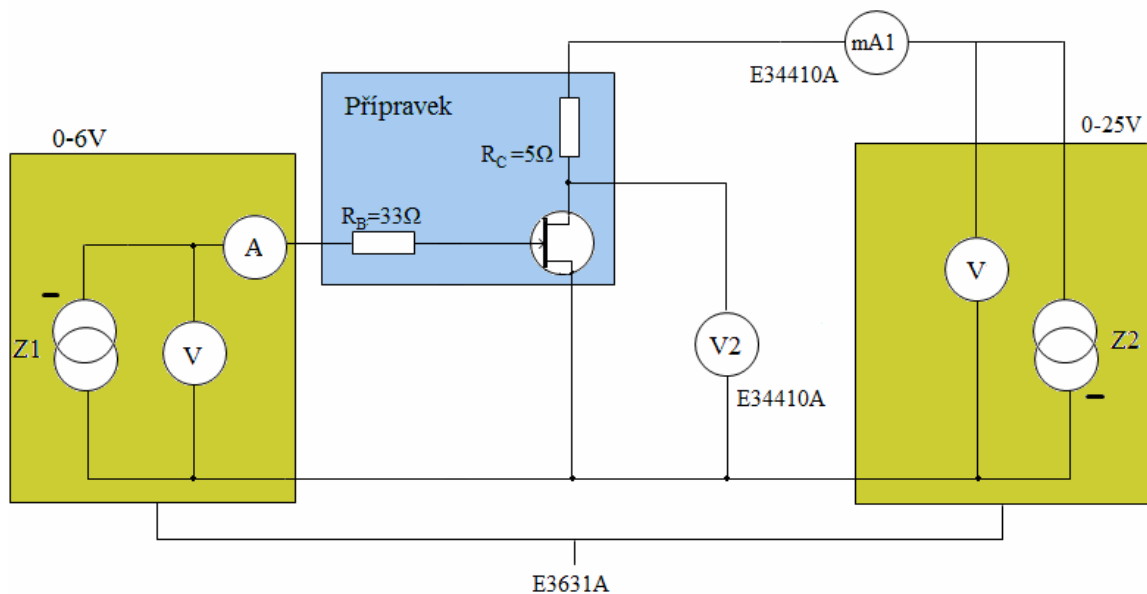
7.2 Návrh laboratorní měřicí úlohy pro unipolární tranzistory

V kap. 7.1 jsem se věnoval úloze pro měření statických vlastností bipolárních tranzistorů. V této kapitole půjde o popsání a řešení stejné problematiky změnou bude pouze typ tranzistoru a to unipolární v tomto konkrétním případě JFET s N kanálem (2SK 170). Vlastnosti unipolárních tranzistorů jsou detailněji popsány v kap. 2 a 3.

Co se návrhu měření týče, celá úloha bude koncipována pro možnost využití prostředí VEE jak je požadováno v zadání, což ovšem nebrání klasickému měření.

7.2.1 Zadání laboratorní úlohy pro zapojení SE (S)

1) Při měření na unipolárních tranzistorech je potřeba dobře dbát na napětí přikládané na vstupní svorky tranzistoru, proto si nejprve zjistíte o jaký typ tranzistoru se jedná, jaká je jeho vodivost a mezní hodnoty. Níže je popisováno měření na tranzistoru JFET s vodivostí N v zapojení SS. Po zjištění typu tranzistoru zkontrolujte správnost provedeného zapojení podle obr. 7.5. Dalším krokem by měla být kontrola poloh prepínačů na přípravku tedy typ zapojení tranzistoru podle tabulky, která by měla být k dispozici na pracovišti. Pro měření proudu I_D hlavně v I. kvadrantu použijte místo odečítání hodnot proudu přímo ze zdroje jeden z přiložených multimetrů důvodem je zvýšení přesnosti a věrohodnosti měření. Pokud vám vyzbyde čas můžete si vyzkoušet měření při odečítání hodnot přímo ze zdroje a zhodnotit rozdíly. Při zapojování mějte na paměti polaritu měřených veličin.



Obr 7.5 Zapojení pracoviště pro měření statických charakteristik unipolárních tranzistorů s vodivostí N (SS).

2) Spočtete mezní parametry tranzistoru nebo je určete z přiložených katalogových listů. Při zadávání hodnot na zdroji věnujte zvýšenou pozornost řádům nastavované veličiny.

3a) V prostředí VEE sestavte a otestujte program pro měření výstupních charakteristik na předloženém unipolárním tranzistoru. Veškeré ovládání všech přístrojů budiž realizováno prostřednictvím programového prostředí VEE nikoliv za pomoci HW přepínačů. Stěžejní ovládací prvky měření umístěte do bloku ovládacího panelu, tím se myslí bloky pro nastavování hodnot napětí, bloky Start, Graf apod. Funkčnost programu a zároveň výstupem této části budou proměřené 4 výstupní charakteristiky. Při měření využijte pro stanovení proudu I_D jeden s multimetrů v režimu ampérmetru, čímž se zaručí dostatečná přesnost jak je již zmíněno v prvním bodě. Do měření zakomponujte bloky vhodné pro měření výstupní admitance y_{21} a určete její velikost.

3b) Dalším krokem bude provedení návrhu programu umožňujícího proměření převodní charakteristiky předloženého unipolárního tranzistoru. Nejprve upravte původní zapojení, tak aby bylo možné tyto charakteristiky měřit (viz. bod 1) s dostatečnou přesností a za použití vhodných přístrojů. Napětí, pro které budete měření realizovat, volte na základě výstupních charakteristik. Dále program opatřete tak, že bude možno zjistit parametr y odpovídající danému kvadrantu a to jak graficky (tedy formou závislosti) tak i jeho číselná hodnota. Výstupem budiž graf převodní charakteristiky, graf a číselná hodnota maxima y parametru.

