

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Automatizované měření voltampérových charakteristik
tranzistorů pomocí LabVIEW**

**Vedoucí práce:
Autor:**

**Ing. Karel Hromadka
Jan Záruba**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan ZÁRUBA**
Osobní číslo: **E09B0211P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Automatizované měření voltampérových charakteristik tranzistorů pomocí LabVIEW**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s vývojovým prostředím LabVIEW a stručně ho popište.
2. Navrhněte a vytvořte program v LabVIEW pro měření voltampérových charakteristik tranzistorů pomocí modulu NI USB - 6008/6009.
3. Navrhněte a realizujte přípravek pro připojování různých tranzistorů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

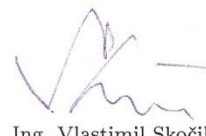
1. **Začínáme s LabVIEW / Jaroslav Vlach, Josef Havlíček, Martin Vlach. – 1. vyd. – Praha : BEN - technická literatura, 2008. – 247 s.**
2. **Elektronické informační zdroje**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Karel Hromadka**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Bakalářská práce se zabývá problematikou automatizovaného měření voltampérových charakteristik tranzistorů. V teoretické části jsou popsány parametry a vlastnostmi tranzistorů a popisuje vývojové prostředí LabVIEW. Pro účely měření byla použita multifunkční měřicí karta NI USB-6008/6009 od společnosti National Instruments. Softwarová část byla zpracována ve vývojovém prostředí LabVIEW. Výsledky práce již byly využity pro automatizaci laboratorní úlohy v předmětu Speciální součástky pro elektroniku.

Klíčová slova

Tranzistory, Statické charakteristiky, LabVIEW, National Instruments, DQA, Automatizované měření.

Abstract

This undergraduate thesis deals with the issues of automatic measurement of transistor voltamp characteristics. The theoretical part focuses on the basic parameters and qualities of transistors and describes the LabVIEW Development interface. The multi-purpose measuring card NI USB-6008/6009 has been utilized for the purposes of measurement. The software part was processed in the Development Interface LabVIEW. The results of the thesis have already been used for the automation during the lab assignment in the subject Special Spare Parts for Electronics.

Key words

Transistor, Static characteristic, LabVIEW, National Instruments, DQA, Automated Measurement.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 5.6.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Děkuji touto cestou především vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlovi Hromadkovi, za odborné vedení, připomínky a další cenné rady při zpracování závěrečného projektu. Dále bych chtěl poděkovat Lud'kovi Zárubovi z firmy Automa CZ s.r.o. za konzultace a poskytnutí materiálů k programu LabVIEW.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| OBSAH | 7 |
| ÚVOD | 8 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 9 |
| 1 TRANZISTORY | 10 |
| 1.1 BIPOLÁRNÍ TRANZISTOR | 11 |
| 1.2 ZÁKLADNÍ STRUKTURA | 11 |
| 1.3 ČINNOST BIPOLÁRNÍHO TRANZISTORU | 12 |
| 1.4 ZÁKLADNÍ ZAPOJENÍ BIPOLÁRNÍHO TRANZISTORU | 13 |
| 1.4.1 Zapojení se společnou bází (SB) | 13 |
| 1.4.2 Zapojení se společným emitorem (SE) | 14 |
| 1.4.3 Zapojení se společným kolektorem (SC) | 14 |
| 1.5 STATICKÉ CHARAKTERISTIKY BIPOLÁRNÍHO TRANZISTORU | 15 |
| 2 LABVIEW | 18 |
| 2.1 ČELNÍ PANEL (FRONT PANEL) | 18 |
| 2.2 BLOKOVÝ DIAGRAM (BLOCK DIAGRAM) | 19 |
| 2.3 KONTROLY A INDIKÁTORY (CONTROLS AND INDICATORS) | 20 |
| 2.4 DATOVÉ TYPY (DATA TYPES) | 21 |
| 2.5 MULTIFUNKČNÍ KARTA NI USB-6008/6009 | 22 |
| 3 MĚŘICÍ PŘÍPRAVEK | 25 |
| 3.1 SCHÉMA MĚŘICÍHO PŘÍPRAVKU | 25 |
| 3.2 REALIZACE | 25 |
| 3.3 PROPOJENÍ S KARTOU NI USB-6008/6009 | 26 |
| 4 SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ | 27 |
| 4.1 ČELNÍ PANEL | 27 |
| 4.2 NASTAVENÍ DAQ ASISTENTA | 30 |
| 4.2.1 Výstupy karty | 30 |
| 4.2.2 Vstupy z karty | 31 |
| 4.3 STRUKTURA PROGRAMU | 33 |
| 4.3.1 Zapnutí a vypnutí měření | 33 |
| 4.3.2 Výpočet napětí zdrojů | 34 |
| 4.3.3 Nastavení výstupních napětí karty | 35 |
| 4.3.4 Čtení a ukládání naměřených hodnot | 35 |
| 4.3.5 Ukončení měření a zpracování dat | 36 |
| 5 MĚŘICÍ ÚLOHA | 38 |
| 5.1 ZADÁNÍ ÚLOHY | 38 |
| 5.2 TEORETICKÝ ÚVOD | 38 |
| 5.3 VLASTNÍ MĚŘENÍ | 38 |
| 5.3.1 Postup měření | 38 |
| 5.3.2 Naměřené hodnoty | 40 |
| 5.3.3 Grafy | 40 |
| ZÁVĚR | 41 |
| POUŽITÁ LITERATURA | 42 |
| PŘÍLOHY | I |

Úvod

Tranzistory byly objeveny roku 1947. Jsou to polovodičové součástky nejčastěji se třemi elektrodami. V závislosti na konkrétním zapojení umožňují zesilovat proud, napětí, či obě veličiny současně.

Při manuálním měření voltampérových charakteristik tranzistorů je zapotřebí odečítat vždy několik hodnot např. z multimetru a zapisovat je do tabulky. Při automatizovaném měření se nastaví pouze pro jaké napětí či proudy chceme tranzistor měřit a po spuštění měření získáme okamžitě grafy a tabulky v elektronické podobě, které můžeme dále zpracovávat.

Bakalářská práce je zaměřena na automatizované měření statických charakteristik bipolárního tranzistoru. V první části práce jsou popsány vlastnosti a způsoby zapojení bipolárních tranzistorů.

V druhé části je popsáno vývojové prostředí a možnosti využití programu LabVIEW, který je vhodný pro měření a ovládání průmyslových aplikací. Jsou zde také uvedeny vlastnosti a parametry multifunkční karty NI USB-6008/6009, která byla použita pro praktickou část bakalářské práce.

V třetí části je navrhnout měřicí přípravek pro měření tranzistoru v zapojení se společným emitorem. Tento přípravek může být použit samostatně pro manuální měření tranzistorů a také pro automatizované měření pomocí multifunkční měřicí karty NI USB-6008/6009. V další je popsána struktura vytvořeného programu. Tato část také popisuje uživatelské rozhraní programu a možnosti jeho ovládání.

Poslední část práce se zabývá možnostmi využití měřicího přípravku a programu při laboratorních úlohách.

Tato bakalářská práce byla vytvořena pro praktické použití v předmětu Speciální součástky pro elektroniku (KET / SPS).

Seznam použitých symbolů a zkratk

| | |
|----------------|---|
| U [V] | elektrické napětí |
| I [A] | elektrický proud |
| R [Ω] | elektrický odpor |
| DAQ | Data Acquisition |
| NI | National Instruments |
| VI | Virtual Instruments (virtuální přístroje) |
| DPS | deska plošného spoje |
| AO | analogový výstup |
| AI | analogový vstup |

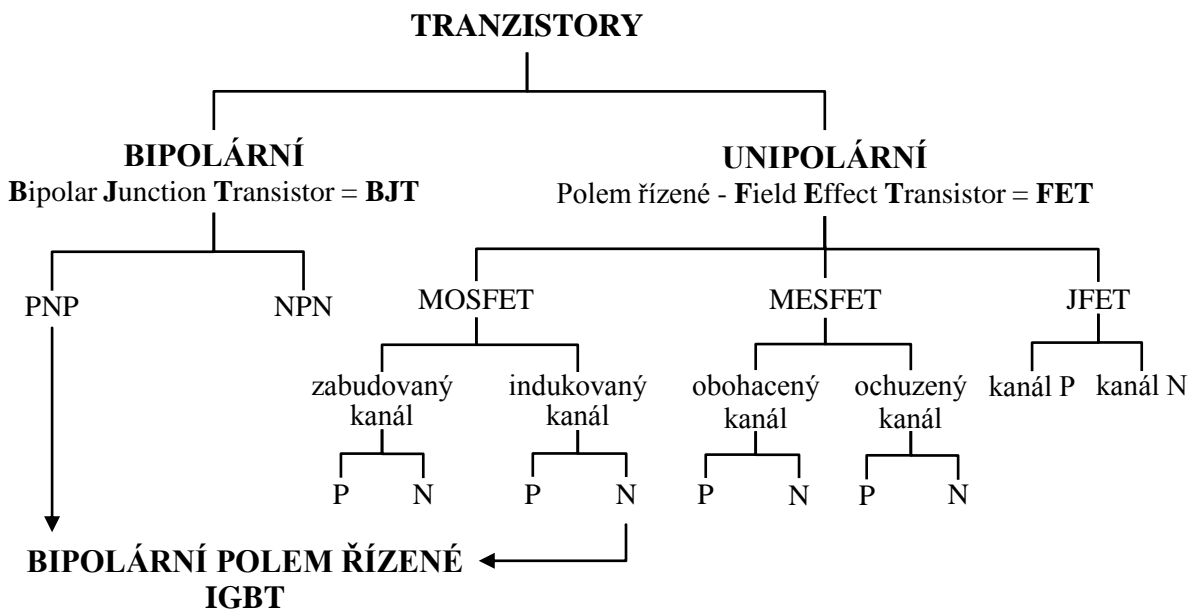
1 Tranzistory

Tranzistory jsou polovodičové součástky nejčastěji se třemi elektrodami. V závislosti na jejich konkrétním zapojení umožňují zesilovat proud nebo napětí, či zesilovat obě veličiny současně. Kvůli těmto vlastnostem je tranzistor považován za aktivní součástku na rozdíl například od diody, která nemá zesilovací schopnost, a je proto pasivní součástkou.

Název tranzistoru vyplývá ze spojení **TRANS**fer **reSISTOR**, které mu dali roku 1947 pánové Brattain, Bardeen a Shockley při jeho objevení. Důvodem byla změna jeho odporu mezi dvěma svorkami řízená velikostí proudu v řídicí svorce. Tranzistory se dělí podle konstrukce na bipolární, unipolární a kombinované (např. IGB). Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem (IGBT) je zkonstruován pro velký rozsah spínacích výkonů.

Bipolární tranzistory využívají ke své činnosti oba nosiče náboje elektrony a díry. Unipolární tranzistory jsou založeny na principu řízení pohybu nosičů náboje elektrickým polem, kde se vedení proudu uskutečňuje v tzv. kanále jedním typem nosičů - většinovými elektrony (děrami) pro kanál typu N (P).

Tranzistory dále rozlišujeme např. na spínací, nízkofrekvenční a vysokofrekvenční tranzistory. V každé kategorii nalezneme tranzistory s malým či velkým výkonem. Další rozdělení je podle technologie výroby, kdy desítky tranzistorů jsou integrovány ve společném pouzdře nebo může být tranzistor zapouzdřen samostatně. Rozdělení podle typů konstrukce tranzistorů je uvedeno na *obr. 1.1*.



Obr. 1.1 Rozdělení základních typů tranzistorů podle konstrukce [1]

1.1 Bipolární tranzistor

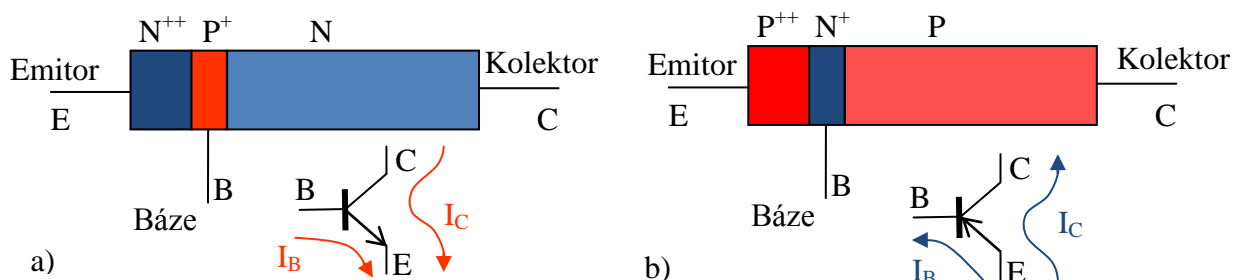
Bipolární tranzistory dnešního provedení byly objeveny v roce 1948, přestože již v roce 1925 byl přihlášen patent na pojem řízený tranzistor s hliníkovou řídicí elektrodou a v roce 1928 byl patentován bipolární tranzistor s kovovou bází. Vzhledem k nedostatečné úrovni technologie, nepřesné teorii a nedocení potenciálu možností tranzistorů v porovnání s elektronkami bylo způsobeno, že zmíněné patenty zůstaly nevyužity. Bipolární tranzistory byly zavedeny do výroby až daleko později. [2]

Prvotní hrotové tranzistory vykazovaly špatné šumové vlastnosti a velkou nestabilitu. Bipolární tranzistory se nejvíce uplatnily ve spotřební elektronice (přenosné přijímače, magnetofony, gramofony), kde bylo zapotřebí malých rozměrů, velká účinnost a nízké napájecí napětí. Zdokonalení technologie výroby, pro dosažení vyšší kvality a tím i širšího uplatnění. Původní slitinová technologie byla nahrazena difúzní epitaxní, později planární a v současné době nastupuje výroba využívající iontové implantace nebo kombinace jednotlivých technologií. Současně jsou tranzistory vyráběny s malým šumem, vysokou mezní frekvencí, malými rozměry jsou tvořeny velkými výkony a současně i s vysokou životností. [2]

1.2 Základní struktura

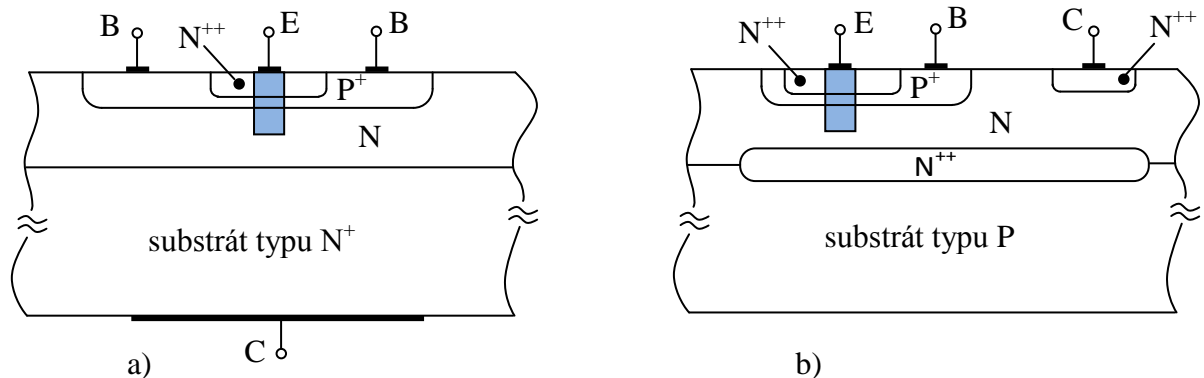
Bipolární tranzistory jsou tvořeny alespoň ze tří různě dotovaných oblastí tvořící dva přechody P-N v těsném uspořádání (*obr. 1.2*). Název „emitor“ je ze skutečnosti, že silně dotovaný emitor N^{++} (P^{++}) „emituje“ elektrony (díry) do úzké báze P^+ (N^+), kterou většina z nich projde a je „sbírána“ kolektorem N (P). Velikostí proudu do báze lze řídit počet prošlých částic z emitoru do kolektoru. Název báze vznikl historicky z prvního tranzistoru, kdy na základní destičku (base) byly shora přitlačeny příklady emitoru a kolektoru umístěné v těsné blízkosti. [1]

Emitor na *obr. 1.2* je znázorněn šipkou ukazující kladný směr proudu emitoru tvořeného proudem báze a kolektoru.



Obr. 1.2 Schematické značky a zjednodušená struktura bipolárního tranzistoru NPN a PNP [1]

Na obr. 1.3 je nakreslena struktura tranzistoru NPN, která odpovídá výrobnímu postupu diskrétního tranzistoru (a) a tranzistoru v integrovaném obvodu (b). [1]



Obr. 1.3 Průřez diskrétním tranzistorem (a) a tranzistorem z integrovaného obvodu (b) [1]

1.3 Činnost bipolárního tranzistoru

Činností bipolárního tranzistoru je řízení injekce minoritních nosičů emitorem do oblasti báze a následná extrakce nosičů kolektorem. Rekombinace minoritních nosičů v bázi musí být co nejmenší, proto vzdálenost obou depletičních vrstev je mnohem menší, než difúzní délka minoritních nosičů. Další podmínka je vytvoření silně nesymetrického emitorového přechodu ($N_{aE} \gg N_{dB}$). Aby bipolární tranzistor měl co nejlepší zesilovací účinek, je nutné, aby plocha kolektorového přechodu byla větší než plocha emitorového přechodu. [3]

Bipolární tranzistor je složen ze dvou P-N přechodů (báze-emitor B-E a báze-kolektor B-C), ty je možné polarizovat čtyřmi různými způsoby. Z toho vyplývá, že existují čtyři možné režimy činnosti shrnuté pro tranzistor NPN v tab. 1.1. Veličina U_T představuje prahové napětí příslušného P-N přechodu. [1]

Tab. 1.1 Režimy tranzistoru podle polarizace přechodů P-N tranzistoru NPN [1]

| Polarizace přechodu B-E | Polarizace přechodu B-C | Režim | |
|-------------------------|-------------------------|-------|------------------|
| $U_{BE} < U_T$ | $U_{BC} \leq 0$ | I. | Nevodivý |
| $U_{BE} \geq U_T$ | $U_{BC} < 0$ | II a. | Normální aktivní |
| $U_{BE} < 0$ | $U_{BC} \geq U_T$ | II b. | Inverzní aktivní |
| $U_{BE} > 0$ | $U_{BC} > 0$ | III. | Saturace |

Popis režimů bipolárního tranzistoru:

Režim I. - představuje rozpojený tranzistor. V tomto režimu kolektorem tranzistoru neprochází žádný proud a používá se při zapojení tranzistoru jako spínače.

