



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

TESTER TRANZISTORŮ PŘIPOJITELNÝ PŘES USB

TRANSISTOR TESTER CONNECTABLE VIA USB

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Daniel Skopalík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivo Lattenberg, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Daniel Skopalík

ID: 155236

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Tester tranzistorů připojitelný přes USB

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a vyrobte elektronický tester tranzistorů, který bude testovat a měřit tranzistor zapojený do testovací patice. Zařízení bude napájené z USB počítače a přes tento port bude také komunikovat s obslužným programem. Navrhněte a realizujte ovládací program pro PC, ze kterého bude možno spouštět testy na průraz či přerušení přechodů, provádět jednoduché měření charakteristik v několika bodech, ze kterých pak bude určena hodnota proudového zesílení, respektive strmosti. Pro realizaci použijte mikrokontrolér ATMEL.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BRTNÍK, Bohumil a David MATOUŠEK. Mikroprocesorová technika: [práce s mikrokontroléry řady ATMEL AVR ATXmega A4]. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-408-4.

[2] MATOUŠEK, David. Práce s mikrokontroléry ATMEL. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. µC & praxe. ISBN 80-7300-209-4.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivo Lattenberg, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, C.Sc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do oizích 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce popisuje návrh a realizaci testeru tranzistorů postaveného na bázi mikrokontroléru AtMega. Navržené zařízení by mělo sloužit pro testování funkčnosti a měření základních parametrů tranzistorů v domácí nebo školní dílně. Realizace navrženého zařízení by měla být snadno uskutečnitelná v kusovém množství, při zachování přijatelných cenových nákladů a rozsahu funkcí.

Klíčová slova

Měření parametrů tranzistorů, testování tranzistorů, měřicí přístroj s mikrokontrolérem AVR, měřicí přístroj s rozhraním USB

Abstract

This thesis describe development and realization of transistor tester based on AtMega microcontroller. Developed equipment should be used by DIY users or students in university workshop to verify transistor functionality and measure basic characteristics. Equipment should be easily manufacturable in a piece quantity with reasonable costs.

Keywords

Transistor parameters measurement, Transistor testing, Measuring equipment based on AVR microcontroller, Measuring equipment with USB interface.

Bibliografická citace:

SKOPALÍK, D. *Tester tranzistorů připojitelný přes USB*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 54 s. Vedoucí Diplomové práce doc. Ing. Ivo Lattenberg, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Tester tranzistorů připojitelný přes USB jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **21. Května 2018**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Teoretický úvod	2
2.1	Bipolární tranzistory	2
2.2	Unipolární tranzistory	8
3	Měření elektrických veličin.....	15
3.1	Přímé a nepřímé metody měření elektrických veličin	15
3.2	Odchytky měření	16
3.3	Analogově-digitální převodníky	16
3.4	Digitálně-analogové převodníky	17
4	Mikrokontrolér atmega	19
4.1	Periferie mikrokontroléru	20
4.2	Komunikační rozhraní	21
5	Návrh zapojení testeru tranzistorů	23
5.1	Schéma zapojení	28
5.2	Návrh desky plošného spoje	29
6	Firmware mikrokontroléru	31
7	Ovládací aplikace	34
7.1	Knihovna pro komunikace se sériovým portem	34
7.2	Knihovna MeasureDeviceLibrary	34
7.3	Grafické uživatelské rozhraní	38
8	Závěr	40
	Literatura	41
	Použité softwarové knihovny třetích stran	42
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	43
	Fotografie	44
	Seznam použitých součástek.....	45
	Seznam příloh na CD	46