4) Modifikujte měření tak, že všechny jeho části spojíte do jednoho měření, které bude sekvenčně vykonávat jednotlivé jeho části.

7.2.2 Teoretický úvod

Po té co je provedeno určení mezních hodnot předloženého unipolárního tranzistoru, je potřeba mezní hodnoty definovat i na přístrojích. Konkrétně nás zajímá tedy zdroj kde mezní hodnoty zaneseme a tím se vyhneme zbytečnému možnému poškození tranzistoru. Pro unipolární tranzistory lze za kritické hodnoty považovat napětí U_{DS} velikost a polarita napětí U_{GS} a to jak pro I. tak i pro II. kvadrant. Teplota zde v našem případě není problémovým faktorem. Pro zadaný typ tranzistoru není potřeba realizovat ani chladič jelikož unipolární tranzistory jsou řízeny napětími a tím je kompenzován vliv Jouleova tepla.

Jak už bylo tedy zmíněno měřeným prvkem je JFET tranzistor s vodivostí N a v zapojení SS, kde pro měření statických charakteristik (výstupních) platí pro dané zapojení podle obr. 7.5, že přiváděné řídicí napětí U_{DS} je kladné naopak napětí U_{GS} je nutno nastavovat záporné jinak by mohlo dojít k nevratnému poškození tranzistoru, připomínám však, že mluvíme o JFET s vodivostí N u vodivosti P jsou nároky na polaritu odlišné! U obou zmíněných nastavovaných hodnot se samozřejmě řídíme katalogovými listy! Pro charakteristiky převodní tedy pro druhý kvadrant je zde rovněž potřeba dbát polaritu a napětí U_{GS} nastavovat v záporných hodnotách a U_{DS} kladné odpovídající výstupním charakteristikám.

Pro samotné měření máme tedy k dispozici dva multimetry dostupné z prostředí VEE pod označením ag34410a@UsbDevice1 (V1) a ag34410a@UsbDevice2 (V2). Zde je potřeba si dobře uvědomit využitelnost obou přístrojů v závislosti na přesnosti měření které jsou schopny dosáhnout v porovnání s dvou hladinovým zdrojem v programu zaneseným jako Z1(Z2) - hpe3631a@GPIB s adresou 5. Zejména při měření výstupních

charakteristik je potřeba přesného měření proudu a zde se odečítání hodnot ze zdroje ukazuje jako nepřesné.

Použité přístroje:

Agilent E34410AVoltmetr 1 (V1) – ve VEE evidován jako ag34410a@UsbDevice1;
Agilent E34410AVoltmetr 2 (V2) – ve VEE evidován jako ag34410a@UsbDevice2;
Agilent E3631AZdroj (Z1, Z2) – ve VEE evidován jako hpe3631a@GPIB
s adresou 5;

Přípravek pro měření;

Propojovací vodiče;

PC s příslušenstvím a softwarem VEE 8.0 Pro.

K proměření jsou zadány dva kvadranty první a druhý ostatní kvadranty se neměří, ale lze je dopočítat. V I. kvadrantu měříme závislost „kolektorového“ proudu I_D na měnícím se napětí U_{DS} při konstantní hodnotě napětí U_{GS} . Další je závislost vynášená do II. kvadrantu takzvaná převodní charakteristika tedy závislost proudu I_D na napětí U_{GS} při konstantní hodnotě napětí U_{DS} , které volíme z výstupních charakteristik. **Ještě jednou důrazně upozorňuji věnujte zvýšenou pozornost požadovaným přiváděným polaritám všech veličin!!!** Při určování admitančních parametrů tedy y parametrů vycházíme z rovnic (7.5) a (7.6), vztahy lze zakomponovat přímo do navrženého programu a pro odpovídající parametry vynést odpovídající závislosti

$$y_{21} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_1} = \frac{i_2}{u_1} \quad \text{pro } u_2 = \Delta U_{DS} = \text{konst.} \quad (7.7)$$

$$y_{22} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{DS}} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} = \frac{i_2}{u_2} \quad \text{pro } u_2 = \Delta U_{GS} = \text{konst.} \quad (7.8)$$

7.2.3 Postup měření

Určete mezní parametry nejlépe z katalogových listů předloženého unipolárního tranzistoru. Po jejich určení si projděte zapojení přípravku do měřicího obvodu a podle vlastního uvážení zapojení modifikujte, uvědomte si však, že je potřeba dosáhnout určité přesnosti měření a podle toho volte přístroje.

Spusťte prostředí VEE (ikona na ploše). Vkládání zdrojů a měřících přístrojů se realizuje pomocí menu I/O v záložce Instrument manager. Zkontrolujte, zda jsou v programu namapovány přístroje správně. Zároveň si přístroje prověřte přímo v těle programu aby nedošlo ke zbytečné záměně. Seznam přístrojů použitých pro tuto úlohu je sepsán v teoretickém úvodu. Po ověření proved'te nastavení limitních parametrů v obou hladinách zdroje (jestliže obě budete používat) výstup však ponechte stále neaktivní. Pro nastavování přístrojů a jednotlivých kroků měření jsou vypsány následující základní příkazy nejde však ani zdaleka o úplný seznam a je potřeba vlastní kreativity při využívání různých bloků, podmínek a podobně. Snažte se postupovat co nejpřesněji a tak aby výsledný program byl co nejefektivnější a změřené výstupy co nejpřesnější.