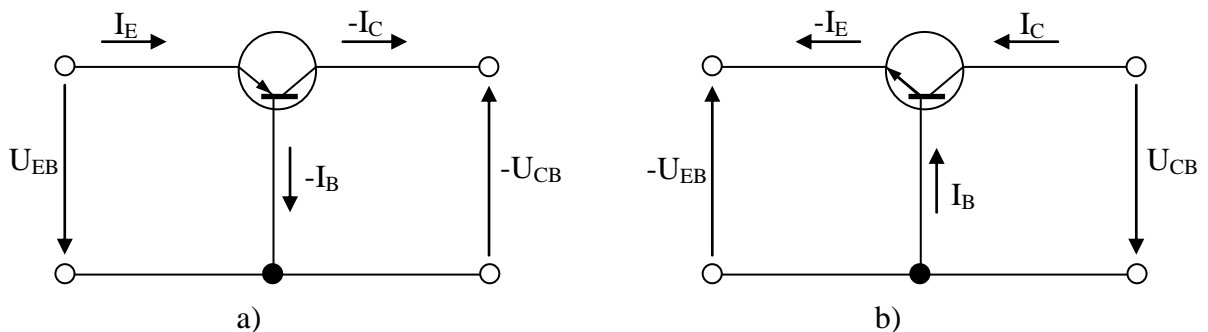
Režim II. - tranzistor zde pracuje jako zesilovač signálu, buď ve směru od emitoru ke kolektoru (normální aktivní – II a), nebo od kolektoru k emitoru (inverzní aktivní - II b). Vyměněním těchto dvou režimů získáme režimy u tranzistoru PNP.

Režim III. – představuje sepnutý tranzistor. Oba přechody jsou polarizovány v propustném směru - nasycený (saturační) režim. Tranzistorem teče velký proud, který je konstantní a je dán velikostí napětí napájecího zdroje a odporu v kolektorovém obvodu. Tento režim se opět používá v případě zapojení tranzistoru jako spínače. [4]

1.4 Základní zapojení bipolárního tranzistoru

Pro bipolární tranzistory existují tři základní zapojení, které vychází ze skutečnosti zapojení dvojbranů. Libovolné dva vývody ze tří mohou sloužit jako vstup nebo výstup, poslední vývod musí být společný pro všechna zapojení. Každé zapojení je charakterizováno odlišnými vlastnostmi a je tedy vhodné pro různá použití v elektrotechnice.

1.4.1 Zapojení se společnou bází (SB)



Obr. 1.4 Zapojení tranzistoru se společnou bází [3]

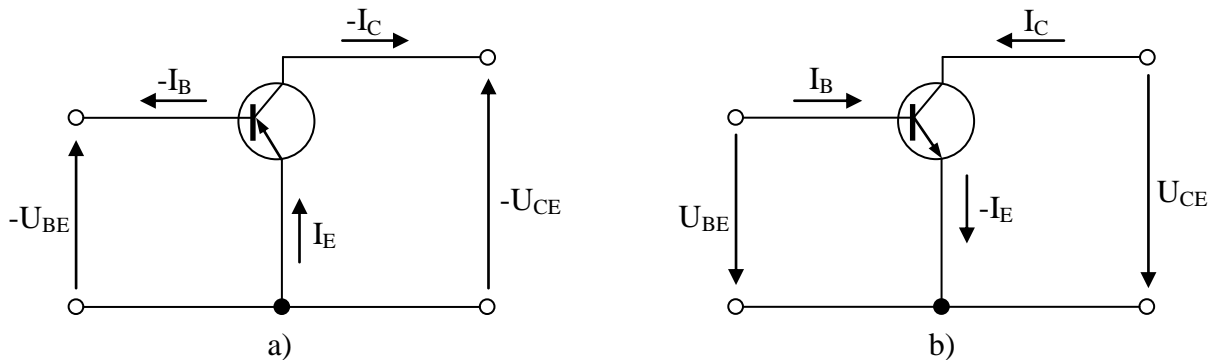
a) PNP tranzistor

b) NPN tranzistor

Společná svorka pro vstupní a výstupní svorky dvojbranu je zde báze. Zapojení a orientace napětí a proudu je znázorněno na obr. 1.4. Výstupní proud I_C je určen rovnicí 1.1, kde α_N je proudový zesilovací činitel v zapojení se společnou bází.

$$I_C = I_{CB0} + I_{pC} = I_{CB0} + \alpha_N I_E \quad (1.1)$$

1.4.2 Zapojení se společným emitorem (SE)



Obr. 1.5 Zapojení tranzistoru se společným emitorem [3]

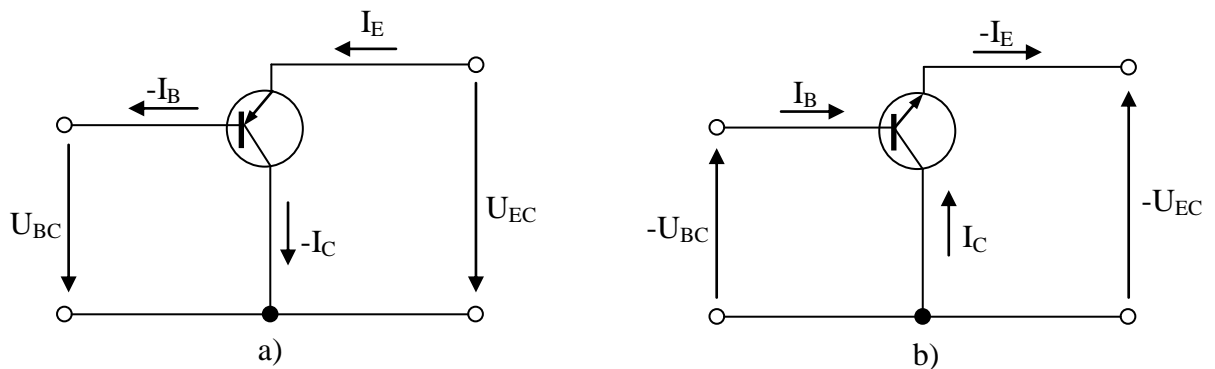
a) PNP tranzistor b) NPN tranzistor

Nejrozšířenější zapojení tranzistoru je se společným emitorem (obr. 1.5).

Vztah pro výstupní proud I_C lze vyjádřit vztahem 1.2. Kde β_N odpovídá zbytkovému proudu kolektoru v zapojení SE a β_N je proudový zesilovací činitel v zapojení SE ($\beta_N \gg 1$) v normálním aktivním režimu.

$$I_C = I_{CE0} + \beta_N I_B \quad (1.2)$$

1.4.3 Zapojení se společným kolektorem (SC)



Obr. 1.6 Zapojení tranzistoru se společným kolektorem [3]

a) PNP tranzistor b) NPN tranzistor

Společná svorka pro vstupní a výstupní svorku dvojbranu je kolektor, jeho zapojení a orientace proudu a napětí je na obr. 1.6. Výstupní proud I_E je určen rovnicí 1.3.

$$I_E = I_{CE0} + (\beta_N + 1) I_B \quad (1.3)$$

Další charakteristické údaje jednotlivých zapojení jsou shrnuty v následující tab. 1.2.

Tab. 1.2 Charakteristické údaje základních zapojení bipolárního tranzistoru [3]

| | | Zapojení | | |
|--------------|---------------|---------------|----------------------|--------------|
| | | SB | SE | SC |
| Zesílení | Proudové | 0,95 ÷ 0,998 | 10 ÷ 500 | 10 ÷ 500 |
| | Napěťové | 10 ÷ 100 | 10 ÷ 100 | 0,9 ÷ 0,99 |
| | Výkonové | 10 ÷ 100 | 10 ÷ 10 ⁴ | 10 ÷ 100 |
| Impedance | Vstupní | 10 Ω ÷ 100 Ω | 100 Ω ÷ 1 kΩ | 10 kΩ ÷ 1 MΩ |
| | Výstupní | 0,1 MΩ ÷ 1 MΩ | 10 kΩ ÷ 100 kΩ | 100 Ω ÷ 1 kΩ |
| Fázový posun | Mezi napětími | 0° | 180° | 0° |
| | Mezi proudy | 0° | 0° | 180° |

Z tabulky je zřejmé, že nejvíce univerzální je zapojení SE, které je hlavně používáno jako zesilovač a tranzistor v zapojení v SB a SC se bude nejčastěji používat jako měnič impedance. [5]

1.5 Statické charakteristiky bipolárního tranzistoru

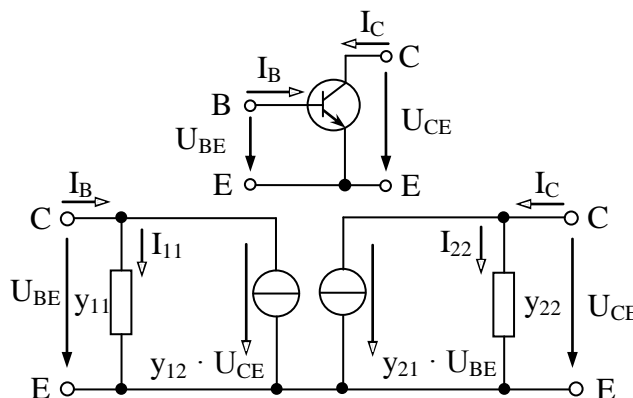
Obecná analýza bipolárního tranzistoru je složitá, proto je často linearizována v pracovním bodě P admitančním nebo hybridním způsobem. [6]

Použitím admitančních parametrů je vstup a výstup tranzistoru modelován pomocí Nortonovy poučky. Model tranzistoru v zapojení SE je znázorněn na obr. 1.7. Pro admitanční parametry y_{ij} s významem vodivosti (obecně komplexní) se zavádějí vztahy:

$$I_1 = y_{11}U_1 + y_{12}U_2 \quad (1.4)$$

$$I_2 = y_{21}U_1 + y_{22}U_2 \quad (1.5)$$

a jsou funkcí polohy pracovního bodu P a dalších parametrů (např. frekvence).



Obr. 1.7 Model tranzistoru pomocí admitančních parametrů [7]

Při použití hybridních parametrů je vstup tranzistoru modelován zapojením pomocí Théveninovy poučky a výstup pomocí Nortonovy poučky (obr. 1.8). Hybridní (smíšené) parametry h_{ij} mají různé fyzikální jednotky a zavádějí se vztahy:

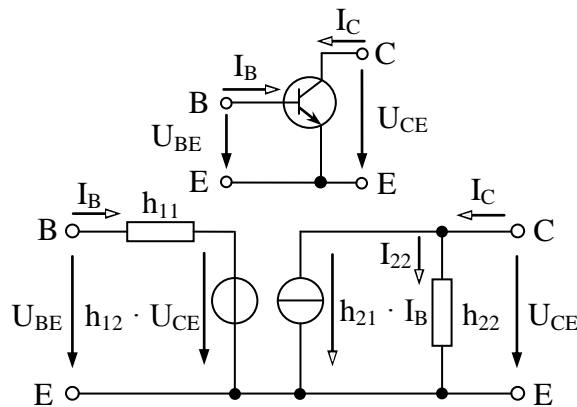
$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \quad (1.6)$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \quad (1.7)$$

Protože hybridní parametry jsou závislé na způsobu zapojení, doplňují se indexem označující společnou elektrodu. Například proudový zesilovací činitel:

$$h_{21} = \left(\frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \right)_{U_2 = \text{konst.}} \quad [-] \quad (1.8)$$

splňuje podmínku $h_{21b} < 1$ pro zapojení SB a $h_{21e} > 1$ pro zapojení SE. [6]



Obr. 1.8 Model tranzistoru v zapojení SE pomocí hybridních parametrů [7]

Z h-parametrů můžeme určit:

1. vstupní odpor tranzistoru při výstupu nakrátko

$$h_{11} = \frac{U_1}{I_1} | U_2 = 0 \quad [\Omega] \quad (1.9)$$

2. zpětný napěťový přenos při vstupu naprázdno

$$h_{12} = \frac{U_1}{U_2} | I_1 = 0 \quad [-] \quad (1.10)$$

3. proudový zesilovací činitel při výstupu nakrátko

$$h_{21} = \frac{I_2}{I_1} | U_2 = 0 \quad [-] \quad (1.11)$$

4. výstupní vodivost tranzistoru při vstupu naprázdno

$$h_{22} = \frac{I_2}{U_2} | I_1 = 0 \quad [S] \quad (1.12)$$

Chování tranzistorů ve větším rozsahu napětí a proudu lépe popisují statické charakteristiky tranzistorů, které graficky znázorňují závislost dvou veličin, kde třetí veličina se uvažuje jako parametr. V praxi se nejčastěji používají čtyři charakteristiky rozdělené do kvadrantů v jednom grafu (obr. 1.9). [6]

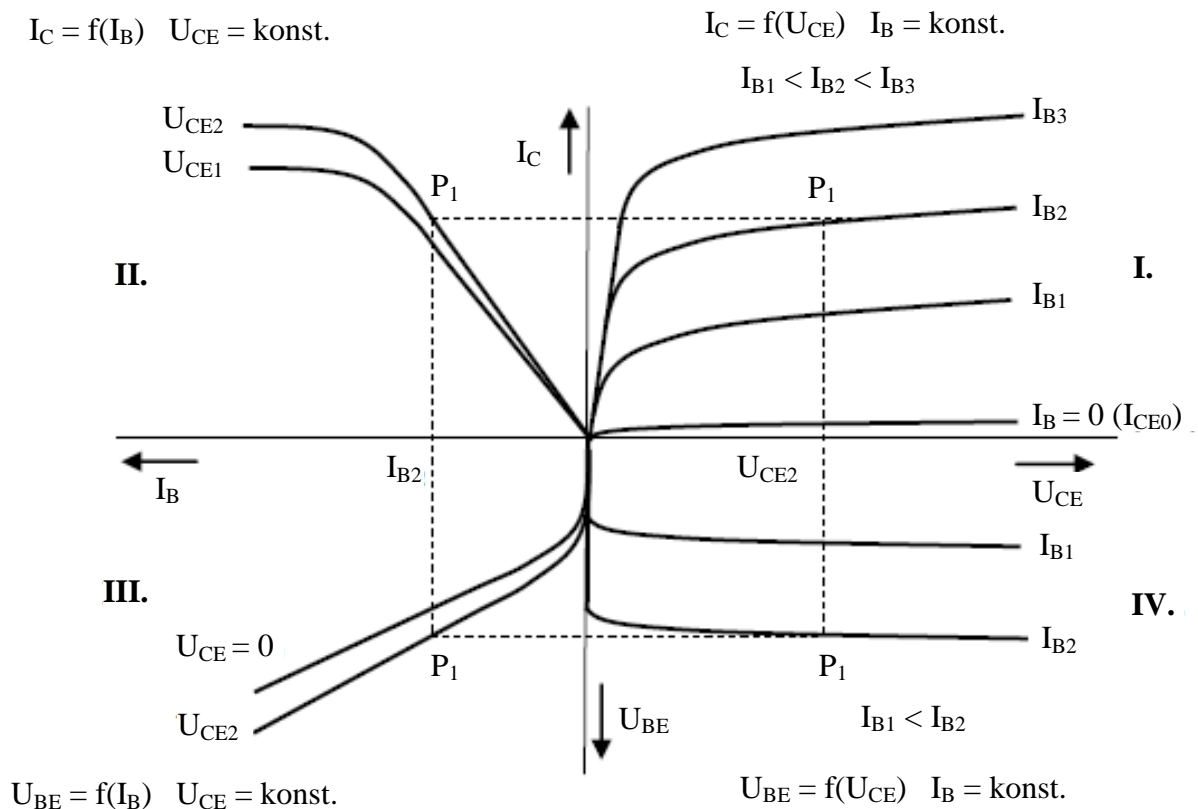
Jednotlivé kvadranty statických charakteristik:

I. *Výstupní charakteristika*: $I_C = f(U_{CE})$, $I_B = \text{konst.}$

II. *Proudová převodní charakteristika*: $I_C = f(I_B)$, $U_{CE} = \text{konst.}$

III. *Vstupní charakteristika*: $I_B = f(U_{BE})$, $U_{CE} = \text{konst.}$

IV. *Zpětná napěťová převodní charakteristika*: $U_{BE} = f(U_{CE})$, $I_B = \text{konst.}$



Obr. 1.9 Charakteristiky bipolárního tranzistoru v zapojení se společným emitorem [3]

2 LabVIEW

Programovací a vývojové prostředí LabVIEW z angl. *Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*) čili „laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů“, někdy též LV, je produktem americké firmy National Instruments (NI). Tato společnost se stala průkopníkem a největším výrobcem v oblasti virtuální instrumentace, která zažívá velký rozvoj v oblasti vývoje, výzkumu, školství a průmyslu. [8]

Aplikace v prostředí LabVIEW jsou tvořeny skládáním a propojováním grafických objektů, jedná se tedy o G-jazyk („grafický“ jazyk). Prostředí LabVIEW je vhodné nejen k programování systémů pro měření a analýzu signálů, řízení a vizualizaci technologických procesů, ale také k programování složitých systémů. [8]

Hlavním cílem virtuální instrumentace je nahradit finančně, prostorově a technicky náročný hardware za využití softwarových, zejména pak grafických a vizualizačních prostředků. Výsledná aplikace zprostředkovává uživateli maximální názornost, rychlé navržení s možností provádění konfiguračních změn, které by byly za použití hardwarových prostředků nákladné nebo přímo nemožné. Aplikace lze provozovat na různých operačních systémech jako je Linux, MS Windows a Mac. [8][9]

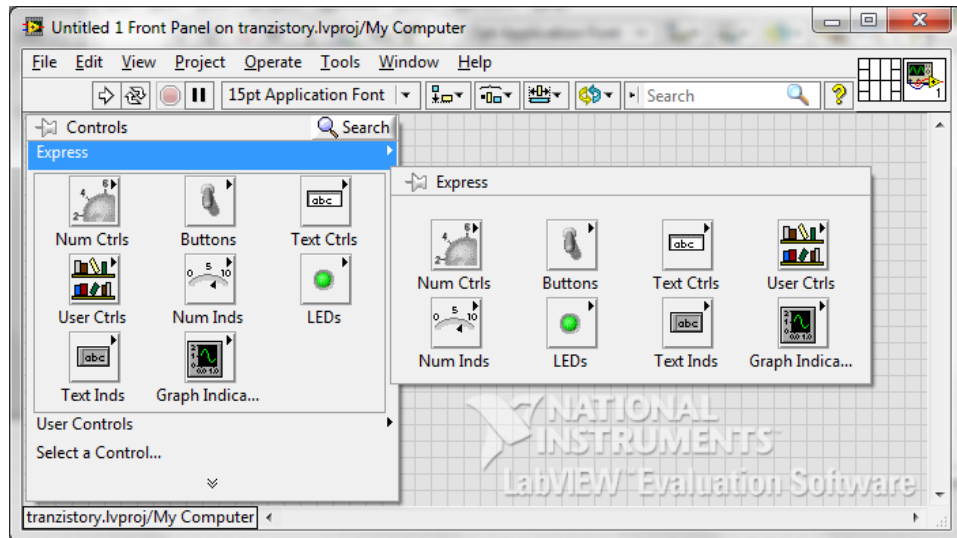
Program ve vývojovém prostředí LabVIEW se skládá z čelního panelu (Front Panel) a z blokového diagramu (Block Diagram). Jednotlivé části jsou popsány v následujících kapitolách 2.1 a 2.2.