Seznam obrázků

Obrázek 1: Struktura bipolárního tranzistoru	3
Obrázek 2: Ebersův-Mollův model tranzistoru (převzato z [1]).....	5
Obrázek 3: Hybridní model tranzistoru.....	6
Obrázek 4: Měřicí zapojení pro bipolární tranzistor	7
Obrázek 5: Princip funkce MOSFET s indukovaným kanálem.....	9
Obrázek 6: princip funkce MOSFET tranzistoru s vodivým kanálem	9
Obrázek 7:Parazitní bipolární tranzistor ve struktuře unipolárního tranzistoru ..	10
Obrázek 8: Princip funkce tranzistoru JFET	11
Obrázek 9: Malosignálový model funkce unipolárního tranzistoru.....	11
Obrázek 10: Měřicí zapojení pro unipolární tranzistor	14
Obrázek 11: Architektura jádra AVR (převzato [5])	19
Obrázek 12: Zapojení vzorkovače AD převodníku (převzato z datasheetu).....	21
Obrázek 13: modul s AD převodníkem ADS1115.....	26
Obrázek 14: Schéma zapojení prototypu	28
Obrázek 15: Výkres desky plošného spoje: horní vrstva.....	29
Obrázek 16: Výkres desky plošného spoje: spodní vrstva	29
Obrázek 17: Osazovací plán desky plošného spoje.....	30
Obrázek 18:Hlavní okno aplikace	38
Obrázek 19: Okno diagnostiky komunikace.....	38
Obrázek 20: Okno grafu	39
Obrázek 21: Okno manuálního ovládání.....	39
Obrázek 22: Atlas DCA 75(vlevo) a univerzální tester elektornických součástek .	40
Obrázek 23: První prototyp - rozšiřující deska pro arduino	44
Obrázek 24: Druhý prototyp s osazeným mikrokontrolérem AtMega64	44
Obrázek 25: Finální verze desky plošného spoje	44

Seznam tabulek

Tabulka 1: Komunikační protokol - přehled podporovaných příkazů.....	32
Tabulka 2: Seznam součástí.....	45

1 ÚVOD

Tato diplomová práce se zaměřuje na návrh testeru polovodičových součástek, konkrétně diod a tranzistorů. Potřeba tohoto testeru vychází především z amatérské praxe, kdy je nezřídka potřeba ověřit funkčnost tranzistorů či diod z domácích či laboratorních zásob.

Navrhovaný tester není plánován jako samostatně funkční přístroj. Nastavení parametrů, spuštění měření a zobrazení výsledků je realizováno obslužným programem na počítači. K této skutečnosti je přihlíženo již od začátku návrhu a výsledkem je jednoduché, levné a i v domácích podmínkách snadno vyrobitelné zařízení.

2 TEORETICKÝ ÚVOD

2.1 Bipolární tranzistory

Bipolární tranzistor byl vynalezen v roce 1947 v Bellových laboratořích týmem vědců Johna Bardeena, Williama Shockleyho a Waltera Brattaina. Tranzistory nabídlly oproti dříve hojně používaným vakuovým triodám především menší rozměry, nižší spotřebu a vyšší spolehlivost.

(1)

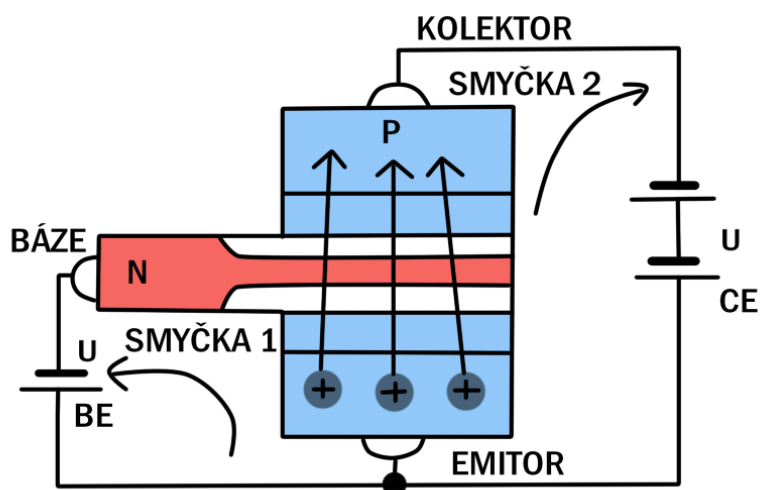
Bipolární tranzistor se skládá ze dvou opačně orientovaných PN přechodů, které sdílí společnou oblast. Ke všem třem oblastem jsou připojeny elektrody, které tvoří elektrické rozhraní tranzistoru. Tyto elektrody nazýváme báze (v anglické literatuře base, zkratka B), emitor (v anglické literatuře emitter, zkratka E) a kolektor (v anglické literatuře collector, zkratka C). Báze je, připojena k oblasti, která je společná oběma PN přechodům, elektrody emitor a kolektor jsou připojeny k opačným oblastem těchto PN přechodů.