Seznam příkazů pro úlohu:

- *RST - restart měřicího přístroje
- *IDN - odešle inicializaci měřicího přístroje
- *WAI - vyšle na měřicí přístroj dotaz, který se vrátí zpět jakmile je dokončena vykonávaná operace;
- MEAS:VOLT? - změří napětí na zvoleném (nastaveném) přístroji;
- MEAS:CURR? - změří proud na zvoleném přístroji;
- INST:SEL P6V - nastaví zdroj do režimu zadávání parametrů a měření, a volí používanou hladinu zdroje – zde to je 0-6V;
- INST:SEL P25V - nastaví zdroj do režimu zadávání parametrů a měření, a volí používanou hladinu zdroje – zde to je 0-25V;
- VOLT xxxV - slouží pro nastavení hodnoty napětí pro příslušnou hladinu zdroje. Automaticky je hodnota xxxV ve voltech a může jít o libovolné reálné číslo, kromě tohoto zápisu je možný i zápis s určením jednotek zadávané hodnoty mV, V úloze používejte zápisu s jednotkami je zde menší pravděpodobnost chyby při zadávání;
- CURR xxxA - stejně jako VOLT xxxV, ale nastavují se hodnoty proudového omezení;
- OUTPUT ON - příkaz uvede všechny zdroje do pohotovostního stavu jsou tedy aktivní a připojeny k výstupním svorkám;
- OUTPUT OFF - uvede všechny zdroje do stavu nečinnosti a výstupní svorky nejsou připojeny;

Na začátku měření restartujte jednotlivé měřicí přístroje, popřípadě příkazem OUTPUT OFF odpojte měřený tranzistor od zdroje a po dokončení měření úlohy vždy deaktivujte zdroj!!! V případě ponechání zdroje v aktivním režimu zdroj neustále dodává výkon do zátěže dle posledních zadaných hodnot což nejsou jsou v tomto případě ty nejvyšší nicméně je zbytečné dlouhodobě tranzistor zatěžovat.

K samotné struktuře programu určeného k měření výstupních charakteristik ale i ke struktuře programů všeobecně se dá přistupovat jako k programování. Hlavní program se skládá z vnořených smyček tedy jakýchsi podprogramů. Počet vnořených smyček je prakticky neomezený, ale s jejich množstvím samozřejmě roste složitost programu proto je dobré počet smyček volit co nejmenší před měřením je tedy potřeba si uvědomit kolik charakteristik pro jaký kvadrant budeme měřit a kolik parametrů pro ně bude třeba v jednotlivých programech definovat. Smyčky v našem případě budeme volit typu **For Range** (lze volit i jiné) při nastavování jednotlivých řídicích parametrů si dobře uvědomte v jaké hladině zdroje jej budete nastavovat a podle toho se mezi zdroji přepínejte. Využívejte podmínek například pro ošetření mezních parametrů.

Ad 3a) Pro sestavení programu využijeme dvou smyček. V hlavní větvi ošetřete přístroje a nastavte limitní hodnoty na zdroji. Hladinu 0-6V zdroje nastavíme do napětíového režimu s vhodným mezním parametrem vycházíme při tom z katalogových listů. Tímto zdrojem budeme během měření výstupních charakteristik (7.9) nastavovat hodnoty napětí U_{GS} (dbejte na polaritu). Ve druhé smyčce pro zdroj 0-25V nastavený rovněž v napětíovém režimu budeme regulovat napětí U_{DS} v rozmezí odpovídajícím katalogovým listům nebo specifikaci učitele. Pro samotné měření si zvolte libovolné

z přiložených přístrojů (ovšem vhodně zapojené) . Výsledné křivky vyneste například pomocí objektu *X vs Y plot* který je potřeba opatřit řídicím vstupem *Next Curve* zajišťujícím nespojité přechody mezi křivkami. Měření opatřete vhodnou podmínkou zamezující trvalejšímu setrvání měření na mezních hodnotách. Celý cyklus měření ukončete tak že rozpojíte výstupní svorky zdroje *OUTPUT OFF*.

$$I_D=f(U_{DS}) \text{ pro } U_{GS}=\text{konst.} \quad (7.9)$$

Ad 3b) Opět vhodně zvolíme hladiny zdroje a přiřadíme jim potřebný režim a nastavíme mezní hodnoty. Pro měření převodní charakteristiky unipolárního tranzistoru (7.10), zdroj v hladině 0-6 i 0-25V nastavíme do napět'ového režimu. Přičemž měření provedeme pro jednu křivku vycházející z předchozího měření výstupních charakteristik. Zdroj 0-25V nastavíme na konstantní hodnotu stanoveného napětí U_{DS} a pro zadané napětí měníme za pomoci zdroje 0-6V napětí U_{GS} . Opět je potřeba si uvědomit jak přesné měření požadují a podle toho volit na kterém z přístrojů jakou veličinu měřit. Výslednou křivku převodní charakteristiky vynesu za pomoci například *X vs Y plot*.

Dále do měření vložíme vhodný objekt (např. *Formula*) a na tento přivedeme potřebné měřené veličiny abychom mohli za pomoci jednoduchého vzorce (7.7) stanovit parametr y_{21} výslednou hodnotu je potřeba zpracovat za pomoci bloku *Collector*, který z přivedených hodnot vytvoří *IDim Array* posloupnost, kterou pošle na výstup po aktivaci řídicího vstupu *XEQ* . Z těchto pak vhodným prvkem a pomocí funkce *max(x)* určete maximum a to přeneste na display. Měření opět opatřete vhodnou podmínkou aby zbytečně nedocházelo k překročení mezních hodnot předložené součástky a dále měření ukončete tak že rozpojíte výstupní svorky zdroje *OUTPUT OFF*.

$$I_D=f(U_{GS}) \text{ pro } U_{DS}=\text{konst.} \quad (7.10)$$

4) Modifikujte měření tak, že všechny jeho části spojíte do jednoho měření, které bude sekvenčně vykonávat jednotlivé jeho části. Využijte například blok *Until Break*.