2.1 Čelní panel (Front Panel)

Čelní panel tvoří uživatelské rozhraní aplikace LabVIEW a určuje její vzhled a chování. Nacházejí se zde ovládací a indikační prvky, které řídí a zobrazují celý běh aplikace. Uživatel jednoduchým ovládním nastavuje parametry a získává informace o zpracovaných výsledcích. [8]

V okně čelního panelu tedy programátor vytváří vizualizační vrstvu aplikace, tak jak ji uvidí koncový uživatel. Po kliknutí pravého tlačítka myši na pracovní ploše čelního panelu se zobrazí paleta **Controls**, kde nalezneme prvky pro vstupní a výstupní proměnné programu a další prvky pro zpracování nebo zobrazování.

Prvkům můžeme nadefinovat název, určit přesnou polohu, chování a jejich vzhled. Na *obr. 2.1* je otevřený čelní panel nového VI s otevřenou paletou **Controls**. V horní části čelního panelu je zobrazena nástrojová lišta, která umožňuje spuštění programu (šipka), zastavení programu (červené kolečko stop) a pozastavení programu (pause). [10]

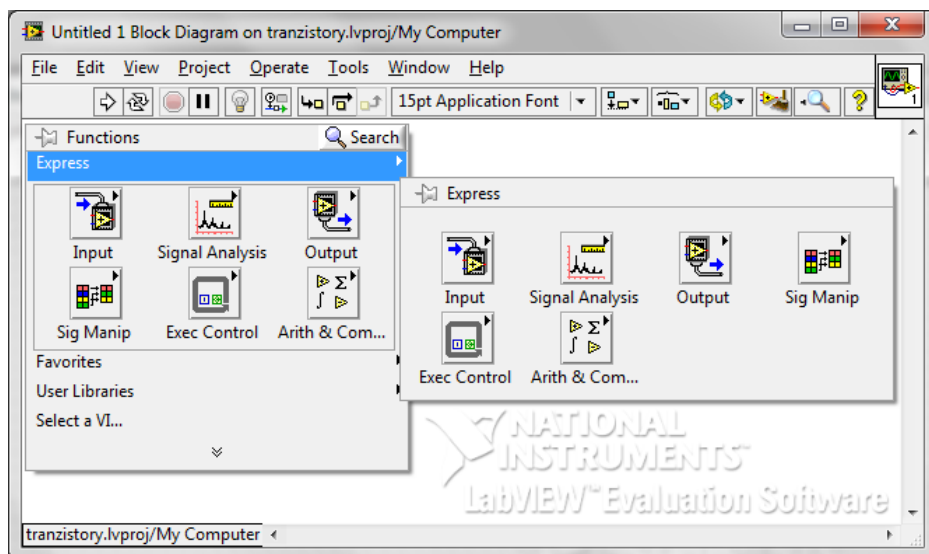
Obr. 2.1 Čelní panel s otevřenou knihovnou **Controls**

Vhodnou volbou ovládacích, zobrazovacích a dalších prvků na čelním panelu lze vytvořit uživatelsky příjemnou a přehlednou aplikaci. V režimu běhu programu (po spuštění VI) je možné aplikaci ovládat, nastavovat hodnoty a sledovat výstupy VI. [8]

2.2 Blokový diagram (Block Diagram)

Mezi obrazovkami čelního panelu (Front panel) a blokovým diagramem (Block diagram) lze přecházet klávesovou zkratkou <Ctrl+E> nebo v záložce „Window“.

Na obrazovce blokového diagramu uživatel definuje vlastní algoritmus programu, tedy propojení prvků z čelního panelu a jejich parametry. Na obrázku *obr. 2.2* je zobrazen blokový diagram nového VI s otevřenou paletou **Functions** s prvky pro vstup, výstup či další zpracování nebo zobrazení průběhu. [8]

Obr. 2.2 Blokový diagram s otevřenou knihovnou **Functions**

Blokový diagram zahrnuje terminály, subVI, funkce, konstanty, struktury a spojení, které přenáší data mezi jednotlivými objekty blokového diagramu. Objekty čelního panelu jsou automaticky zobrazeny jako terminály v blokovém diagramu. Terminály jsou obdobou parametrů a konstant v textových programovacích jazycích. [10]

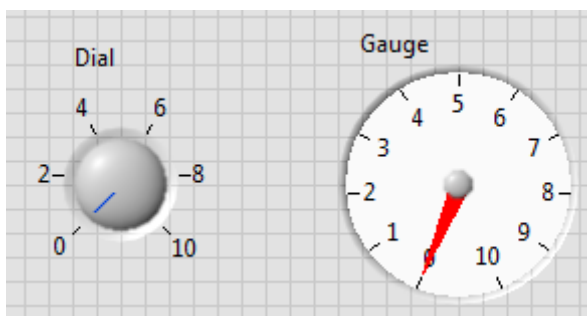
Každý prvek blokového diagramu má podle své funkce nadefinovány vstupní či výstupní připojovací body (piny). Tyto body lze propojit datovým spojením s dalšími prvky pomocí propojovacího nástroje (*Wiring Tool*). Nezapojený bod má barvu bílou, již zapojený bod je označen šedě, černě je označen bod korespondující s vybraným prvkem (orámovaný čárkovanou černou čarou). [8]

Každý terminál musí být propojen s definovaným datovým typem, která jsou popsány v následující kapitole 2.4. V jiném případě musíme použít funkce pro konverzi datového typu, které najdeme v paletě **Functions** v nabídce **Programming** pod názvem datového typu.

Blokový diagram se vytváří z prvků knihovny **Functions**, které jsou propojeny s prvky čelního panelu, s konstantami nebo s globální či lokální proměnnou v módu čtení či zápis. [8]

2.3 Kontroly a indikátory (Controls and indicators)

Kontroly (Controls) slouží v LabVIEW jako ovládací prvky programu a nastavují hodnotu proměnné s přednastaveným datovým typem. Kontroly mohou být např. tlačítka, textové nebo numerické pole a další. Indikátor slouží k zobrazování hodnoty (stavu) proměnné a mohou být v podobě ledkové kontrolky, měřicího přístroje nebo např. grafu. Na *obr. 2.3* je znázorněn čelní panel s numerickým kontrolou a numerickým indikátorem. Blokový diagram tohoto čelního panelu je zobrazen na *obr. 2.4*.



Obr. 2.3 Čelní panel kontrolu a indikátoru



Obr. 2.4 Blokový diagram kontrolu a indikátoru

2.4 Datové typy (Data types)

Objekty s datovým typem vyjadřují jaké objekty, vstupy, výstupy můžeme spolu spojit. K tomu nám napomáhá barevné označení orámování objektů a barevné propojovací čáry. V tabulce *tab. 2.1* jsou znázorněny jednotlivé datové typy s přiřazenými barvami.

Objekty různých, vzájemně neslučitelných, datových typů nelze vzájemně propojovat. Například tlačítko je v blokovém diagramu označeno zeleným rámečkem, což odpovídá (dle *tab. 2.1*) binárnímu datovému typu (*Boolean*). Může být tedy spojeno spojem zelené barvy s dalším vstupem prvku s rámečkem zelené barvy. Otočný prvek s možností plynulého nastavování hodnot je označen oranžovým rámečkem, což značí číselný datový typ s pohyblivou čárkou (*Floating point*) a může být propojen spojem oranžové barvy se vstupem prvku označeným rámečkem oranžové barvy. [8]










Tab. 2.1 Základní datové typy v LabVIEW [8]

| Datový typ spoje | Barva čáry |
|---|------------|
| celočíslný (<i>Integer</i>) | Modrá |
| číselný s pohyblivou čárkou (<i>Floating point</i>) | Oranžová |
| binární (<i>Boolean</i>) | Zelená |
| znakový řetězec (<i>String</i>) | Fialová |

Číselné datové typy (*Numeric*) se dělí na typy, které uchovávají pouze celočíselné hodnoty (*Integer*) a na typy pro reálná čísla (*fixed-point*, *floating-point*). Pro snížení doby výpočtu a nadměrné alokace paměti, je vhodné předem nastavit konkrétní typ a formát (tzv. reprezentaci). Formát a přesnost čísel se nastavuje v rozbalovacím menu terminálu v položce **Representation** po kliknutí pravým tlačítkem. Každý terminál lze nastavit pouze na určité typy formátů čísel. [8]

Datové typy se dále rozlišují podle rozměru a v blokovém diagramu tomu i odpovídá tloušťka čáry. Nejslabší spoj představuje jednu hodnotu (*Scalar*), silnější jednorozměrné pole (*1D Array*) a nejsilnější (dvojitý) spoj dvou a vícerozměrné pole (*2D Array*). Ukázka jednotlivých spojů v závislosti na rozměru přenášené hodnoty je v *tab. 2.2*.

Tab. 2.2 Zobrazení datových typů v blokovém diagramu [9]

| | Reálná čísla | Celočíselné hodnoty | Řetězec |
|-----------------|---|---|---|
| Scalar |  |  |  |
| 1D Array |  |  |  |
| 2D Array |  |  |  |

2.5 Multifunkční karta NI USB-6008/6009

Multifunkční karta, která je zobrazena na *obr. 2.5* je profesionální zařízení DAQ firmy National Instruments pro využití v prostředí LabVIEW.

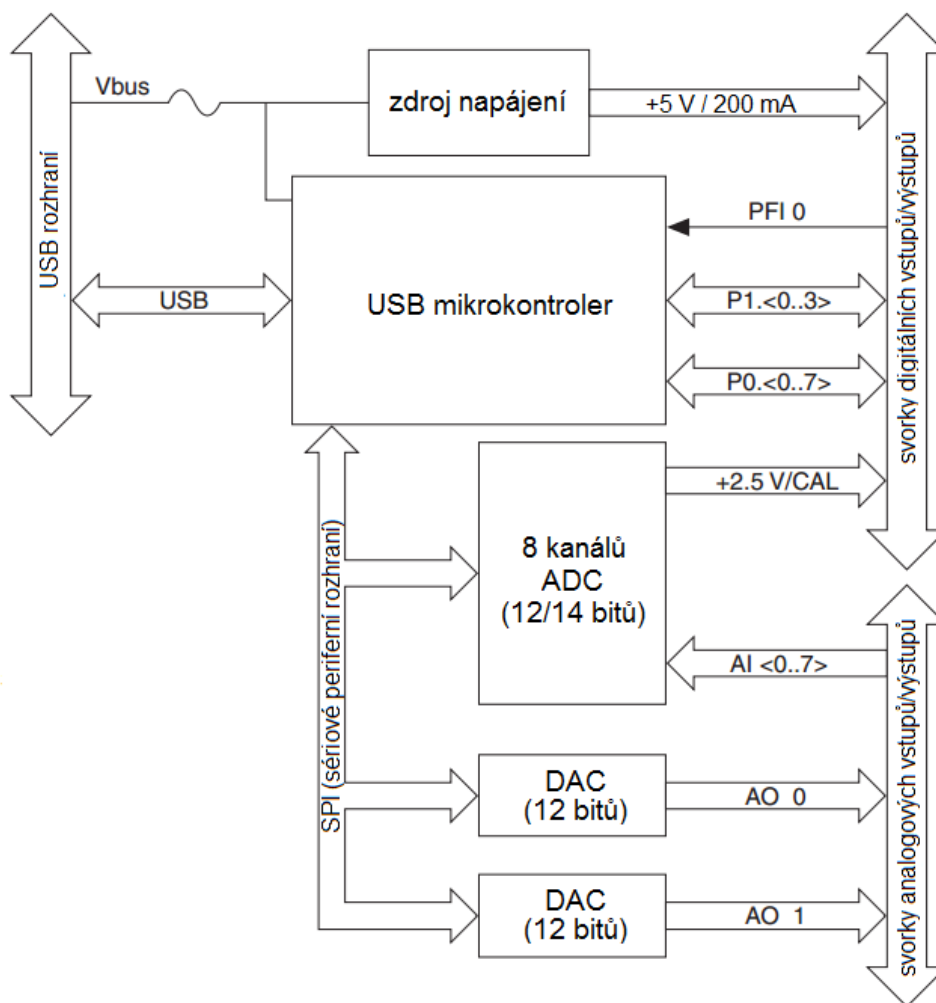
System pro sběr dat (DAQ) se používá k přenosu upraveného elektrického signálu do počítače za účelem softwarové analýzy a zaznamenávání dat. Zařízení pro sběr používá PCI, PCI Express nebo PXI sběrnici, dále pak USB nebo IEEE 1394 porty počítače. U karty NI USB-6008/6009 jsou předávány naměřené údaje pomocí USB rozhraní. [10]



Obr. 2.5 Multifunkční karta NI USB-6008

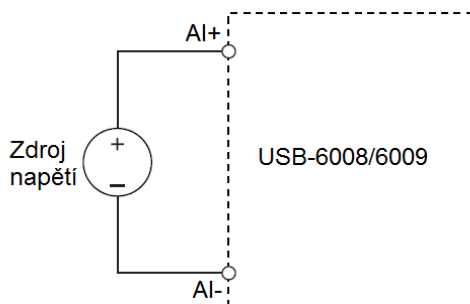
Blokové schéma multifunkční karty NI USB-6008/6009 je znázorněno na *obr. 2.6*. Karta umožňuje připojení až osmi analogových vstupů (AI 0 až AI 7), dva analogové výstupy (AO), 12 digitálních vstupních/výstupních kanálů (P0.0 až P1.3) a jedním 32bitovým čítačem s plnou rychlostí USB. [11]

S kartou NI USB-6008/6009 je dodáván kabel USB (typu A-B) o délce 1 m, dvě zásuvné svorkovnice se sadou štítků, návod v anglickém jazyce a dvě CD s programovým vybavením NI-DAQmx. Základní vlastnosti a porovnání vlastností karet NI USB-6008 a NI USB-6009 je uvedeno v *tab. 1.3*, kde jednotka S/s, resp. kS/s, udává počet zpracovaných vstupních vzorků hodnot (sample) za sekundu (např. 10 kS/s znamená 10 000 vzorků zpracovaných za sekundu). Maximální vzorkovací rychlost může záviset na rychlosti připojeného počítače. [12]

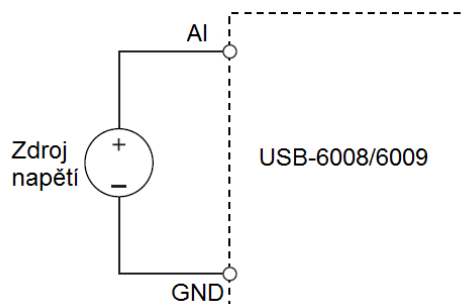


Obr. 2.6 Blokové schéma NI USB-6008/6009 [12]

Analogový signál lze přivést na vstup AI buďto v diferenciálním zapojení (kladný pól na vstup AI+ a záporný na vstup AI–), nebo v nesymetrickém zapojení (kladný pól na vstup AI a záporný na zemnicí svorku GND), jak je znázorněno na *obr. 2.7* a *obr. 2.8*. U diferenciálního zapojení lze na vstupy AI přivést napětí v rozsahu maximálně ± 20 V a v nesymetrickém zapojení maximálně ± 10 V. Větší úroveň napětí je omezena. [12]



Obr. 2.7 Diferenciální zapojení signálu na AI [11]

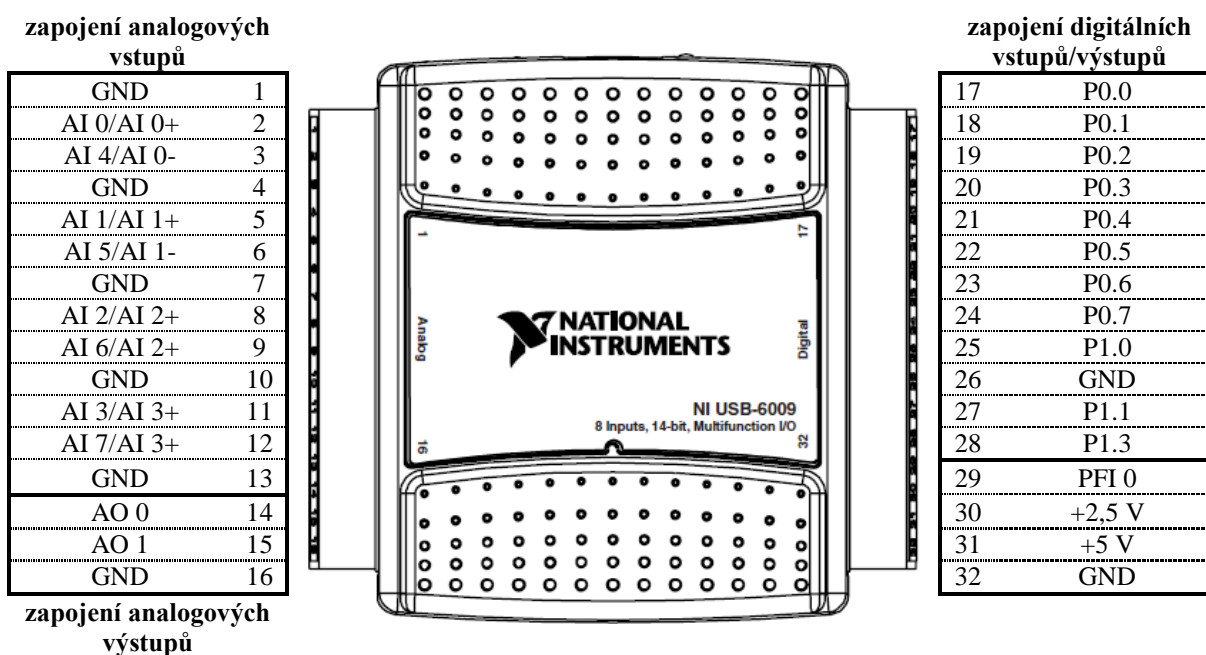


Obr. 2.8 Nesymetrické připojení signálu na AI [11]

Tab. 2.3 Parametry multifunkční karty NI USB-6008/6009 [11]

| Vlastnost | NI USB-6008 | NI USB-6009 |
|--|--|---|
| Analogové vstupy: | | |
| Počet | 8 nesymetrických nebo 4 diferenciální, programově nastavitelné | |
| Vstupní napětí pro zapojení | nesymetrické: ± 10 V diferenciální: ± 20 V, ± 10 V, ± 5 V, ± 4 V, $\pm 2,5$ V, ± 2 V, $\pm 1,25$ V, ± 1 V | |
| Rozlišení AI | 12 bitů (diferenciální vstupy) 11 bitů (nesymetrické vstupy) | 14 bitů (diferenciální vstupy) 13 bitů (nesymetrické vstupy) |
| Max. vzorkovací rychlost AI pro jeden kanál | 10 kS/s | 48 kS/s |
| Max. vzorkovací rychlost AI pro několik kanálů | 10 kB/s | 42 kB/s |
| Analogové výstupy: | | |
| Počet | 2 se společnou zemí | |
| Výstupní rozlišení | 12 bitů | |
| Maximální změna | 150 Hz, programově časováno | |
| Výstupní napětí | 0 – 5 V | |
| Výstupní impedance | 50 Ω | |
| Zkratový proud | 50 mA | |
| Digitální vstupy/výstupy: | | |
| Počet | 12 programově nastavitelných | |
| Technologie digitálních vstupů/výstupů | otevřený kolektor (interní rezistor 4,7 k Ω) | otevřený kolektor nebo active drive |
| Rozhraní USB: | | |
| Verze | USB 2.0 (12 Mb/s) | |
| Odebíraný proud | 80 mA, maximálně 500 mA | |
| Rozměry: | | |
| Bez konektorů | 6,35 cm \times 8,51 cm \times 2,31 cm | |
| S konektory | 8,18 cm \times 8,51 cm \times 2,31 cm | |

Na obr. 2.9 je znázorněno rozmístění signálů na měřicí kartě NI USB-6009. Zapojení analogových vstupů lze kombinovat pro diferenciální nebo nesymetrické zapojení.