PN přechod mezi bází a kolektorem a PN přechod mezi bází a emitorem nejsou u běžně vyráběných tranzistorů identické. Záměna emitoru a kolektoru je u většiny tranzistorů možná, tranzistor pak pracuje v inverzně aktivním režimu. Tranzistory jsou navrhovány pro provoz v běžném aktivním režimu, případně v saturačním režimu v případě spínacích tranzistorů. Geometrie PN přechodu a intenzita dotace polovodiče příměsmi je optimalizována pro dosažení požadovaných parametrů v aktivním a saturačním režimu. Bipolární tranzistory při provozu v inverzním režimu mají obvykle nižší proudový zesilovací činitel a také nižší průrazné napětí.

2.1.1 Princip funkce bipolárního tranzistoru

Funkce bipolárního tranzistoru je založena na interakci mezi dvěma PN přechody. Na obrázku č. 1 je znázorněna struktura tranzistoru ve variantě PNP.

Pokud je na přechod mezi bází a emitorem připojeno takové napětí U_{BE} , že je přechod v propustném směru a protéká jím proud I_B , dochází k injekci děr z emitoru do oblasti báze, protože ohmický kontakt vývodu báze je relativně daleko a oblast kolektoru s vodivostí P je blízko, většina injektovaných děr opustí difuzním pohybem oblast báze a přejdou do oblasti kolektoru s vodivostí P a tím zajišťují přenos proudu I_C .



Obrázek 1: Struktura bipolárního tranzistoru

Bipolární tranzistor ve variantě NPN má oblasti emitoru a kolektoru s vodivostí N a oblast báze s vodivostí P. Princip funkce tranzistoru NPN je téměř identický s tranzistorem PNP, pouze napětí mají opačnou polaritu a z emitoru jsou emitovány elektrony.

Aplikací Kirchhoffových zákonů lze odvodit proud protékající emitemem:

$$I_E = I_C + I_B \quad (2.1)$$

Z poměru proudu I_C a I_E je definován proudový zesilovací činitel α :

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad (2.2)$$

A také v technické praxi velice často využívaný proudový zesilovací činitel β :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (2.3)$$

2.1.2 Režimy funkce bipolárního tranzistoru

V závislosti na napětí na jednotlivých PN přechodech bipolárního tranzistoru, rozlišujeme několik režimů provozu.

- 1 **Nevodivý (závěrný) režim** – Oba PN přechody, BE i BC jsou polarizovány v závěrném směru. Tranzistorem teče pouze minimální parazitní proud. Tyto parazitní proudy jsou v technické praxi obvykle označovány jako I_{CB0} a I_{EB0} . Velikost těchto proudů je závislá na materiálových vlastnostech, konstrukci tranzistoru, přiloženém napětí v závěrném směru a teplotě.
- 2 **Normální aktivní režim** – PN přechod BE je polarizován v propustném směru, přechod BC je polarizován v závěrném směru. V tomto režimu tranzistor funguje jako zdroj proudu (I_C) řízený proudem (I_B). Kolektorový proud je β krát větší než proud do báze. $I_C = I_B \cdot \beta$. V tomto režimu tranzistor pracuje jako lineární zesilovač. V tomto režimu je na tranzistoru největší výkonová ztráta. Ztrátový výkon je roven $P = U_{CE} \cdot I_C$. Především u výkonových tranzistorů je třeba zajistit adekvátní odvod tepla.