7.2.4 Vypracování měřicí úlohy

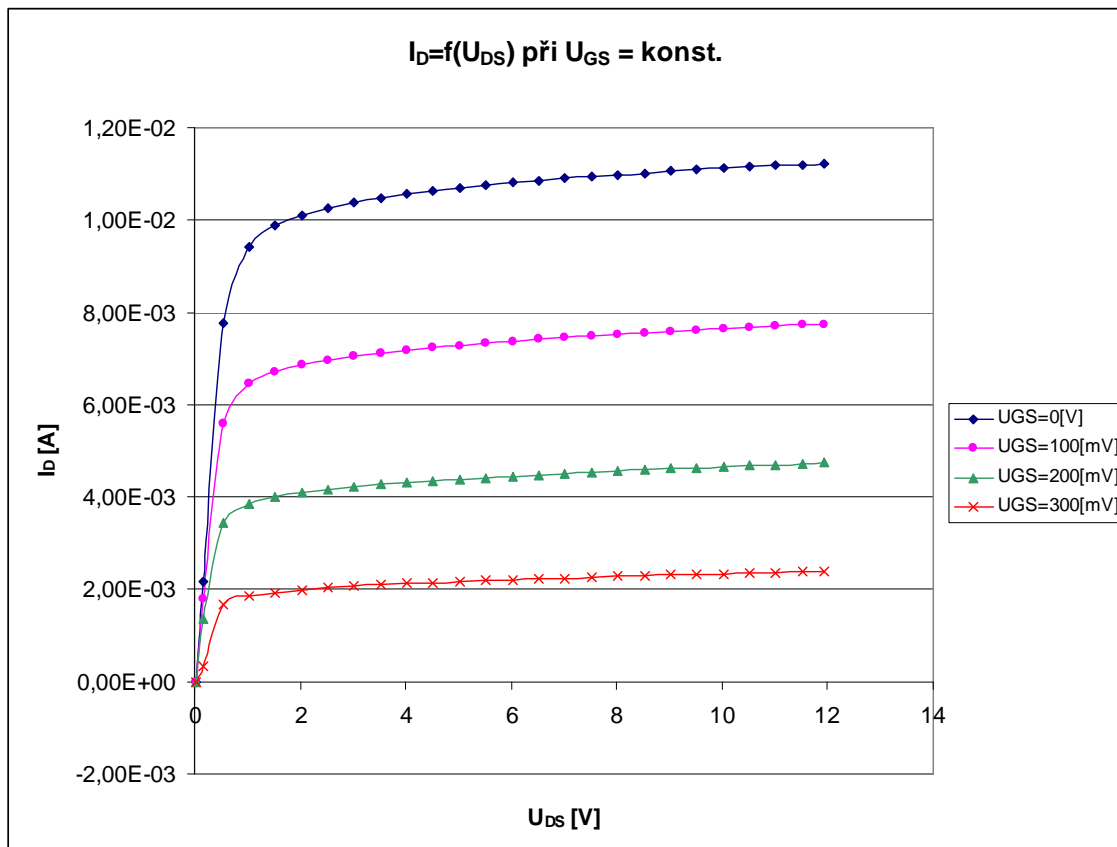
Na příloženém CD obsahujícím elektronickou verzi práce jsou k dispozici vzorové programy napsané pro výše zmíněné úlohy. Jde o programy s označením:

- Výstupní ch. - tento program je napsaný pro měření výstupních charakteristik;
- Převodní ch. - program je napsaný pro měření převodních charakteristik a h_{21e} parametru.

Kromě zmíněných programů, CD obsahuje i upravené verze programu umožňující export naměřených dat do tabulek pro jejich další zpracování.

7.2.5 Naměřené hodnoty

V tab. 7.2 je ukázka hodnot naměřených pro výstupní charakteristiku JFET tranzistoru s N kanálem v zapojení SS. Tedy tranzistoru měřeného za pomoci přípravku. Hodnoty jsou vyexportovány za pomoci programu z prostředí VEE a zpracovány pomocí programu Excel. Jde pouze o ukázkou, další programy pro měření zbývajících charakteristik jsou umístěny na CD formou přílohy, zde pouze demonstrují naměřená data.



Obr 7.6 Grafické zobrazení výstupních charakteristik zpracované v programu Excel.

Tab. 7.2 Hodnoty naměřené pro výstupní charakteristiky JFET (N) tranzistoru v zapojení SS.