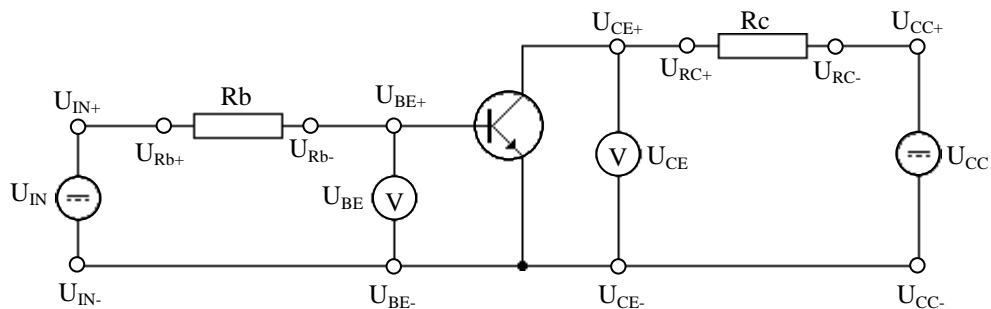
Obr. 2.9 Rozmístění signálů na konektorech multifunkční karty NI USB-6008/6009 [11]

3 Měřicí přípravek

Měřicí přípravek byl koncipován jako laboratorní pomůcka pro automatizované měření tranzistorů, ale jeho využití je univerzální a nemusí být použito pouze pro měření s měřicí kartou NI USB-6008/6009. Měřicí přípravek je znázorněn v příloze na *obr. A.1*.

3.1 Schéma měřicího přípravku

Na *obr. 3.1* je schéma pro měření charakteristik NPN tranzistoru se společným emitorem. Z měřicí karty byly využity dva analogové výstupy, které mají společnou zem (nesymetrické zapojení). Za použití pouze měřicí karty, bez použití např. externího zdroje lze měřit pouze tranzistory NPN se společným emitorem nebo tranzistory PNP se společným kolektorem. V rámci práce jsem se zaměřil na měření se společným emitorem, kde je největší výkonové zesílení a toto zapojení je také nepoužívanější.



Obr 3.1 Schéma měření tranzistoru se společným emitorem

Měřicí karta neumožňuje měření proudu, ale pouze napětí. Proud I_b a I_c jsou vypočteny pomocí Ohmova zákona z naměřeného napětí přímo na rezistorech R_b a R_c .

3.2 Realizace

Pro měřicí přípravek byla zakoupena plastová krabička U-KP22 o rozměrech 138 x 190 x 45 mm (šířka x hloubka x výška). V programu ProgeCAD 2010 Professional byl vytvořen návrh štítků a rozmístění zdírek čelního panelu měřicího přípravku. Návrh o rozměrech 163 x 116 mm (velikost odpovídá prohloubení v krabičce) naleznete v poměru 1:1 v příloze na *obr. A.2*.

Zdíčky byly použity přístrojové o průměru 4 mm v červené barvě (pro kladné napětí) a černé barvě (pro záporné napětí). Rezistory R_b a R_c se připojují k měřicímu prvku pomocí externí odporové dekadý. Paralelně k rezistorům je zapotřebí připojit analogové vstupy z měřicí karty pro snímání napětí U_{R_b} a U_{R_c} .

Pro upevnění tranzistoru byla navržena DPS, na které jsou připájeny 4 pružinové svorkovnice WAGO pro upevnění tranzistoru. Pro zajištění kompatibility se všemi tranzistory, je pořadí svorek pro připojení tranzistoru následující: emitor, kolektor, báze a emitor.

3.3 Propojení s kartou NI USB-6008/6009

Měřicí přípravek využívá pouze analogové vstupy a výstupy, které nalezneme na svorkách 1-16 (levá strana měřicí karty viz *obr. 2.9*).

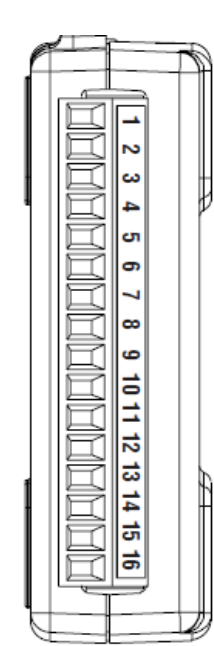
Vstupní napětí U_{in} je připojeno na analogový výstup AO 0 (č. svorky 14) a napájecí napětí U_{cc} na analogový výstup AO 1 (č. svorky 15). Analogové výstupy mají společnou zem GND na svorkách 13 a 16.

Měření je omezeno maximálním výstupním napětí měřicí karty, které je 5 V. Při použití většího napětí než 5 V, je třeba použít např. externí zdroj, který lze ovládat vstupním signálem. Na tento signál se následně připojí analogové výstupy.

Všechny analogové vstupy jsou zapojeny diferenciálně. Napětí U_{be} a U_{ce} mají společnou zem s měřicím modulem, zde by mohlo být použito nesymetrické zapojení, ale znemožnilo by použití s externím zdrojem.

Kompletní propojení měřicího prvku s multifunkční kartou NI USB-6008/6009 je popsáno v tabulce *tab. 3.1*.

Tab. 3.1 Zapojení měřicího přípravku ke kartě NI USB-6008/6009

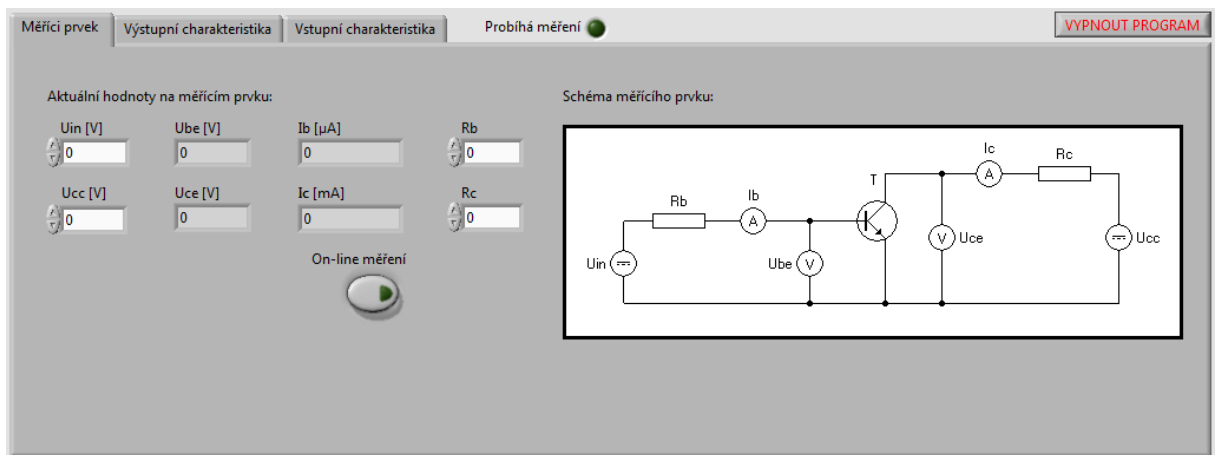
| Modul | Číslo svorky | Signál modulu | Měřicí přípravek |
|---|--------------|---------------|------------------|
|  | 1 | GND | - |
| | 2 | AI 0+ | U_{BE+} |
| | 3 | AI 0- | U_{BE-} |
| | 4 | GND | - |
| | 5 | AI 1+ | U_{CE+} |
| | 6 | AI 1- | U_{CE-} |
| | 7 | GND | - |
| | 8 | AI 2+ | U_{Rb+} |
| | 9 | AI 2- | U_{Rb-} |
| | 10 | GND | - |
| | 11 | AI 3+ | U_{Rc+} |
| | 12 | AI 3- | U_{Rc-} |
| | 13 | GND | U_{IN-} |
| | 14 | AO 0 | U_{IN+} |
| | 15 | AO 1 | U_{CC+} |
| | 16 | GND | U_{CC-} |

4 Softwarové řešení

Program pro automatizované měření tranzistorů byl vytvořen v programu LabVIEW. Tranzistor lze manuálně měřit zadáváním a odečítáním hodnot, ale také automaticky měřit vstupní a výstupní charakteristiky tranzistoru.

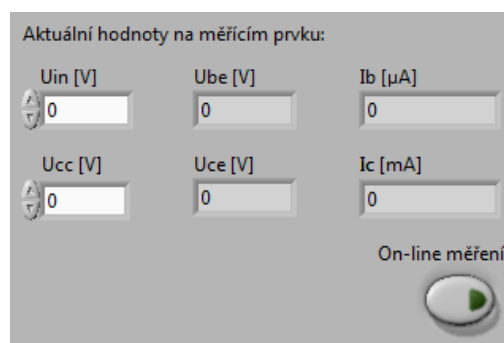
4.1 Čelní panel

Vizualizační část programu na *obr. 4.1* je rozdělena do tří záložek. Každá záložka reprezentuje jinou funkci programu. V horní části programu se nachází indikátor, který signalizuje zapnutí měření. Může se jednat o online měření nebo měření vstupní / výstupní charakteristiky. Program lze kdykoliv ukončit tlačítkem **Vypnout program**.



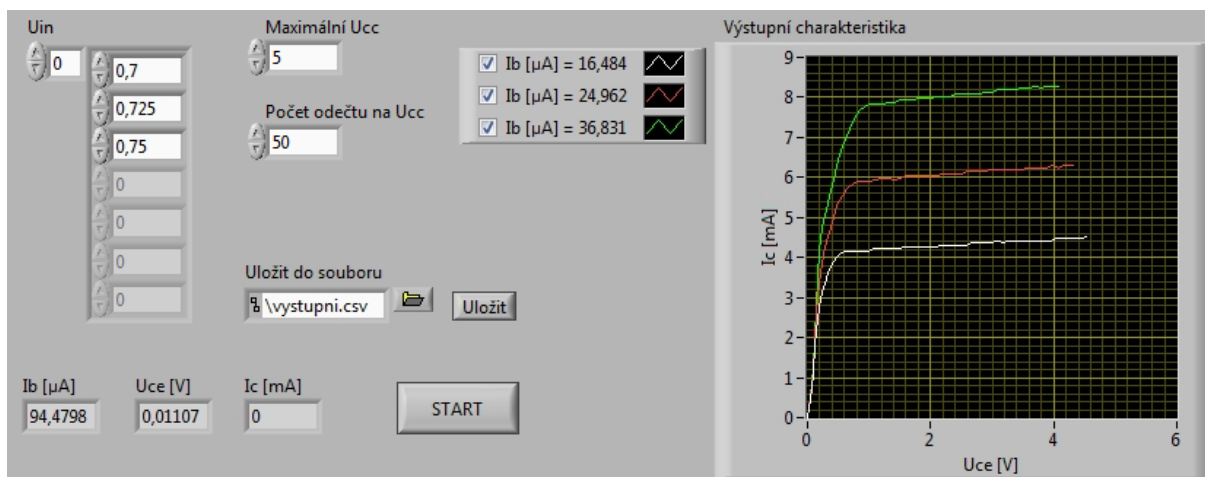
Obr. 4.1 Vzhled programu

První záložka **Měřicí prvek** je znázorněna na *obr. 4.1*. Na této záložce je třeba nastavit velikost rezistorů R_b a R_c v jednotkách ohmch. Tlačítkem **On-line měření** je aktivován cyklus nastavování analogových výstupů z karty NI USB-6008/6009, na straně měřicího prvku se jedná o vstupního napětí U_{in} a napájecího napětí U_{cc} . Následně jsou v každém kroku cyklu odečteny a přepočteny hodnoty z analogových výstupů a zobrazeny na panelu viz *obr. 4.2*.



Obr. 4.2 Aktuální hodnoty na měřicím prvku

Druhá záložka slouží k automatizovanému měření výstupní charakteristiky tranzistoru. Vstupní veličiny je možno regulovat v levé části obrázku *obr. 4.3*. Nejprve je třeba nastavit jednotlivá vstupní napětí U_{in} , které odpovídá požadovanému I_b . Pro zjištění přesného napětí U_{in} , můžeme použít On-line měření na záložce **Měřící prvek**. Maximální napájecí napětí U_{cc} je třeba volit tak, aby nedošlo ke zničení tranzistoru.



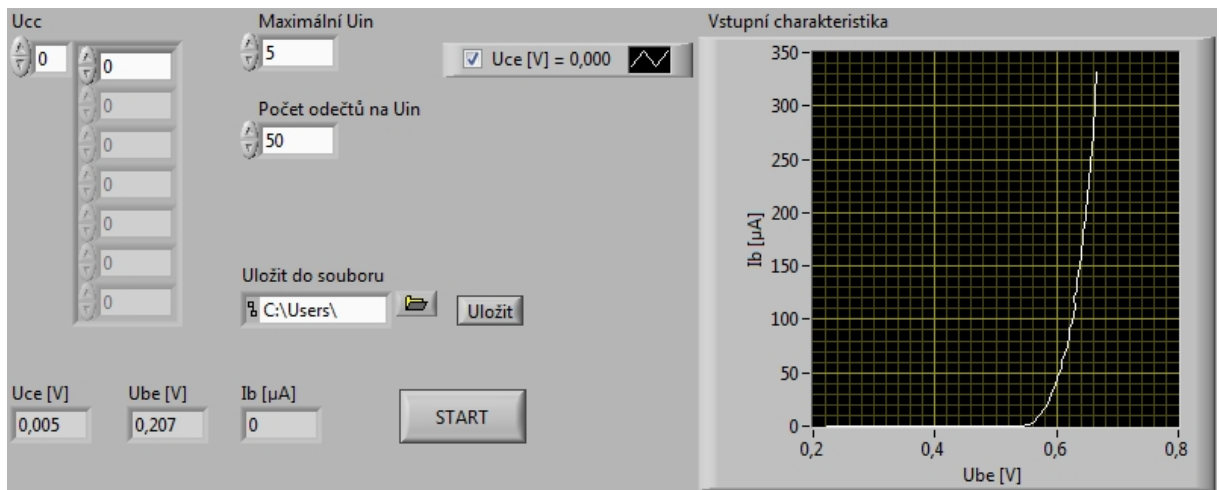
Obr. 4.3 Vzhled programu pro měření výstupní charakteristiky

Automatický cyklus měření se zapne tlačítkem **Start**. Aktuální hodnoty na měřícím prvku jsou zobrazeny nalevo od tlačítka **Start** a také v záložce **Měřící prvek**. Dokud je zapnuto automatické měření, je rozsvícen indikátor **Probíhá měření**. Napětí U_{cc} je iterováno od 0 do nastavené hodnoty s krokem, který je vypočten z maximální hodnoty a počtu odečtů. Po dosažení maximální hodnoty U_{cc} je nastavena další hodnota v seznamu vstupních napětí U_{in} a vykreslen graf pro předchozí měřený proud I_b . V pravé části obrázku *obr. 4.3* jsou znázorněny grafy výstupní charakteristiky tranzistoru z měření pro jednotlivá I_b . Po změření poslední nastavené hodnoty v seznamu U_{in} je ukončeno měření. Naměřená data můžeme uložit do souboru tlačítkem **Uložit**. Datový soubor je ukládán ve formátu CSV. Tabulka *tab. 4.1* zobrazuje část naměřených hodnot z automatizovaného měření výstupních charakteristiky. Měření bylo pro proudy I_b (16 μA , 25 μA a 37 μA). Pro každý proud I_b je v tabulce dvojice hodnot U_{ce} a I_c , tzn., že 2. a 3. sloupec je pro $I_b = 16 \mu\text{A}$.

Tab. 4.1 Ukázka výstupního formátu měření výstupní charakteristiky

| I_b [μA] | U_{ce} [V] | I_c [mA] | U_{ce} [V] | I_c [mA] | U_{ce} [V] | I_c [mA] |
|-------------------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
| 16,484 | 0,011 | 0 | 0,011 | 0 | 0,011 | 0 |
| 24,962 | 0,057 | 0,445 | 0,057 | 0,496 | 0,052 | 0,496 |
| 36,831 | 0,095 | 1,106 | 0,087 | 1,157 | 0,085 | 1,259 |
| | 0,128 | 1,819 | 0,118 | 1,921 | 0,108 | 1,972 |
| | 0,166 | 2,481 | 0,146 | 2,634 | 0,136 | 2,786 |

Na poslední záložce je možné zvolit automatizované měření vstupních charakteristik tranzistorů. Nastavení se provádí podobně jako u měření výstupních charakteristik. Rozdíl je v nastavovaném napájecím napětí je U_{cc} a maximálním vstupním napětí U_{in} . Opět musíme dávat pozor na nastavené maximální napětí U_{in} , aby nedošlo ke zničení tranzistoru. V levé části obrázku *obr. 4.4* je znázorněno nastavení hodnot pro měření a v pravé části graf měření.