- 3 Inverzní aktivní režim** – PN přechod BE je polarizován v závěrném směru, přechod BC je polarizován v propustném směru. Funkce tranzistoru je podobná jako v normálním aktivním režimu, funkce kolektoru a emitoru jsou zaměněny.
- 4 Saturační režim** - Oba PN přechody, BE i BC jsou polarizovány v propustném směru. Saturační režim bývá také označován jako otevřený stav nebo sepnutý stav s nízkým odporem. Tento stav je charakteristický nízkým napětím UCE při velkém kolektorovém proudu IC, výkonová ztráta je nízká. Saturační režim se obvykle používá v aplikacích, kde je bipolární tranzistor využit jako spínač v režimu zapnuto/vypnuto.

V některé literatuře se za jeden z pracovních režimů označuje i průraz. Průraz je obvykle nežádoucím jevem. Průrazy rozdělujeme na nedestruktivní a destruktivní. Nedestruktivní lavinový průraz může najít uplatnění v některých signálových obvodech.

Destruktivní tepelný nebo proudový průraz vedou k trvalému poškození tranzistoru. Při destruktivním průrazu může dojít k poškození tranzistoru několika různými způsoby. Jeden z možných způsobů je lokální protavení tenké oblasti báze, po kterém dojde k trvalému vodivému propojení kolektoru a emitoru. Proud protékající tranzistorem již není možné ovládat.

Druhým možným způsobem poškození tranzistoru je přerušování či oddělení některého z přívodních vodičů od polovodičového substrátu. Při velmi velkých poruchových proudech může dojít až k roztržení a destrukci pouzdra tranzistoru.

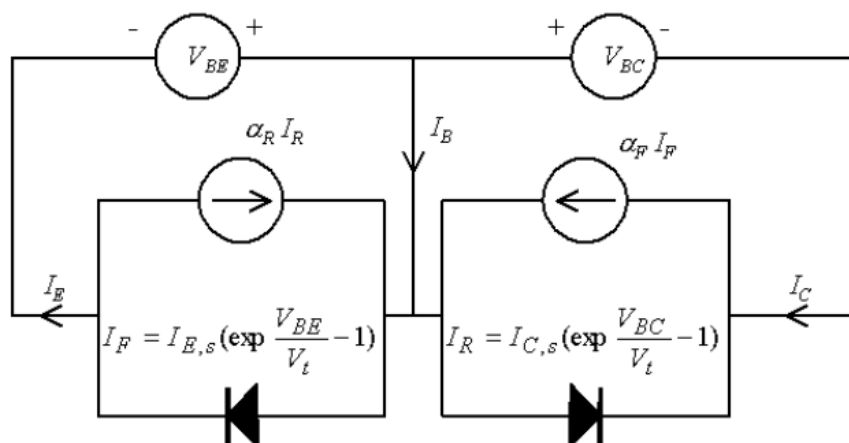
2.1.3 Model funkce bipolárního tranzistoru v obvodu

Teoretické modely fungování tranzistoru lze rozdělit na:

- Nelineární modely, které lze využít pro modelování chování tranzistoru téměř ve všech jeho režimech a výpočet odezvy při buzení velkým signálem.
- Lineární modely, které jsou platné pouze v okolí pracovního bodu a využívají se pro výpočet odezvy tranzistoru při buzení malým signálem.

Ebersův-Mollův model

Ebersův-Mollův je nelineární model simulující chování bipolárního tranzistoru v závěrném, aktivním, saturačním a inverzně aktivním režimu.



Obrázek 2: Ebersův-Mollův model tranzistoru (převzato z [1])

Kolektorový proud (případně emitorový proud v inverzním režimu) popisují následující rovnice:

V běžném režimu:

$$I_C = \alpha_N I_{ES} \left(\exp \frac{U_{BE}}{U_T} - 1 \right) - I_{CS} \left(\exp \frac{U_{BC}}{U_T} - 1 \right) \quad (2.4)$$

Kde α_N je proudový zesilovací činitel v běžném aktivním režimu a U_T je prahové napětí PN přechodu.