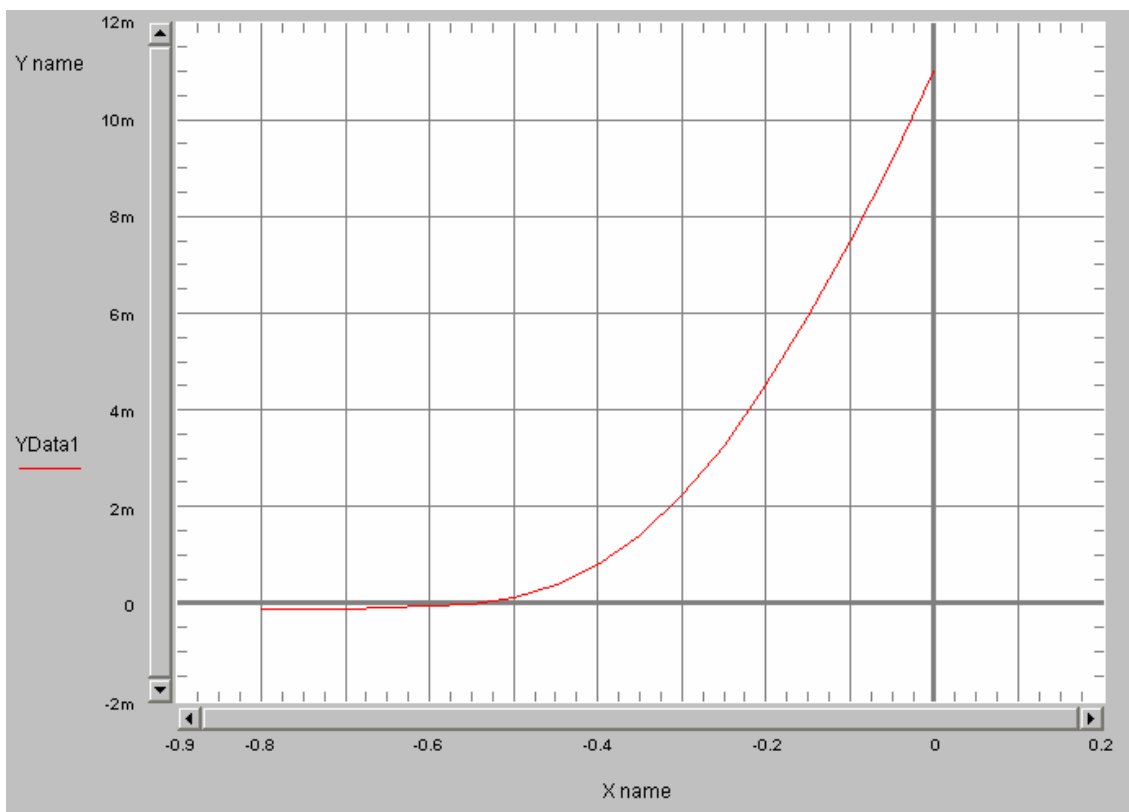
U_{GS} [mV]	0	-100	-200	-300
U_{DS} [V]	I_D [mA]	I_D [mA]	I_D [mA]	I_D [mA]
0,014887	-4,95E-06	-3,39E-07	-6,88E-07	-3,67E-07
0,17	0,002171	0,001786	0,001358	0,000332
0,540194	0,007764	0,00559	0,003442	0,001664
1,031377	0,00943	0,006449	0,003845	0,001847
1,528825	0,009871	0,006714	0,004001	0,001933
2,027425	0,010105	0,006863	0,004098	0,00199
2,526059	0,010262	0,006969	0,004169	0,002032
3,025532	0,010382	0,007052	0,004226	0,002068
3,525529	0,010478	0,007122	0,004274	0,002098
4,025899	0,010561	0,007181	0,004316	0,002125
4,525168	0,010633	0,007235	0,004355	0,002148
5,024746	0,010695	0,007285	0,004391	0,002171
5,524485	0,010754	0,007331	0,004423	0,002191
6,023928	0,010806	0,007373	0,004454	0,00221
6,523526	0,010856	0,007413	0,004483	0,002229
7,023356	0,010899	0,00745	0,004511	0,002247
7,523283	0,010942	0,007486	0,004538	0,002263
8,023558	0,01098	0,007521	0,004564	0,002279
8,523306	0,011018	0,007554	0,004589	0,002294
9,023173	0,011054	0,007587	0,004613	0,002309
9,522501	0,011087	0,007617	0,004637	0,002323
10,02248	0,011119	0,007647	0,004659	0,002338
10,52234	0,011149	0,007675	0,004681	0,002351
11,02177	0,011179	0,007703	0,004703	0,002365
11,52258	0,011206	0,00773	0,004724	0,002378
11,92196	0,011228	0,007751	0,00474	0,002388

Na obr. 7.6 je ukázka naměřených hodnot zpracovaných programem Excel. Měření bylo provedeno s krokem $U_{DS} = 0,1$ V pro názornou ukázkou jsem naměřená data redukoval na krok 0,5 V což je pro správnou rekonstrukci naměřených průběhů dostatečné.