Obr. 4.4 Vzhled programu pro měření výstupní charakteristiky

V následující tabulce *tab. 4.2* jsou uvedeny naměřené hodnoty z automatizovaného měření vstupní charakteristiky tranzistoru.

Tab. 4.2 Ukázka výstupního formátu měření vstupní charakteristiky

| Uce [V] | Ube [V] | Ib [µA] |
|---------|---------|---------|
| 0 | 0,219 | 0 |
| | 0,299 | 0 |
| | 0,383 | 0 |
| | 0,465 | 0 |
| | 0,518 | 0 |
| | 0,552 | 0 |
| | 0,565 | 2,579 |
| | 0,578 | 9,395 |
| | 0,585 | 16,407 |
| | 0,59 | 23,419 |
| | 0,597 | 30,481 |
| | 0,604 | 37,885 |
| | 0,608 | 45,388 |

4.2 Nastavení DAQ asistenta

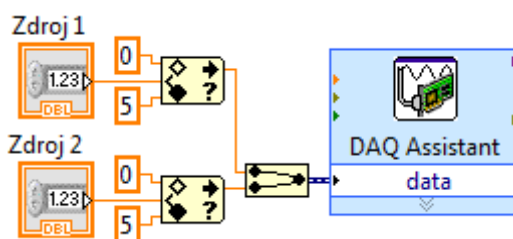
DAQ Assistant usnadňuje komunikaci s DAQ zařízeními. Zajišťuje komunikaci s kartou, testování vstupů, výstupů a zobrazuje svorkovnici s připojením vstupů měřicí karty.

Po kliknutí pravého tlačítka myši v blokovém diagramu se zobrazí paleta **Express**, zde nalezneme v sekci **Input** i **Output** terminál **DAQ Assists**. Po přidání je zobrazeno okno pro výběr **Acquire Signals** (vstupní porty) a **Generate Signals** (výstupní porty). Po zvolení položky vybereme následně typ portu (analogový, digitální nebo čítač).

Pro přehlednost v kódu byly odděleny vstupní a výstupní signály do dvou subVI. SubVI odděluje část programu a stává se použitelný i v jiných programech. Vytvoříme si tak vlastní terminál, kterému nadefinujeme vstupní a výstupní svorky. SubVI je uložen ve vlastním souboru a může být i nezávisle na celém programu spuštěn.

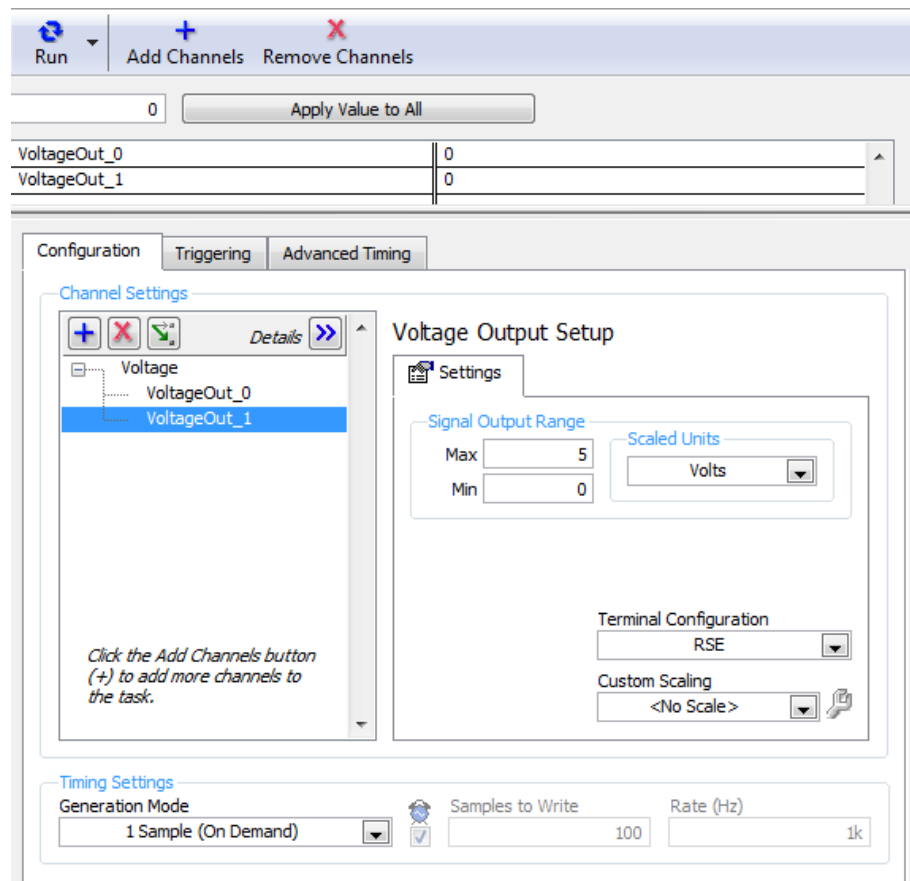
4.2.1 Výstupy karty

Pro komunikaci s výstupním signálem bylo vytvořeno subVI v souboru **zapis.vi**. Blokový diagram je znázorněn na *obr. 4.5*. Program obstarává dva analogové výstupy multifunkční karty NI USB-6008/6009. Nastavení hodnot představují dva numerické kontroly (proměnné **Zdroj 1** a **Zdroj 2**). Výstupní data jsou nejprve porovnány funkcí **In Range and Coerce**, která zaručuje, aby se do DAQ asistenta nedostaly hodnoty menší než 0 nebo větší než 5. Došlo by pak k chybě vyvolanou DAQ asistenta. Signály jsou následně spojeny do jednoho signálu (tzv. **combined signal**) a předány DAQ asistentovi. Podle pořadí spojení signálů je nastaven i DAQ asistent.



Obr. 4.5 Soubor zapis.vi pro práci s analogovými výstupy

Kliknutím na **Add Channels** je zobrazena tabulka pro výběr analogových výstupů připojené měřicí karty NI USB-6008/6009. Po přidání ao0 a ao1 je zobrazeno nastavení DAQ asistenta (*obr. 4.6*). Rozmezí napětí je nastaveno od 0 do 5 V a typ časování na **1 Sample (On Diamond)**, protože potřebujeme nastavovat pevnou hodnotu výstupního napětí a negenerovat signál v závislosti na čase.



Obr. 4.6 Nastavení DAQ asistenta pro analogové výstupy

V DAQ asistentovi můžeme vyzkoušet analogové výstupy a to stisknutím tlačítka **Run**. Na analogových výstupech karty se následně objeví napětí nastavené v políčkách **VoltageOut_0** a **VoltageOut_1**.

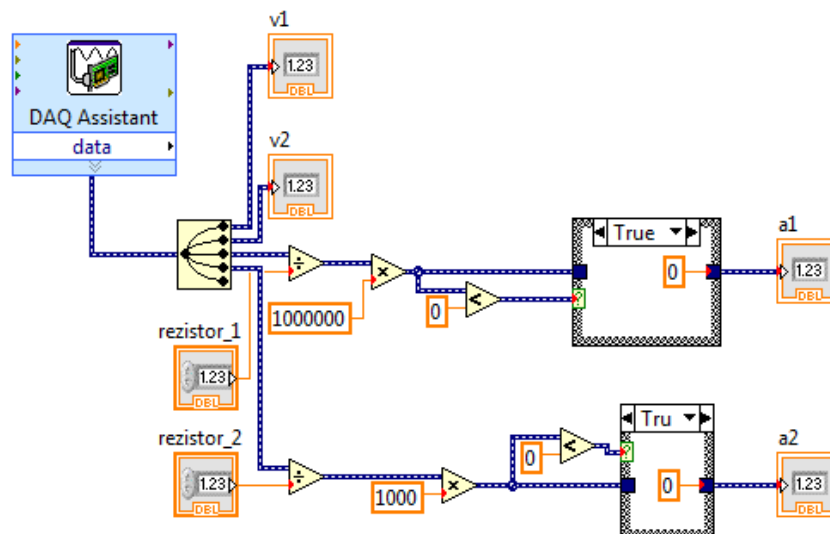
4.2.2 Vstupy z karty

Načítání analogových vstupů a přepočítání na požadované veličiny obstarává subVI v souboru **cteni.vi**. Blokový diagram programu je znázorněn na *obr. 4.7*.

Nejprve byl přidán DAQ asistent, podobně jako při analogových výstupech s rozdílem, že při vytváření asistenta bylo zvoleno **Acquire Signals** a přidány analogové vstupy pro měření napětí. **Terminal Configuration** je nastaven podle zapojení analogového vstupu popsaný v kapitole 3.3 na hodnotu **Differential** (odpovídá diferenciálnímu zapojení – kapitola 2.5). Po kliknutí na tlačítko **Run** můžeme vidět aktuální hodnoty na vstupech měřicí karty.

Výstup z DAQ asistenta tvoří kombinovaný signál, který rozdělíme funkcí **Split Signals** na jednotlivé signály. Výstupy napětí **v1** a **v2** představují numerické indikátory napětí v jednotkách V. Pro měření proudu **a1** a **a2** je zvolen přepočítání napětí pomocí Ohmova zákona

a rezistoru **rezistor_1** a **rezistor_2**. Proud **a1** je přepočten na jednotky mA a proud **a2** na jednotky μ A. Záporné hodnoty proudu jsou omezeny nastavením hodnoty na 0.



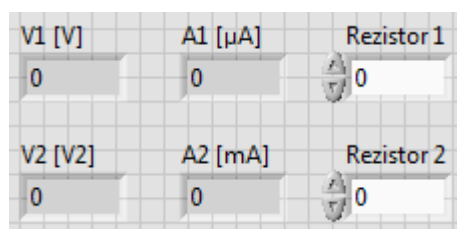
Obr. 4.7 Blokový diagram programu *cteni.vi*

Celkové subVI tvoří terminál se vstupy **rezistor_1** a **rezistor_2** a výstupy napětí V1 [V] a V2 [V] a výstupy proudu A1 [mA] a A2 [μ A]. Výstupy z terminálu odpovídají dle zapojení popsané v kapitole 3.3 veličinám podle *tab. 4.3*.

Tab. 4.3 Připojení terminálu *cteni.vi*

| Výstup terminálu | Měřicí veličina |
|------------------|-----------------|
| V1 | U_{BE} |
| V2 | U_{CE} |
| A1 | I_B |
| A2 | I_C |

SubVI můžeme spustit samostatně a zobrazit tak aktuální hodnoty na měřicí kartě, tak jak je znázorněno na *obr. 4.8*.



Obr. 4.8 Čelní panel subVI *cteni.vi*

4.3 Struktura programu

Program je rozdělen do několika subVI. Hlavní VI se nachází v souboru **hlavni.vi**, kde je vytvořena hlavní struktura programu. Program tvoří nekonečnou smyčku, která umožňuje průběh programu po jednotlivých krocích. Podobný cyklus programu je používám např. i v PLC (programovatelný logický automat). Bez použití nekonečné smyčky (**While Loop**) je možno spustit program tlačítkem **Run Continuously**. Ke smyčce je připojeno tlačítko stop, pro zastavení aplikace a dále je vždy zapotřebí nastavit časové zpoždění mezi jednotlivými kroky, aby nedocházelo k zahlcení procesoru. Dále je ke smyčce připojena proměnná **index**, která definuje číslo procházeného cyklu.

Pro zajištění správné posloupnosti programu, jsou jednotlivé kroky rozděleny do sekvencí (funkcí **Stacked Sequence Structure**). Sekvence 0 až 4 jsou popsány v následujících kapitolách.

4.3.1 Zapnutí a vypnutí měření

V prvním kroku programu, je zjišťován stav stisknutí tlačítek pro zapnutí nebo vypnutí automatického měření tranzistoru.

Zastavení programu je řešeno porovnáním logickou funkcí **Or** tlačítek **stop_vstupni** a **stop_vystupni**. Při splnění této podmínky je nastavena proměnná **stop_mereni** na **true**, tento stav proměnné je vyhodnocen v poslední sekvenci.

Pokud není zapnuto automatické měření (proměnná **mereni** = false) je umožněno spuštění měření výstupní (**start_vystupni**) nebo vstupní (**start_vstupni**) charakteristiky tranzistoru. Při spuštění dochází ke zpracování větve pro společnou inicializaci proměnných (tab. 4.4) a zpracování větve pro dané měření (tab. 4.5 pro výstupní a tab. 4.6 pro vstupní).

Celá sekvence toho programu s komentáři je obsažena v příloze na obr. B.1.

Tab. 4.4 Inicializace společných proměnných při spuštění měření

| Proměnná | Hodnota | Popis |
|----------------|---------|---|
| krok_mereni | 0 | číslo kroku měření |
| krok_predchozi | 0 | předchozí číslo měření |
| start_index | index | číslo cyklu při zapnutí měření |
| mereni | true | zapnutí měření |
| stop_mereni | false | vypnutí měření |
| data_krok | null | naměřené hodnoty jednoho kroku |
| start_vystupni | false | reference na zobrazení tlačítka zapnutí měření výstupní char. |
| start_vstupni | false | reference na zobrazení tlačítka zapnutí měření vstupní char. |

Tab. 4.5 Nastavení proměnných při spuštění výstupní charakteristiky

| Proměnná | Hodnota | Popis |
|----------------|--------------------------|--|
| typ_mereni | výstupní charakteristika | typ měření, který je spuštěn |
| kroky_vystupni | null | hodnoty kroků měření |
| data_vystupni | null | celkové naměřené hodnoty |
| stop_vstupni | false | zobrazení stop tlačítka vstupní char. |
| stop_vystupni | true | zobrazení stop tlačítka výstupní char. |

Tab. 4.6 Nastavení proměnných při spuštění výstupní charakteristiky

| Proměnná | Hodnota | Popis |
|---------------|-------------------------|--|
| typ_mereni | vstupní charakteristika | typ měření, který je spuštěn |
| kroky_vstupni | null | hodnoty kroků měření |
| data_vstupni | null | celkové naměřené hodnoty |
| stop_vstupni | true | zobrazení stop tlačítka vstupní char. |
| stop_vystupni | false | zobrazení stop tlačítka výstupní char. |

4.3.2 Výpočet napětí zdrojů

Sekvence číslo 1 je zobrazena v příloze na obr. B.2. Pokud je zapnuto měření (**mereni** = true), jsou vybrány hodnoty (maximální napětí, počet odečtů a seznam napětí pro jednotlivé kroky) podle typu měření. Vybrání správných hodnot umožňuje funkce **Case**, na kterou je připojena proměnná **typ_mereni**.

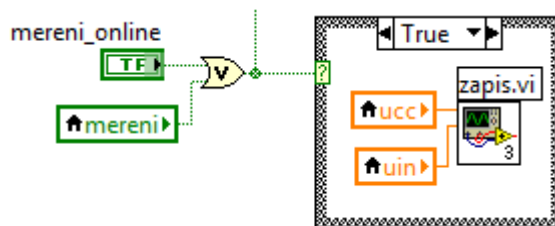
Vydělením maximálního napětí a počtem odečtu získáme napětí jednoho kroku. Číslo měřeného kroku získáme odečtením aktuálního průchodu cyklem a startovacího indexu (**index** - **start_index**). Startovací index je nastaven při spuštění měření na hodnotou průchodu cyklem.

Vynásobením čísla kroku a napětí jednoho kroku získáme napětí, které je třeba zapsat na kartu. Nejprve je třeba porovnat hodnotu napětí s maximálním napětím, které bylo nastaveno při spuštění měření. Pokud tato hodnota napětí nepřesáhla maximální povolenou hodnotu, je napětí nastaveno do proměnné **ucc** (**uin**) pro měření výstupní (vstupní) charakteristiky. Druhé napětí zdroje je nastaveno podle indexu procházeného kroku (**krok_mereni**) výběrem ze seznamu napětí U_{in} (U_{cc}) pro měření výstupní (vstupní) charakteristiky.

Po překročení maximální hodnoty napětí, je nastaven další krok měření. Další krok je nastaven iterací proměnné **krok_mereni** a resetování **start_index** na současnou hodnotu proměnné **index**. Pokud se jednalo o poslední měření, je nastavena proměnná **stop_mereni** na logickou hodnotu **true**. Tato proměnná signalizuje ukončení měření, které je zpracováno v poslední sekvenci měření.

4.3.3 Nastavení výstupních napětí karty

Další sekvence číslo 2 obstarává nastavování výstupních napětí z měřicí karty. Nastavení probíhá pouze v případě aktivního měření a to buď online měření, nebo měření vstupní / výstupní charakteristiky tranzistoru. Na obr. 4.9 je zobrazen blokový diagram této sekvence. Proměnné **mereni_online** a **mereni** jsou porovnány logickou funkcí **Or** a výsledek je následně zpracován ve struktuře **Case**. Při splnění této podmínky jsou proměnné **ucc** a **uin** předány do subVI v souboru **zapis.vi**. Tento subVI je popsán v předešlé kapitole 4.2.1.



Obr. 4.9 Nastavení výstupních napětí karty

4.3.4 Čtení a ukládání naměřených hodnot

Předposlední sekvence číslo 3 je zobrazena v příloze na obr. B.3. Celá sekvence je obalena v **Case** struktuře s podmínkou zapnutého měření (**mereni_online** OR **mereni**). Tato podmínka je předána z předchozí sekvence. Sekvence zpracovává naměřené údaje a výsledky ukládá do proměnných.

Naměřené hodnoty jsou získány ze subVI v souboru **cteni.vi**. Tento subVI je popsán v kapitole 4.2.2. Hodnoty jsou nejprve předány jednotlivým kontrolům, které se nacházejí na čelním panelu (**Front Panel**) a dále zpracovány v podmíněné struktuře měření.

Pokud je zapnuto měření vstupních / výstupních charakteristik (**mereni** = true), dochází k dalšímu zpracování hodnot. V **Case** struktuře jsou vybrána naměřená data podle spuštěného měření. Tyto data jsou vždy spojena do jednorozměrného pole a přidána do proměnné **data_krok**. Proměnná **data_krok** je dvourozměrné pole, do kterého jsou ukládány naměřené hodnoty jednoho celého kroku měření (např. všechny naměřené hodnoty pro $I_B = 20 \mu A$ při měření výstupní charakteristiky).

Při změření poslední hodnoty nebo ukončení měření jsou naměřené hodnoty z proměnné **data_krok** přidány do proměnné **data_vystupni** (**data_vstupni**), která obsahuje všechny naměřené hodnoty kroků ve trojrozměrném poli (matici).