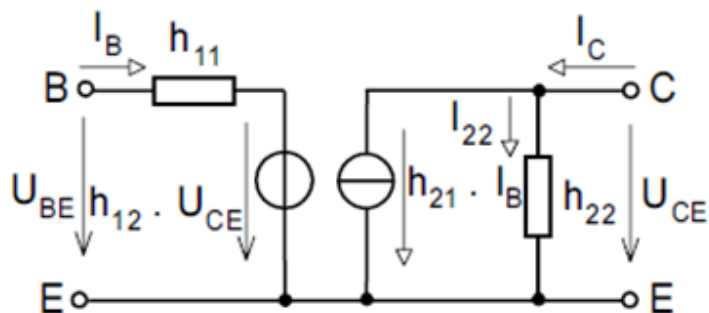
V inverzním režimu:

$$I_E = I_{ES} \left(\exp \frac{U_{BE}}{U_T} - 1 \right) - \alpha_I I_{CS} \left(\exp \frac{U_{BC}}{U_T} - 1 \right) \quad (2.5)$$

Kde α_I je proudový zesilovací činitel v běžném aktivním režimu

Zjednodušený model tranzistoru využívající hybridních parametrů

Hybridní model tranzistoru lze použít pro modelování chování tranzistoru v lineárním režimu v okolí pracovního bodu. K popisu dějů v zapojení tranzistoru se společným emitorem se používá sada rovnic, které jsou závislé na hybridních (dále h) parametrech. H parametry jsou obvykle zapisovány do matice 2x2 a jsou specifické pro každý typ tranzistoru.



Obrázek 3: Hybridní model tranzistoru

Proudy a napětí v obvodu lze popsat následujícími rovnicemi:

$$U_{BE} = f_1(I_B, U_{CE}) = h_{11} \cdot I_B + h_{12} \cdot U_{CE} \quad (2.6)$$

$$I_C = f_2(I_B, U_{CE}) = h_{21} \cdot I_B + h_{22} \cdot U_{CE} \quad (2.7)$$

2.1.4 Poruchy bipolárních tranzistorů

Při výrobě, montáži či provozu tranzistoru může při překročení maximálních limitů provozních parametrů dojít k poškození tranzistoru. U bipolárních tranzistorů jsou nejčastější tepelná poškození způsobená příliš velkou výkonovou ztrátou na tranzistoru bez dostatečného chlazení.

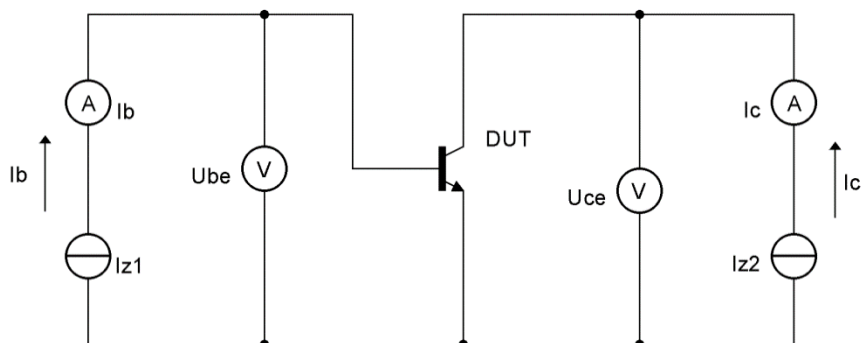
Jeden z možných způsobů poškození je, že v důsledku tepelného namáhání a rozdílné tepelné roztažnosti použitých materiálů, dojde k přerušení drátových přívodů (anglicky bonding wires) ke křemíkovému čipu. Toto poškození se z vnějšího hlediska jeví jako přerušovaný PN přechod.

Druhým způsobem poškození je tepelné poškození samotné polovodičové struktury, které se z vnějšího hlediska projeví jako zkrat mezi emitorem a kolektorem nebo zkrat některého z PN přechodů.

V případě nevhodného obvodového návrhu nebo použití málo dimenzovaného tranzistoru může dojít k napěťovému průrazu. Tranzistor v uzavřeném stavu je vystaven většímu napětí U_{CE} než je maximální povolené. Tato maximální hodnota napětí se obvykle v dokumentaci označuje jako U_{CEBr} . Při překročení U_{CEBr} dochází k lavinovému průrazu, který sám o sobě není destruktivní, nicméně v jeho průběhu dochází na tranzistoru k velké výkonové ztrátě, která způsobí zahřátí na vysokou teplotu a následné destruktivní tepelné poškození.