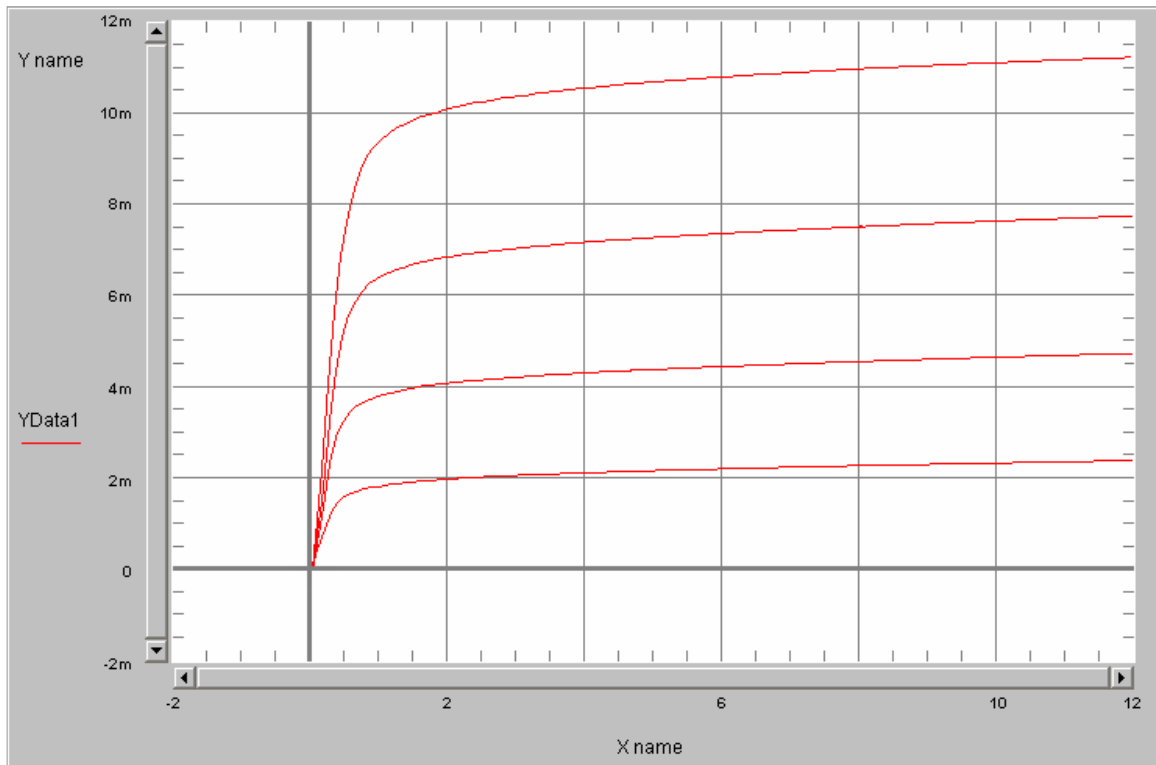
7.2.6 Zpracování naměřených hodnot

Data je samozřejmě možné nechat vykreslit přímo do grafu v programu navrženém ve VEE jak je ukázáno na obr. 7.7 a 7.8 kde je ukázka výstupních charakteristik JFET (N) tranzistoru a ukázka převodní charakteristiky JFET (N) tranzistoru. Chceme-li však s daty dále pracovat je možné nechat data exportovat viz. tab. 7.2 a různě modifikovat a zpracovat i jinými programy stejně jako v případě bipolárních tranzistorů. Ukázka zpracování programem Excel je na obr. 7.6, toto však není jediná možnost, ovšem zpracovávání dat není předmětem mé práce. Pro export naměřených hodnot je nutno hlavní program ve VEE opatřit vhodným podprogramem zajišťujícím extrakci potřebných dat více je zmíněno v kap. 6.

Zde jsou pouze uvedeny ukázky měření na přípravku, v přílohách jsou na CD uloženy programy pro další možná měření na přípravku. Zde chci pouze demonstrovat funkčnost a jakýsi příklad měření.



Obr 7.7 Ukázka grafického průběhu zpracovaných v prostředí VEE (převodní charakteristika $I_D=f(U_{GS})$ při $U_{DS}=\text{konst.}$ v zapojení SS).



Obr 7.8 Ukázka grafických průběhu zpracovaných v prostředí VEE (výstupní charakteristiky $I_D=f(U_{DS})$ při $U_{GS}=\text{konst.}$ v zapojení SS).

8 Závěr

Vytyčeným cílem bakalářské práce byl návrh jednoho univerzálního přípravku pro měření bipolárních a unipolárních tranzistorů. Z dostupných prostředků, v rámci fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií, byla provedena analýza dosavadních způsobů řešení zadaného problému, tedy měření vlastností bipolárních a unipolárních tranzistorů. V úvodu práce byla zpracována a sepsána teorie tranzistorů a způsoby provádění měření charakteristik tranzistorů. Dosavadní měření (v rámci předmětu MREM) byla prováděna na přípravcích neumožňujících výměnu typu tranzistoru. K dispozici byl vždy pouze jeden typ tranzistoru (bipolární, unipolární / PNP, NPN) zapojený v obvodu, umožňujícím vždy jeden typ zapojení.

Po důkladné analýze problému a konzultacích byl proveden návrh přípravku pro měření na bipolárních tranzistorech, který byl zahrnut v rámci semestrálního projektu. Po zkonstruování přípravku a provedení cvičných měření na něm a to i v rámci unipolárních tranzistorů jsem z naměřených dat usoudil, že přípravek bude s dostatečnou přesností možno použít, rovněž pro měření tranzistorů unipolárních a pro snazší manipulaci při obměnách byla k přípravku navržena redukce pro zapojování unipolárních tranzistorů. Tímto máme tedy k dispozici přípravek umožňující obměnu typu tranzistoru BJT a FET, ale zároveň vzhledem k použití páčkových přepínačů umožňující i změnu zapojení tranzistorů v měřicím obvodu.

Po hardwarové stránce byl tedy hlavním výstupem přípravek pro měření včetně redukce umožňující snazší připojení unipolárních tranzistorů.

Vzhledem k tomu, že přípravek byl navrhován do laboratoří předmětu MREM, kde byly prováděny i veškeré testovací měření, bylo potřeba navrhnout měřicí úlohy tak aby byly realizovatelné pro využití právě v rámci těchto laboratoří. K navrženým měřicím úlohám byla zpracována stručná teoretická část, která by měla studentovi pomoci lépe pochopit principy měření a měřený prvek samotný. Dále byly tedy navrženy laboratorní úlohy jak pro měření na bipolárních tak i na unipolárních tranzistorech. Výsledná navržená úloha se tedy skládá ze zadání měřicí úlohy, stručného teoretického úvodu a odpovídajícího postupu měření sestaveného, tak aby odpovídal možnostem a znalostem studentů.