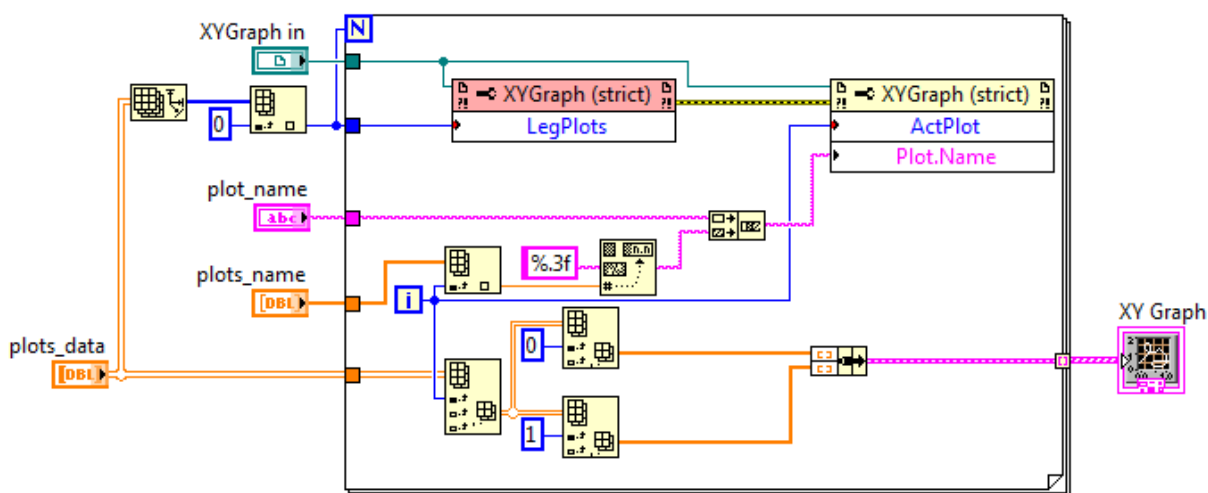
Do proměnné **kroky_vystupni** (**kroky_vstupni**) jsou ukládány hodnoty, které odpovídají kroku měření, např. proudy I_B (napětí U_{CE}) pro měření výstupní (vstupní) charakteristiky. Přidání je podmíněno neexistujícím záznamem a nezastavením měření tranzistoru.

4.3.5 Ukončení měření a zpracování dat

V poslední sekvenci dochází ke zpracování zastaveného měření, vykreslování grafů a ukládání naměřených hodnot do souboru. Blokový diagram této sekvence je zobrazen v příloze na obr. B.4.

Při aktivním měření je aktualizována proměnná **krok_predchozi** posledním měřeným krokem. Pokud v průběhu měření byla nastavena proměnná **stop_mereni** na hodnotu **true**, dojde k zastavení měření, tzn. proměnné **mereni** a **stop_mereni** jsou nastavena na **false** a dojde ke skrytí stopovacích tlačítek (**stop_vstupni**, **stop_vystupni**) a zobrazení startovacích tlačítek měření (**start_vstupni**, **start_vystupni**).

Podle typu měření je vykreslován graf, pro který bylo zapotřebí vytvořit subVI na převod naměřených hodnot do datového typu cluster a následně zobrazit jednotlivé průběhy pomocí funkce **Graph**. SubVI pro převod je uloženo v souboru **graph.vi** a je zobrazeno na obr. 4.10. Vstupními parametry terminálu je reference na výstupní graf (**XYGraph in**), data naměřených hodnot (**plots_data**), kroky měření (**plots_name**) a název (**plot_name**), který je přidán před hodnotu kroku. Každý krok znamená jeden průběh v grafu. K upravení dat dochází přes strukturu **For Loop**, která se opakuje podle počtu kroků měření (průběhů v grafu). Každému grafu je přiřazeno jméno složeno z proměnné **plot_name** a hodnoty kroku, dále jsou data převedena do typu cluster a auto-indexací je vytvořeno pole clustru, které lze zobrazit v grafu.

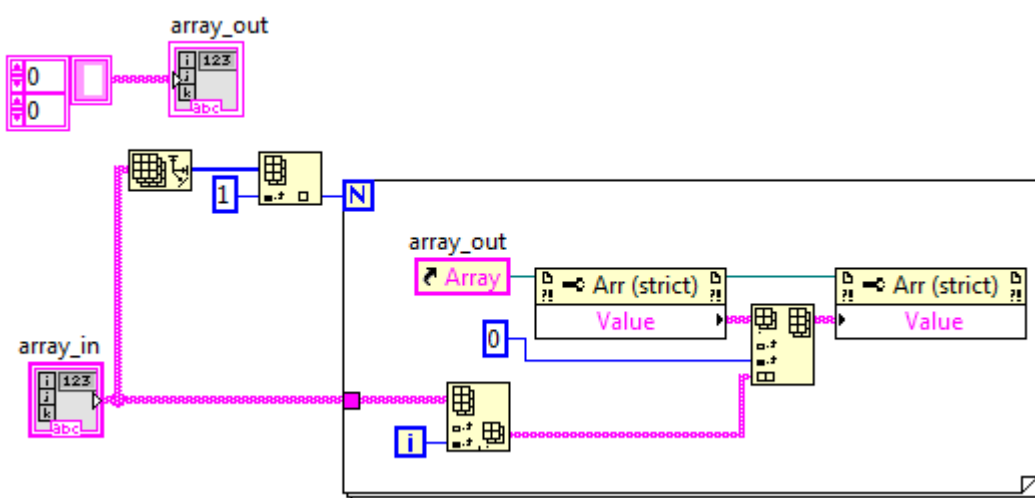


Obr. 4.10 Převod naměřených dat do více průběhů v grafu (graph.vi)

Naměřená data lze ukládat do souboru stisknutím tlačítka **Uložit**. Formát souboru je popsán a zobrazen v kapitole 4.1. Ke zpracování a uložení dat pro zápis do souboru bylo

vytvořeno subVI v souboru **soubor.vi**. Terminál subVI má pouze vstupní parametry: cestu k souboru, konstantní veličinu při měření (parametr I_B nebo U_{CE}), pole proměnných veličin (U_{CE} , I_C nebo U_{BE} , I_B), kroky měření a data s naměřenými hodnotami.

Program **soubor.vi** je zobrazen s komentáři v příloze na *obr. B.5*. Nejprve je vytvořen první sloupec kroků s názvem sloupce a následně jsou naměřená data zpracována postupně cyklem **For Loop**, podle počtu kroků. Nejprve je vybrán krok podle indexu cyklu, následně jsou data typu number převedena na datový typ string se třemi desetimístnými čísly funkcí **Number To Fractional String**. Jelikož jsou data seřazena obráceně, bylo zapotřebí vytvořit funkci pro reverzi matice. Pro reverzi dvourozměrného pole bylo vytvořeno subVI v souboru **array_reverse_2D.vi** a struktura program je na *obr. 4.11*.



Obr. 4.11 Program pro reverzi dvourozměrného pole (*array_reverse_2D.vi*)

Tomuto terminálu byla vytvořena i odpovídající ikonka, která je zobrazena vpravo na *obr. 4.12*. Na obrázku je pravý horní roh čelního panelu subVI, kde jsou vlevo od ikony přípojně body terminálu. Jedná se o vstup (proměnná **array_in**) a výstup (proměnná **array_out**) z terminálu typu string. Reverze je prováděna cyklem **For Loop**, podle velikosti vstupního pole. Nejprve je inicializována výstupní proměnná **array_out** a dále se v cyklu sestavuje referencí na proměnnou nové pole. Opačné pořadí je docíleno přidáváním hodnoty vždy na začátek pole (konstanta 0 ve funkci **Insert Into Array**).



Obr. 4.12 Ikona a přípojně body terminálu pro reverzi dvourozměrného pole

5 Měřicí úloha

V této kapitole je popsáno zadání laboratorní úlohy včetně návodu měření, a to pro automatizované měření bipolárních tranzistorů za použití přípravku, který je popsán v předešlých kapitolách. Program pro automatizované měření je přiložen v příloze C. V podkapitole 5.2 je vypracované měření bipolárního tranzistoru BC548C.

5.1 Zadání úlohy

1. Vyhledejte v katalogu a zapište mezní parametry bipolárního tranzistoru BC548C. Z proudového zesílení h_{21} (h_{FE}) určete maximální proud báze $I_{B \max}$.
2. Stanovte hodnoty rezistorů R_B a R_C , které nastavíte na odporové dekádě.
3. Připojte měřicí kartu NI USB-6008/6009 a odporovou dekádu k měřicímu přípravku.
4. Nalezněte pomocí on-line měření napětí U_{IN} , které odpovídá proudu $I_B = 10, 20, 30, 40, 50 \mu A$ a změřte výstupní charakteristiku tranzistoru.
5. Změřte vstupní charakteristiku tranzistoru $U_{CE} = 0 V$.
6. Z naměřených hodnot vytvořte grafy vstupní, výstupní a převodní charakteristiky tranzistoru.

5.2 Teoretický úvod

Teorie bipolárních tranzistorů je popsána podrobně v kapitole 1.

5.3 Vlastní měření

Mezní parametry tranzistoru BC548C:

$$I_{C \max} = 100 \text{ mA}$$

$$h_{21} (h_{FE}) = 420 - 800 \text{ (při } 100 \text{ mA } h_{21} = 300)$$

$$U_{CE \max} = 30 \text{ V}$$

$$P_{TOT} = 625 \text{ mW}$$

Maximální proud I_B :

$$I_{B \max} = \frac{I_{C \max}}{h_{21}} = \frac{0,1}{300} = 333,33 \mu A \quad (5.1)$$

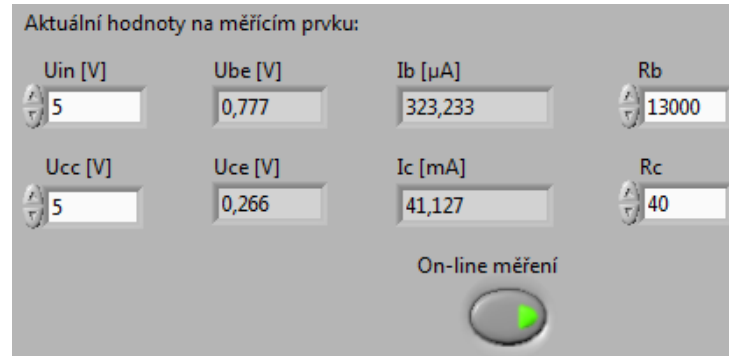
5.3.1 Postup měření

Do měřicího přípravku byly připojeny vstupy a výstupy měřicí karty NI USB-6009 a odporové dekády dle schématu zapojení *obr. 3.1* a popisu svorek karty v *tab. 3.1*.

Hodnota rezistoru R_B byla určena z rovnice 5.2, kde $U_{BE \max}$ odpovídá maximálnímu výstupnímu napětí karty a úbytku napětí na PN přechodu. S tímto výpočtem docílíme rozložení celého napětí 5 V pro maximální povolený proud $I_B = 333,33 \mu A$. Hodnota rezistoru R_B byla nastavena odporovou dekádou na 13 k Ω .

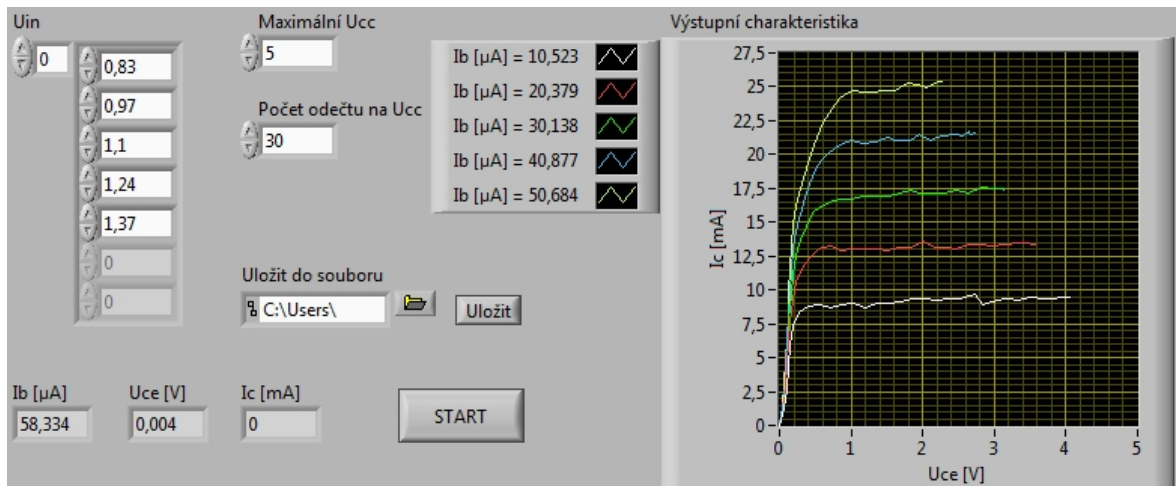
$$R_B = \frac{U_{BE \max}}{I_{B \max}} = \frac{5 - 0,6}{333,33 \cdot 10^{-6}} \doteq 13\,000 \, \Omega \quad (5.2)$$

Na odporové dekádě pro rezistor R_C bylo nastaveno $40 \, \Omega$, které odpovídá při měření tranzistoru (obr. 5.1) $41 \, \text{mA}$. Měřicí karta je měkkým zdrojem a dodávaný proud $41 \, \text{mA}$ odpovídá výstupnímu napětí karty $1,9 \, \text{V}$.



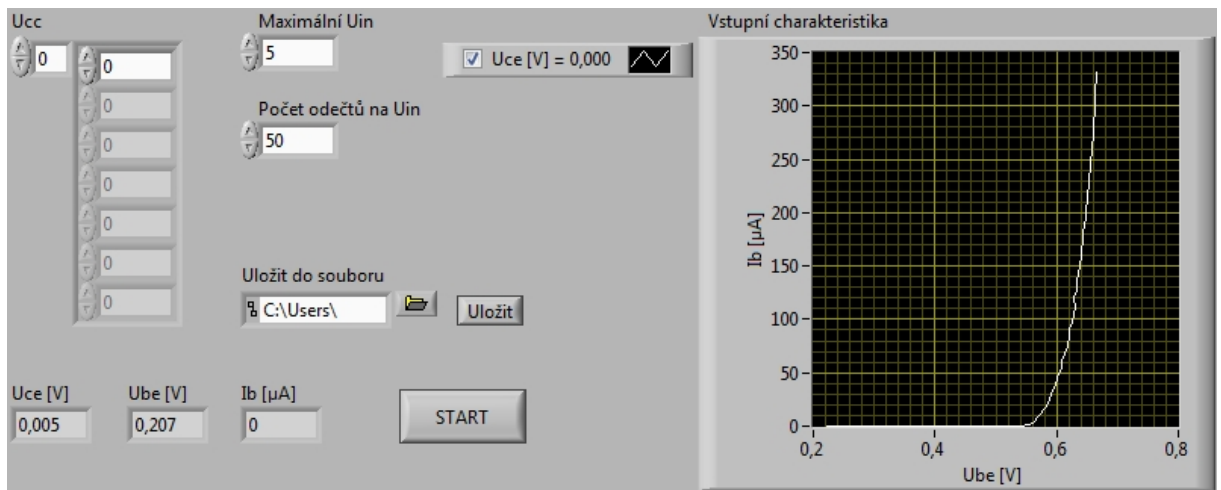
Obr. 5.1 On-line měření pro maximální I_B

Při on-line měření byly nalezena odpovídající napětí ($U_{IN} = 0,83, 0,97, 1,1, 1,24$ a $1,37 \, \text{V}$) pro proudy $I_B = 10,5, 20,3, 30, 40,9$ a $50,7 \, \mu\text{A}$. Tyto napětí byla nastavena v záložce pro měření výstupní charakteristiky a následně se spustilo měření tlačítkem **start**. Výsledek měření je zobrazen na obr. 5.2.



Obr. 5.2 Výsledek automatické měření výstupní charakteristiky tranzistoru

Pro měření vstupní charakteristiky tranzistoru si musíme dát pozor na maximální U_{IN} , které ovlivňuje maximální proud do báze tranzistoru. V počátku měření byla určena velikost rezistoru R_B , tak aby nemohlo dojít k překročení maximální hodnoty proudu I_B . V jiném případě můžeme nastavit maximální hodnotu napětí U_{IN} , která nebude při měření překročena. Vstupní charakteristika tranzistoru byla měřena pro napětí $U_{CC} = 0 \, \text{V}$ a výsledek měření v programu je zobrazen na obr. 5.3.



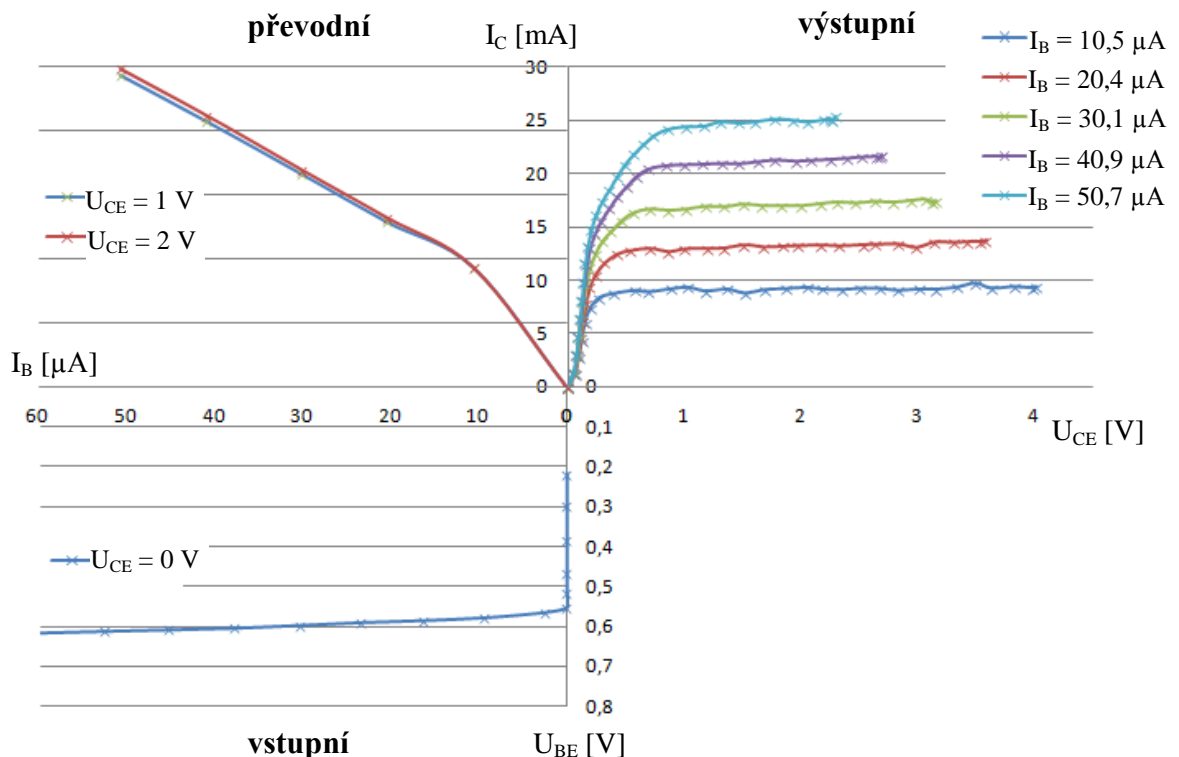
Obr. 5.3 Výsledek automatické měření výstupní charakteristiky tranzistoru

5.3.2 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty byly uloženy z programu pro automatizované měření statických charakteristik tranzistorů do formátu CSV. Výsledky měření výstupní charakteristiky při $I_B = 10,5, 20,3, 30, 40,9$ a $50,7 \mu\text{A}$ naleznete v příloze *tab. D.1*. V příloze *tab. D.2* se nacházejí naměřené hodnoty pro vstupní charakteristiku při konstantním napětí $U_{CE} = 0 \text{ V}$.