Testovací část, která spočívala v ověření funkčnosti přípravku a zároveň navržení ukázkových programů pro laboratorní úlohy byla realizována s využitím prostředí VEE 8.0 Pro. Završením těchto návrhů bylo sestavení programů (viz. Příloha na CD) obsahujících jednak ukázkové programy jednotlivých měření statických charakteristik navržených pro pracoviště popisované v rámci této práce, ale mimo těchto i programy v některých případech rozšířené o bloky a podmínky umožňující export naměřených dat a uložení do tabulek pro jejich další zpracování.

Shrnu-li tedy svou práci v jejím závěru máme k dispozici univerzální měřicí přípravek pro měření vlastností tranzistorů. Sestavené úlohy použitelné v rámci laboratorních cvičení a vzorové programy sestavené pro dané pracoviště. Dále pak byl realizován přípravek s možností obměny typu zapojení a typu tranzistoru.

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Základní rozdělení tranzistorů z hlediska vnitřní struktury.....	3 -
Obr. 2.2 Tranzistor jako spínač a) v zavřeném stavu, b) v otevřeném stavu [1].	5 -
Obr. 2.3 Časové průběhy napětí a proudů při spínání (plnou spínání do saturace, čerchovanou spínání do aktivní oblasti).	6 -
Obr. 2.4 Omezení pracovní oblasti tranzistoru v zapojení SE s vyznačením maximálních veličin: ($U_{CEMax} = 30\text{ V}$, $I_{Max} = 200\text{ mA}$ a $P_{CMax} = 1\text{ W}$).	8 -
Obr. 2.5 Struktury, zjednodušená diodová náhradní schémata a schematické značky obou typů bipolárních tranzistorů.	8 -
Obr. 2.7 Statické charakteristiky bipolárního tranzistoru NPN pro zapojení SE.....	12 -
Obr. 2.8 Rozdělení kvadrantů statických charakteristik bipolárních tranzistorů.....	13 -
Obr. 2.9 Ukázka dělení unipolárních tranzistorů.	18 -
Obr. 2.10 Schematická značka JFET tranzistoru pro a)NJFET, b) PJFET.....	19 -
Obr. 2.11 Rozdělení kvadrantů statických charakteristik unipolárních tranzistorů.	19 -
Obr. 2.12 Statické charakteristiky tranzistoru JFET s vodivostí N (I. a II. kvadrant).....	20 -
Obr. 2.13 – Zapojení unipolárních tranzistorů (NJFET) a) společný emitor, b) společný kolektor, c) společné hradlo.....	21 -
Obr. 2.14 Polarita přiváděného napětí na FET tranzistor v zapojení SS.a) kanál N,- b) kanál P.	22 -
Obr. 3.1 Schéma zapojení pro měření statických charakteristik BJT tranzistorů (SE).....	23 -
Obr. 3.2 Schéma zapojení pro měření statických charakteristik BJT tranzistorů (SC).	24 -
Obr. 3.3 Schéma zapojení pro měření statických charakteristik BJT tranzistorů (SB).	24 -
Obr. 3.4 Označení poloh páčkového přepínače.	25 -
Obr. 3.6 Schéma zapojení pro měření tranzistoru ve spínacím režimu.	26 -
Obr. 3.7 Zapojení pro měření statických charakteristik tranzistoru NJFET v zapojení SS.	27 -
Obr. 3.8 Zapojení pro měření statických charakteristik tranzistoru NJFET v zapojení SD.	28 -
Obr. 3.9 Označení poloh páčkového přepínače.	29 -
Obr. 5.1 Konektor SBZ	33 -
Obr. 5.2 Páčkový přepínač MTS 500 APC.....	33 -
.....	34 -
Obr. 5.3 Katalogové výstupní charakteristiky tranzistoru 2SC1061 ($T_A=25^0\text{C}$).	35 -
Obr. 5.4 Katalogové výstupní charakteristiky tranzistoru 2SK170 ($T_A=25^0\text{C}$).	36 -
a) b)	36 -
Obr. 5.4 Pouzdro TO220 a), Pouzdro TO-92 b).	36 -
Obr. 5.5 Fotodokumentace přípravku pro měření vlastností bipolárních tranzistorů.	38 -
Obr. 5.6 Blokové schéma pro měření statistik tranzistorů (SE).	39 -
Obr. 5.7 Výstup programu Eagle použitelný pro vynesení cest na desku.	39 -
Obr. 5.8 Výstup programu Eagle sloužící pro osazování desky.	40 -
Obr. 5.9 Matice sloužící pro odvrtání děr na DPS.	40 -
Obr. 6.1 Ukázka prostředí programu VEE.....	43 -

Obr. 7.1 Zapojení pracoviště pro měření statických charakteristik s NPN tranzistorem SE.....	44 -
Obr 7.3 Ukázka grafických průběhu zpracovaných v prostředí VEE (výstupní charakteristiky $I_C=f(U_{CE})$ při $I_B=\text{konst.}$ v zapojení SE (NPN)).	52 -
Obr 7.5 Zapojení pracoviště pro měření statických charakteristik unipolárních tranzistorů s vodivostí N (SS).	53 -
Obr 7.6 Grafické zobrazení výstupních charakteristik zpracované v programu Excel.	58 -
Obr 7.7 Ukázka grafických průběhu zpracovaných v prostředí VEE (převodní charakteristika $I_D=f(U_{GS})$ při $U_{DS}=\text{konst.}$ v zapojení SS).	60 -
Obr 7.8 Ukázka grafických průběhu zpracovaných v prostředí VEE (výstupní charakteristiky $I_D=f(U_{DS})$ při $U_{GS}=\text{konst.}$ v zapojení SS).	61 -