5.3.3 Grafy

Z hodnot byly vytvořeny grafy vstupní, výstupní a převodní charakteristiky tranzistoru BC548C (*graf 5.1*).



Graf 5.1 Statické charakteristiky tranzistoru BC548C

Závěr

V první části bakalářské práce jsou shrnuty poznatky o bipolárních tranzistorech a jejich měření.

V druhé kapitole je stručně popsáno vývojové prostředí LabVIEW a multifunkční karta NI USB-6008/6009, která byla použita pro měření voltampérových charakteristik tranzistorů. Karta samostatně dovoluje měřit pouze bipolární tranzistory PNP v zapojení se společným kolektorem nebo tranzistory NPN se společným emitorem. Toto omezení je způsobeno analogovými výstupy karty, které mají společnou zem a ze základních zapojení bipolárních tranzistorů. V této práci jsem se zaměřil v praxi na nejpoužívanější zapojení se společným emitorem, které má největší proudové a napěťové zesílení.

Měřicí karta má proudové omezení do 50 mA, které je vhodné pro tranzistory s malým výkonem. Pro měření výkonových tranzistorů je nutné použít externí zdroj, který by byl ovládán analogovým výstupem měřicí karty.

Zhotovený měřicí přípravek umožňuje manuální i automatizované měření vstupních a výstupních charakteristik bipolárního tranzistoru v zapojení se společným emitorem. Naměřené charakteristiky tranzistoru jsou zobrazeny v grafech a je umožněno uložení hodnot do formátu CSV.

V poslední kapitole této práce je popsáno vzorové zadání laboratorní úlohy pro měření voltampérových charakteristik bipolárního tranzistor BC548C a její vypracování.

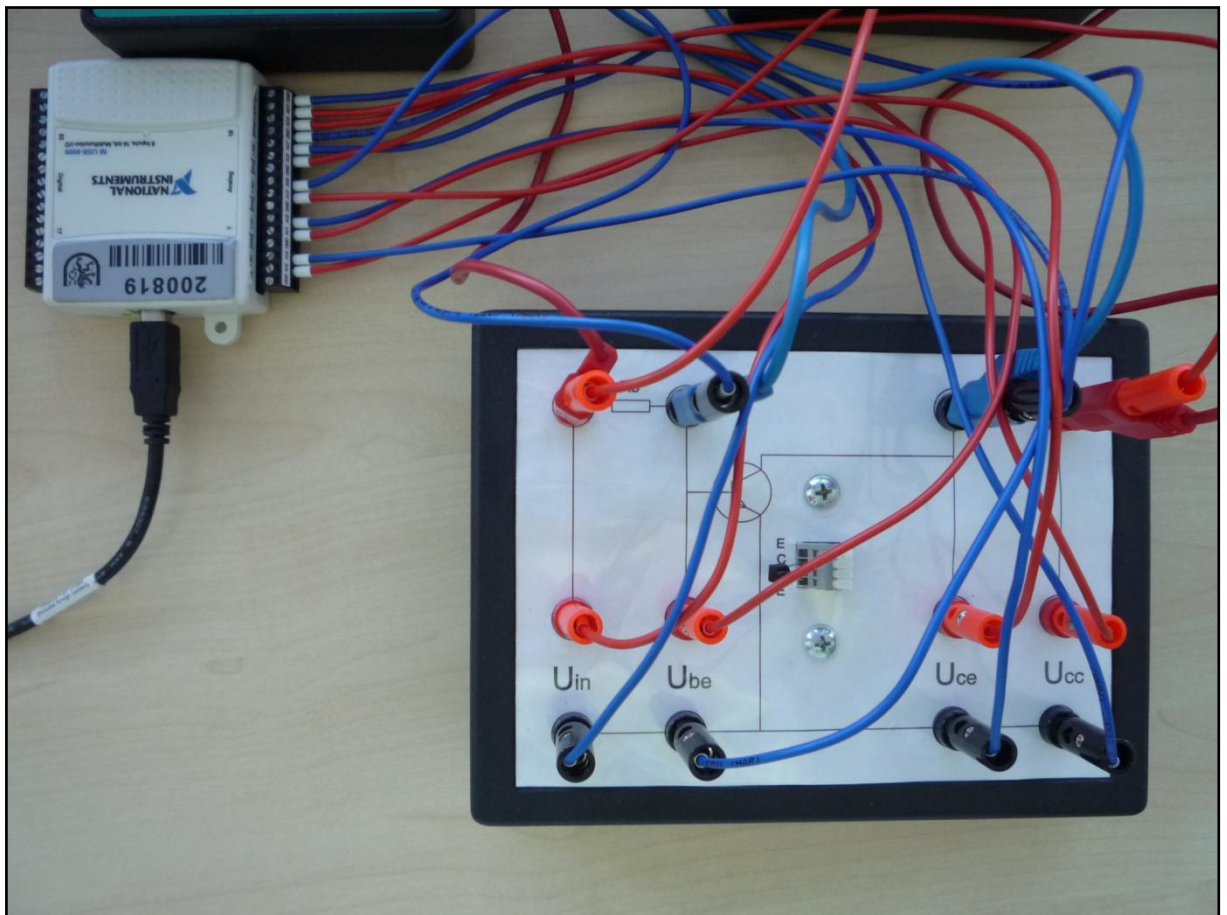
Výstupem této práce je zhotovení laboratorního přípravku a softwaru pro automatizované měření tranzistorů. Měřicí program byl spolu s přípravkem již úspěšně použit v rámci výuky předmětu Speciální součástky pro elektroniku (KET / SPS) a jeho využití je plánováno i do nadcházejících semestrů.

Použitá literatura

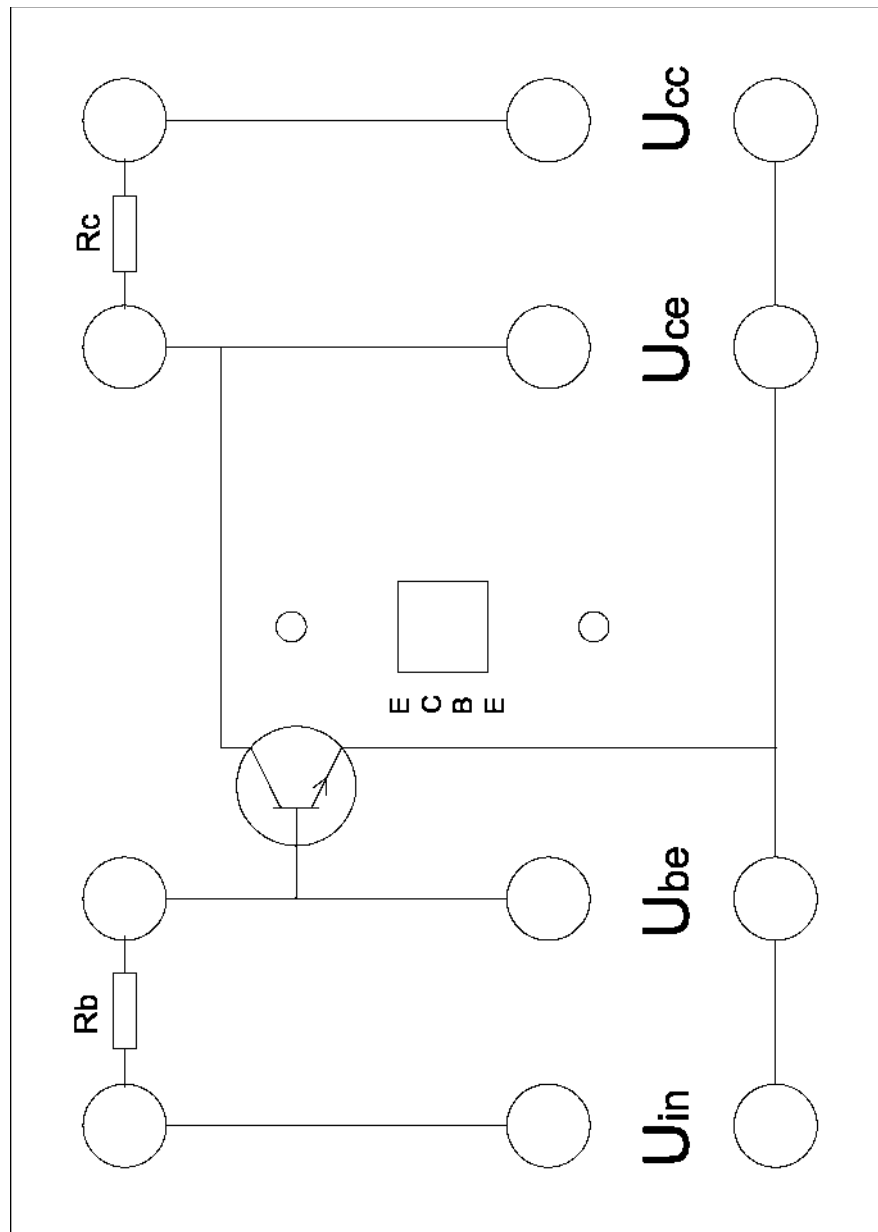
- [1] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady*. 3., rozš. vyd. Praha: Grada Publishing, 2005, 220 s. ISBN 80-247-1241-5.
- [2] BURGER, Ivan a Lubomír HUDEC. *Elektronické prvky*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1989, 489 s. ISBN 80-050-0120-7.
- [3] Brandštetter P., *Elektronika - Prvky elektronických obvodů* [online], [cit. 2012-04-11]. Elektronický učební text, 142 stran, Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/EL/Brandstetter_Elektronika_text.pdf
- [4] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika: [učebnice]*. 1. vyd.. České Budějovice: Kopp, 2004, 271 s. ISBN 80-723-2212-5.
- [5] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku*. 2. vyd. České Budějovice: KOPP, c1994, 173 s. ISBN 80-858-2825-1.
- [6] VŮJTEK, M. a P. KRCHŇÁK. *Praktikum z elektroniky* [online]. 2006, 43 s. [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: <http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/prakelek.pdf>
- [7] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 206 s. ISBN 80-730-0161-6.
- [8] Ing. VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. 1. vyd. Ilustrace Viktorie Vlachová. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 247 s. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [9] Free Online LabVIEW and Data Acquisition Training in Czech - Part 1. *National Instruments Corporation* [online]. [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://zone.ni.com/wv/app/doc/p/id/wv-3239/nextonly/y>
- [10] National Instruments Corporation, *Manuál ku kurzu LabVIEW Core 1*. Srpen 2011.
- [11] *NI USB-6008/6009 User Guide And Specifications* [dokument ve formátu PDF]. 2012 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303m.pdf>
- [12] Ing. VLACH, Jaroslav. Multifunkční karta a její aplikace. *Automatizace* [online]. Prosinec 2008 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.automatizace.cz/article.php?a=2392>
- [13] *Nápověda programu LabVIEW*
- [14] NI LabView [online]. [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: <http://www.ni.com/labview>
- [15] EAGLE, *Stránky návrhového programu Eagle* [online]. [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: <http://www.eagle.cz>, <http://www.cadsoft.de>
- [16] GM ELEKTRONIC, *Nabídka firmy GME* [online]. [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: <http://www.gme.cz>

Přílohy

Příloha A – Měřicí přípravek

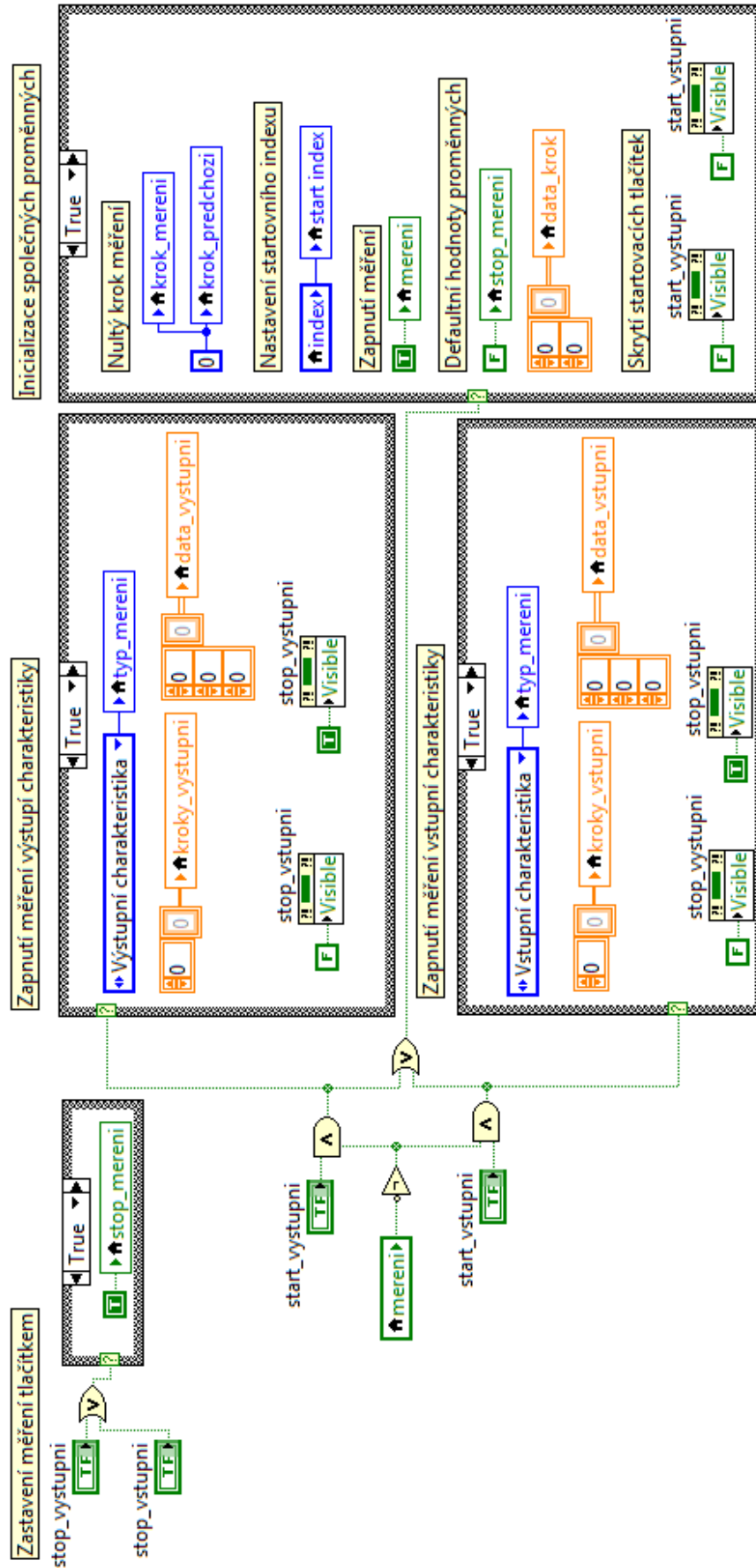


Obr. A.1 Měřicí přípravek připojený ke kartě NI USB-6009

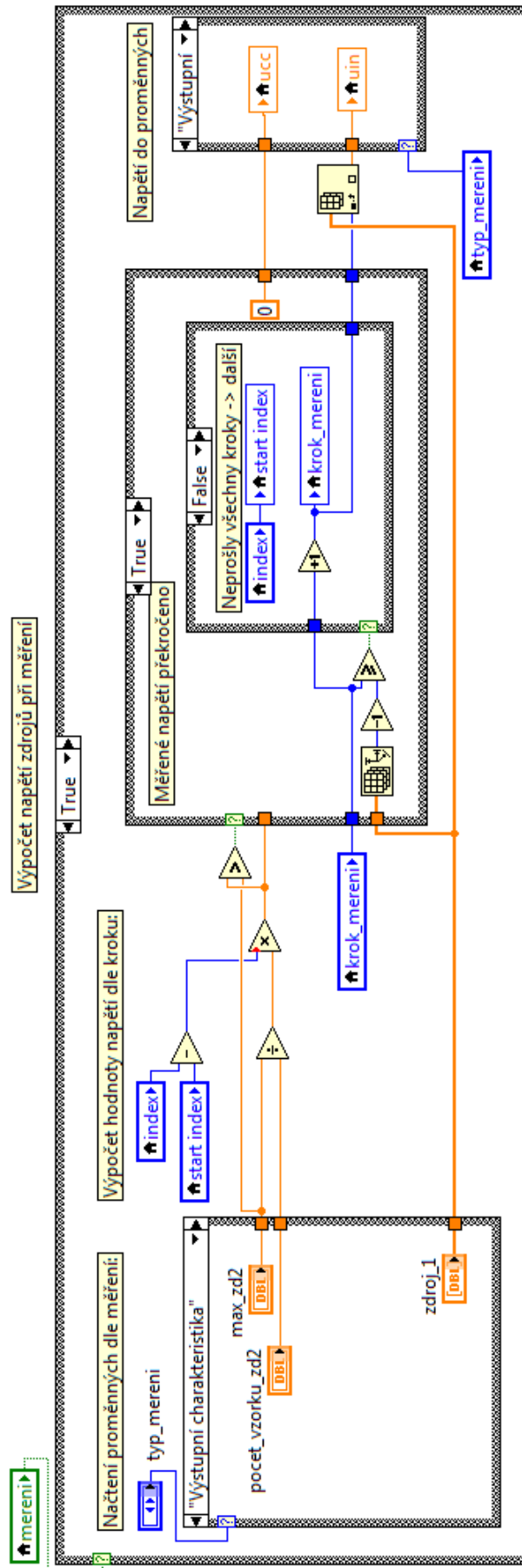


Obr. A.2 Čelní panel měřícího přípravku

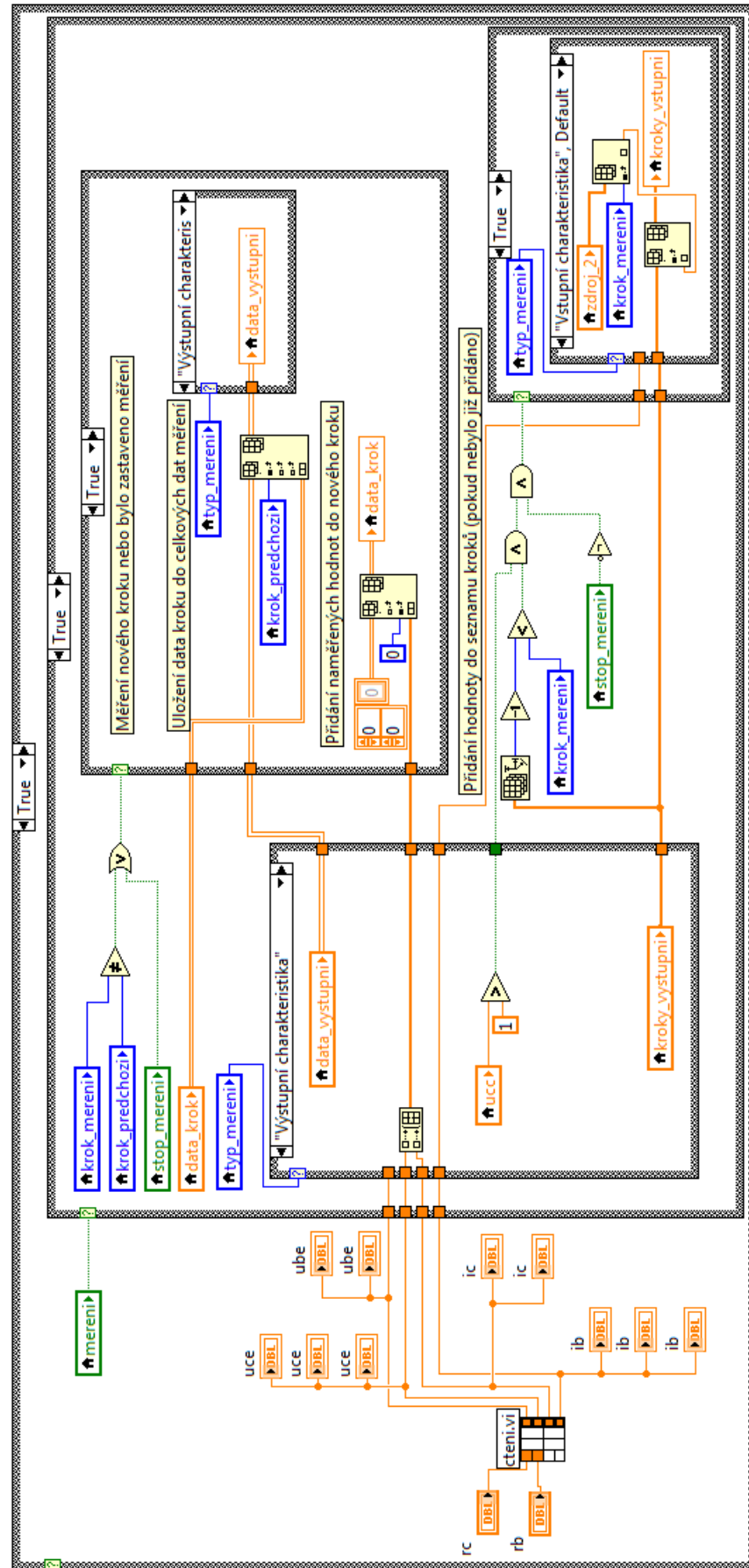
Příloha B – Struktura programu



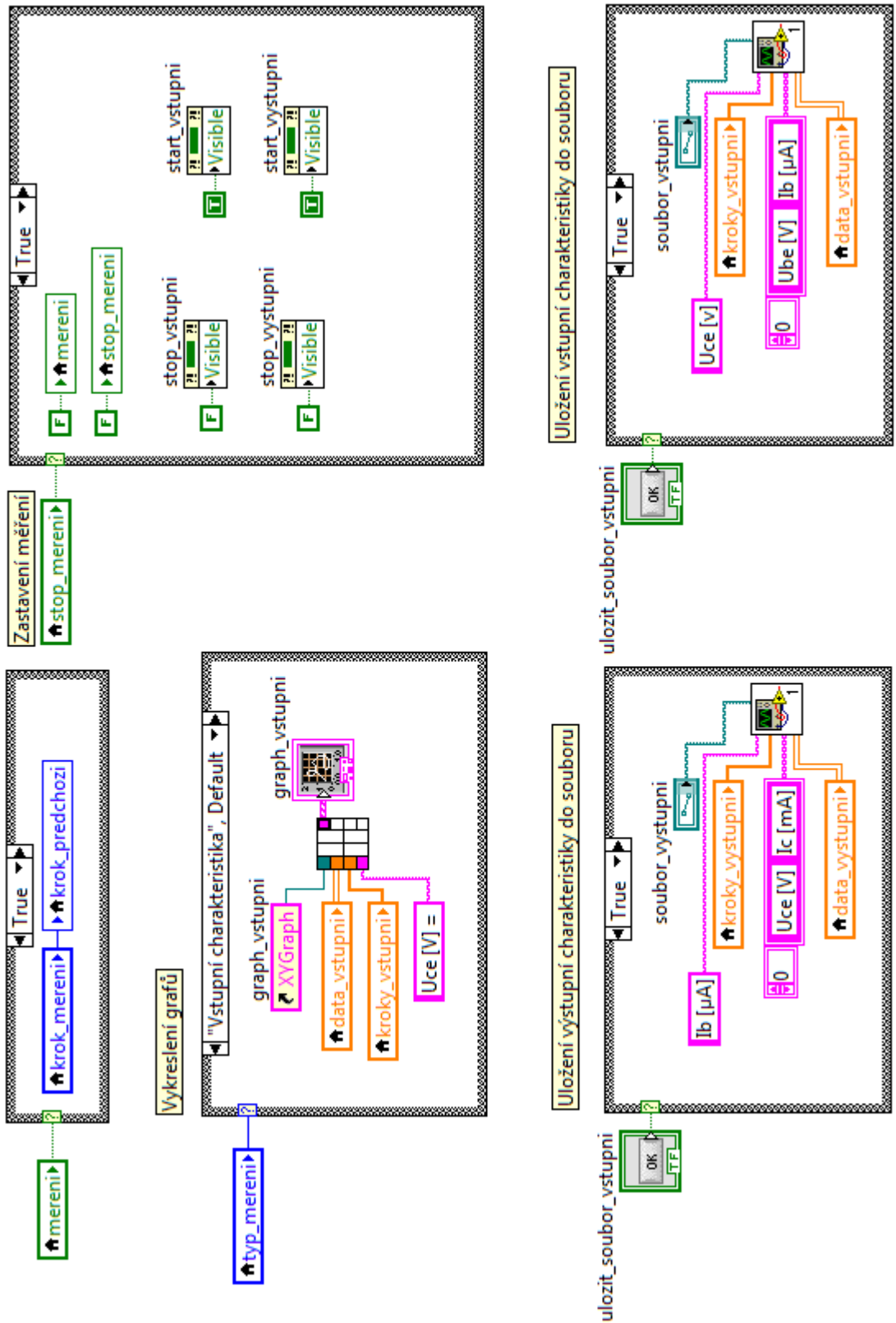
Obr. B.1 Zapnutí a vypnutí měření



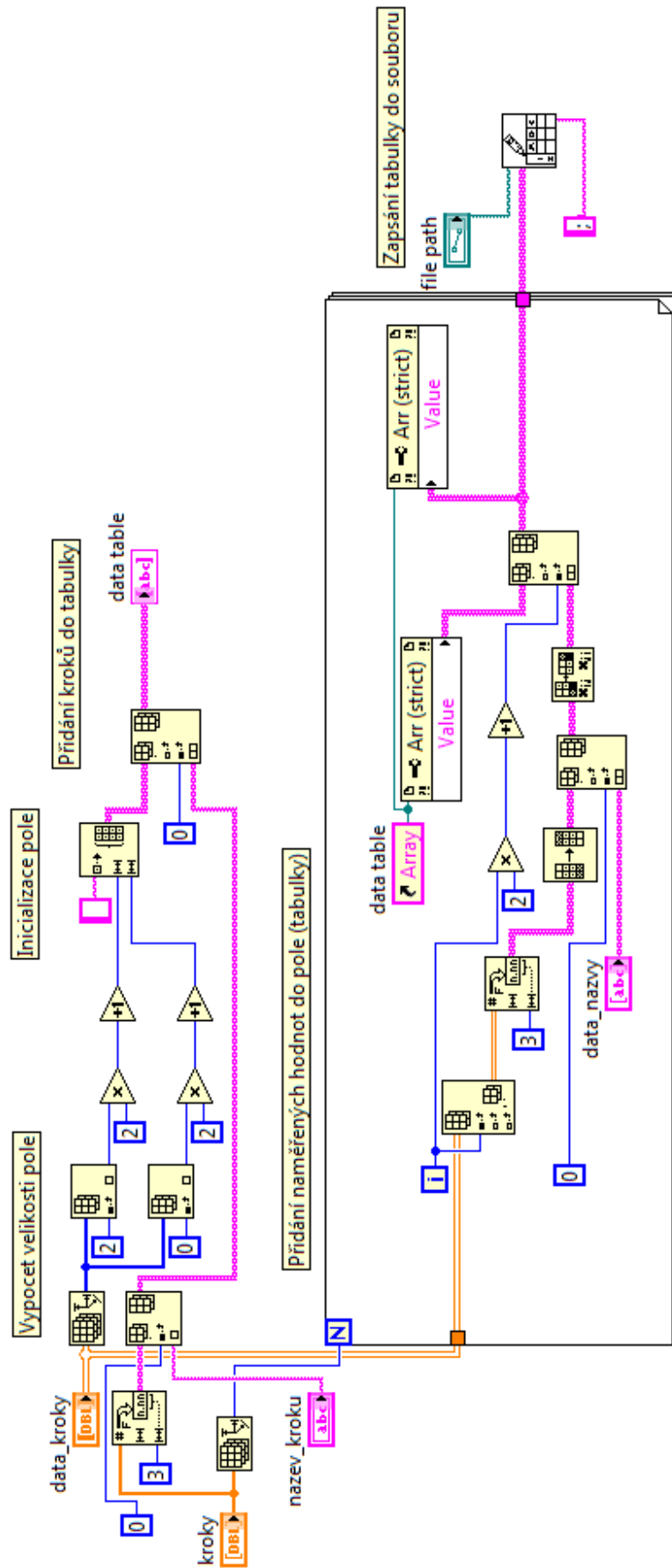
Obr. B.2 Výpočet napětí zdrojů



Obr. B.3 Měření vstupní a výstupní charakteristiky



Obr. B.4 Ukončení měření, vykreslení grafů a ukládání dat do souborů



Obr. B.5 Uložení naměřených dat do souborů (soubor.vi)

Příloha C – Program pro automatizované měření charakteristik tranzistorů

Program je přiložen na CD pro verzi programu LabVIEW 8.6 a LabVIEW 11.

Příloha D – Měření tranzistoru BC548C

Tab. 5.1 Hodnoty měření výstupní charakteristiky tranzistoru

| $I_B = 10,5 \mu\text{A}$ | | $I_B = 20,3 \mu\text{A}$ | | $I_B = 30 \mu\text{A}$ | | $I_B = 40,9 \mu\text{A}$ | | $I_B = 50,7 \mu\text{A}$ | |
|--------------------------|------------|--------------------------|------------|------------------------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|
| U_{CE} [V] | I_C [mA] | U_{CE} [V] | I_C [mA] | U_{CE} [V] | I_C [mA] | U_{CE} [V] | I_C [mA] | U_{CE} [V] | I_C [mA] |
| 0,005 | 0 | 0,006 | 0,005 | 0,006 | 0 | 0,006 | 0 | 0,006 | 0 |
| 0,067 | 1,216 | 0,057 | 1,248 | 0,055 | 1,328 | 0,048 | 1,36 | 0,047 | 1,407 |
| 0,098 | 2,762 | 0,088 | 2,858 | 0,08 | 2,969 | 0,073 | 3,017 | 0,07 | 3,081 |
| 0,125 | 4,324 | 0,109 | 4,547 | 0,101 | 4,643 | 0,091 | 4,691 | 0,087 | 4,786 |
| 0,151 | 5,918 | 0,129 | 6,125 | 0,118 | 6,332 | 0,109 | 6,412 | 0,101 | 6,492 |
| 0,194 | 7,289 | 0,153 | 7,767 | 0,134 | 7,974 | 0,124 | 8,086 | 0,117 | 8,197 |
| 0,271 | 8,309 | 0,185 | 9,297 | 0,157 | 9,632 | 0,141 | 9,807 | 0,133 | 9,871 |
| 0,392 | 8,707 | 0,236 | 10,524 | 0,189 | 11,178 | 0,163 | 11,465 | 0,147 | 11,624 |
| 0,581 | 9,01 | 0,316 | 11,608 | 0,237 | 12,517 | 0,189 | 13,011 | 0,169 | 13,266 |
| 0,696 | 8,883 | 0,422 | 12,421 | 0,297 | 13,664 | 0,235 | 14,413 | 0,199 | 14,796 |
| 0,885 | 9,154 | 0,545 | 12,756 | 0,374 | 14,589 | 0,289 | 15,609 | 0,241 | 16,183 |
| 1,036 | 9,313 | 0,701 | 12,947 | 0,461 | 15,593 | 0,356 | 16,741 | 0,294 | 17,41 |
| 1,189 | 8,962 | 0,86 | 12,644 | 0,566 | 16,326 | 0,426 | 17,84 | 0,358 | 18,526 |
| 1,375 | 9,138 | 1 | 12,899 | 0,703 | 16,645 | 0,508 | 18,813 | 0,424 | 19,753 |
| 1,524 | 8,771 | 1,196 | 12,931 | 0,867 | 16,533 | 0,594 | 19,785 | 0,489 | 20,837 |
| 1,699 | 9,09 | 1,346 | 12,995 | 1,021 | 16,661 | 0,699 | 20,438 | 0,571 | 21,889 |
| 1,879 | 9,186 | 1,517 | 13,282 | 1,187 | 16,916 | 0,844 | 20,741 | 0,649 | 22,734 |
| 2,056 | 9,297 | 1,684 | 13,075 | 1,346 | 16,868 | 0,999 | 20,805 | 0,742 | 23,594 |
| 2,193 | 9,138 | 1,843 | 13,154 | 1,508 | 17,123 | 1,154 | 20,869 | 0,857 | 24,152 |
| 2,358 | 9,09 | 1,98 | 13,202 | 1,668 | 16,98 | 1,329 | 20,932 | 1,011 | 24,407 |
| 2,519 | 9,217 | 2,172 | 13,266 | 1,84 | 16,98 | 1,463 | 20,901 | 1,169 | 24,455 |
| 2,686 | 9,201 | 2,334 | 13,186 | 2,005 | 16,964 | 1,639 | 21,108 | 1,308 | 24,853 |
| 2,835 | 9,026 | 2,534 | 13,298 | 2,17 | 17,155 | 1,784 | 21,251 | 1,47 | 24,742 |
| 3,017 | 9,138 | 2,635 | 13,314 | 2,317 | 17,314 | 1,959 | 21,156 | 1,614 | 24,869 |
| 3,156 | 9,122 | 2,83 | 13,362 | 2,477 | 17,219 | 2,085 | 21,219 | 1,779 | 25,124 |
| 3,347 | 9,329 | 2,986 | 13,043 | 2,635 | 17,378 | 2,253 | 21,315 | 1,937 | 25,013 |
| 3,506 | 9,712 | 3,147 | 13,553 | 2,794 | 17,298 | 2,403 | 21,427 | 2,062 | 24,853 |
| 3,635 | 9,233 | 3,31 | 13,505 | 2,947 | 17,458 | 2,526 | 21,554 | 2,201 | 25,061 |
| 3,839 | 9,377 | 3,435 | 13,585 | 3,073 | 17,569 | 2,647 | 21,586 | 2,262 | 25,156 |
| 3,991 | 9,265 | 3,535 | 13,585 | 3,136 | 17,282 | 2,688 | 21,49 | 2,272 | 25,013 |
| 4,023 | 9,393 | 3,589 | 13,728 | 3,164 | 17,458 | 2,698 | 21,777 | 2,301 | 25,348 |

Tab. 5.2 Hodnoty měření vstupní charakteristiky tranzistoru

| $U_{CE} = 0 \text{ V}$ | |
|------------------------|-----------------------------|
| $U_{BE} \text{ [V]}$ | $I_B \text{ [}\mu\text{A]}$ |
| 0,219 | 0 |
| 0,299 | 0 |
| 0,383 | 0 |
| 0,465 | 0 |
| 0,518 | 0 |
| 0,552 | 0 |
| 0,565 | 2,579 |
| 0,578 | 9,395 |
| 0,585 | 16,407 |
| 0,59 | 23,419 |
| 0,597 | 30,481 |
| 0,604 | 37,885 |
| 0,608 | 45,388 |
| 0,612 | 52,793 |
| 0,616 | 60,246 |
| 0,618 | 67,602 |
| 0,619 | 75,105 |
| 0,623 | 82,46 |
| 0,625 | 89,865 |
| 0,628 | 97,221 |
| 0,631 | 104,772 |
| 0,635 | 112,275 |
| 0,636 | 119,729 |
| 0,638 | 127,329 |
| 0,64 | 134,685 |
| 0,643 | 142,433 |
| 0,641 | 149,985 |
| 0,645 | 157,634 |
| 0,647 | 165,186 |
| 0,648 | 172,689 |
| 0,648 | 180,29 |
| 0,651 | 187,89 |
| 0,652 | 195,295 |
| 0,651 | 202,994 |
| 0,653 | 210,399 |
| 0,656 | 217,705 |
| 0,656 | 225,355 |
| 0,659 | 232,809 |
| 0,66 | 240,262 |
| 0,659 | 248,059 |