Seznam tabulek

Tab. 2.2 Smysl polarizačních proudů a napětí pro jednotlivé typy zapojení s danou vodivostí.....	- 10 -
Tab. 2.1 Hlavní vlastnosti bipolárního tranzistoru v zapojení SE v režimech PNP a NPN.	- 11 -
Tab. 2.3 Vztahy pro vzájemný přepoččet mezi hybridními a admitančními parametry.	- 16 -
Tab. 3.1 Nastavení páčkových přepínačů pro jednotlivá zapojení pro BJT.....	- 25 -
Tab. 3.2 Ukázka tabulky pro měření vstupních charakteristik BJT tranzistoru (SE).-	26 -
Tab. 3.2 Nastavení páčkových přepínačů pro jednotlivá zapojení pro unipolární tranzistoru.	- 29 -
Tab. 5.1 Mezní hodnoty pro tranzistor 2SC1061 udávané výrobcem ($T_A=25^0C$).	- 35 -
Tab. 5.2 Mezní hodnoty pro tranzistor 2SA473 udávané výrobcem ($T_A=25^0C$).	- 35 -
Tab. 5.3 Mezní hodnoty pro tranzistor 2SK170 udávané výrobcem ($T_A=25^0C$).	- 36 -
Tab. 5.4 Mezní hodnoty pro tranzistor 2N3820 udávané výrobcem ($T_A=25^0C$).	- 36 -
Tab. 7.1 Hodnoty naměřené pro výstupní charakteristiky BJT tranzistoru v zapojení SE (NPN).....	- 50 -
Obr 7.2 Grafické zobrazení výstupních charakteristik zpracované v programu Excel.	- 51 -
Tab. 7.2 Hodnoty naměřené pro výstupní charakteristiky JFET (N) tranzistoru v zapojení SS.	- 59 -

Literatura

- [1] BOUŠEK, J., *Elektronické součástky* [online], [cit. 15.11. 2008]. Elektronický učební text, 240 stran, dostupné z <<http://www.feec.vutbr.cz>>.
- [2] VRBA, K., *Konstrukce elektronických zařízení* [online]. Elektronický učební text, 200 stran, dostupné z <<http://www.feec.vutbr.cz>>.
- [3] VRBA, K., *Konstrukce elektronických zařízení-návrh plošných spojů* [online]. Elektronický učební text, 72 stran, dostupné z <<http://www.feec.vutbr.cz>>.
- [4] LÁNÍČEK, R., *Elektronika : obvody, součástky, děje*. 1. vyd. Praha : BEN, 2001. 480 s. ISBN 80-86056-25-2.
- [5] DOLEČEK, J., *Moderní učebnice elektroniky - 2. díl*. 1. vyd. Praha : BEN, 2005. 208 s. ISBN 80-7300-161-2.
- [6] BRZOBOHATÝ, J., *Elektronické součástky* [online]. Elektronický učební text, 205 stran, dostupné z <<http://www.feec.vutbr.cz>>.
- [7] GM ELEKTRONIC, *Nabídka firmy GME* [online], [cit. 28.11. 2008], dostupné z <<http://www.gme.cz>>.
- [8] WIKIPEDIA, *Internetová encyklopedie* [online], [cit. 8.11. 2008], dostupné z <<http://www.cs.wikipedia.org>>.
- [9] Agilent Technologies, *Produkty firmy AGILENT Technologies* [online], [cit. 8.12. 2008], dostupné z <<http://www.agilent.com>>.
- [10] EAGLE, *Stránky návrhového programu Eagle* [online], dostupné z <<http://www.eagle.cz>, <http://www.cadsoft.de>>.
- [11] EAGLE, *Manuál pro návrhový program Eagle* [online], dostupné z <http://web.mit.edu/eaglecad_v4.16/manual-eng.pdf >.
- [12] BAJER, A., *Plošné spoje, přednáškové skriptum* [online], Dostupné z <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bajer/BNKP/08_Plo%C5%A1n%C3%A9%20spoje.doc>.
- [13] VOVES, J., *Elektronika polovodičů, prezentace přednášek* [online], dostupné z <<http://www.micro.feld.cvut.cz/home/34EPO/prednasky/>>.
- [14] DATASHEET CATALOG, *Databáze datasheetů elektronických komponentů* [online], [cit. 2.12. 2008], dostupné z <www.datasheetcatalog.com>.
- [15] FUKÁTKO, T., FUKÁTKO, J., *Teplo a chlazení v elektronice*. [cit. 2.12. 2008] Ben – technická literatura. Praha, 2006.
- [16] Tesla. Národní podnik Tesla. Rožnov pod Radhoštěm, *Katalog polovodičových součástek*. 1982.

- [17] Agilent Technologies, *VEE Pro Help (součást programového prostředí VEE 8.0)*.
- [18] Agilent Technologies, *Agilent E3631A Triple Output DC Power Supply, User's Guide*. [online], [cit. 6.2.2009]. Dostupné z <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/E3631-90002.pdf>>.
- [19] Agilent Technologies, *Agilent 34410A/11A 6. Digit Mutlimeter, User's Guide*. [online], [cit.8.2.2009]. Dostupné z <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/34410-90001.pdf>>.
- [20] MUSIL, V., BOUŠEK, J., HORÁK, M., HÉGR, O., *Elektronické součástky. Elektronické skriptum*. [online.]. Brno: FEKT VUT v Brně. [cit. 8.2.2009]. Dostupné z <https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/umel/Elektronicke_soucastky_S.pdf>.
- [21] Brandštetter P., *Elektronika - Prvky elektronických obvodů* [online], [cit. 11.4. 2009]. Elektronický učební text, 142 stran, dostupné z <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/EL/Brandstetter_Elektronika_text.pdf>.