2.1.5 Měřicí zapojení pro měření bipolárních tranzistorů

Zapojení pro měření základních parametrů bipolárních tranzistorů je na obrázku číslo 4.



Obrázek 4: Měřicí zapojení pro bipolární tranzistor

I_{z1} a I_{z2} jsou proměnné zdroje proudu umožňující nastavení pracovního bodu pro měření charakteristik tranzistoru. Po změření hodnoty proudů I_B a I_C je možné podle rovnice 2.3 vypočítat proudový zesilovací činitel β , který se rovná hybridnímu parametru h_{21} , jenž je v technické praxi označován také jako h_{fe} .

Uvedené zapojení je možné využít pro měření tranzistorů obou polarit PNP i NPN. Na obrázku č. 4 je zapojení pro tranzistor s polaritou NPN, napětí U_{BE} a U_{CE} jsou kladná. Pro měření tranzistorů PNP je pouze potřeba změnit polaritu proudových zdrojů, napětí U_{BE} a U_{CE} jsou záporná.

2.2 Unipolární tranzistory

Uvnitř unipolárního tranzistoru je přenos proudu ve vodivém kanálu zajištěn pouze majoritními nosiči. Proud tekoucí vodivým kanálem je řízen elektrickým polem, které ovlivňuje koncentraci nosičů náboje v oblasti vodivého kanálu, proto se unipolární tranzistory také označují jako polem řízené tranzistory (anglicky Field Effect Transistor), z čehož vznikla často používaná značka FET.

Unipolární tranzistor má obvykle 3 elektrody, které se nazývají hradlo (anglicky Gate, zkratka G), emitor (anglicky source, zkratka S) a kolektor (anglicky drain, zkratka D). Unipolární tranzistory lze dále rozdělit do dvou hlavních kategorií podle spojení řídicí elektrody a vodivého kanálu.

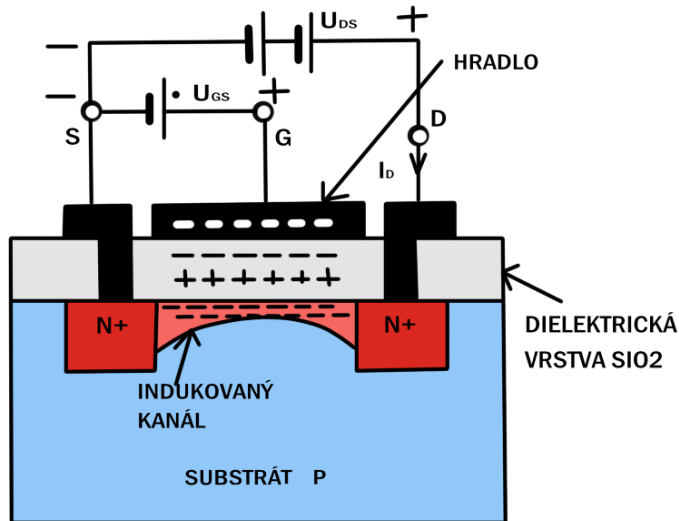
Prvním typem jsou tranzistory s izolovanou řídicí elektrodou, která je od vodivého kanálu elektricky izolována tenkou vrstvou oxidu křemíku. Mimo přechodové stavy neteče řídicí elektrodou tranzistoru tohoto typu žádný proud, pouze při spínání/rozpínání tranzistoru teče řídicí elektrodou proud nutný pro nabití/vybití parazitní kapacity C_{GS} . Tyto tranzistory jsou často označovány zkratkou MOSFET z anglického Metal Oxide Semiconductor.

Druhým typem jsou tranzistory JFET, tato zkratka vychází z anglického označení Junction Field Effect transistor. Mezi řídicí elektrodou a kanálem není izolační vrstva, ale PN přechod.

2.2.1 Tranzistory MOSFET

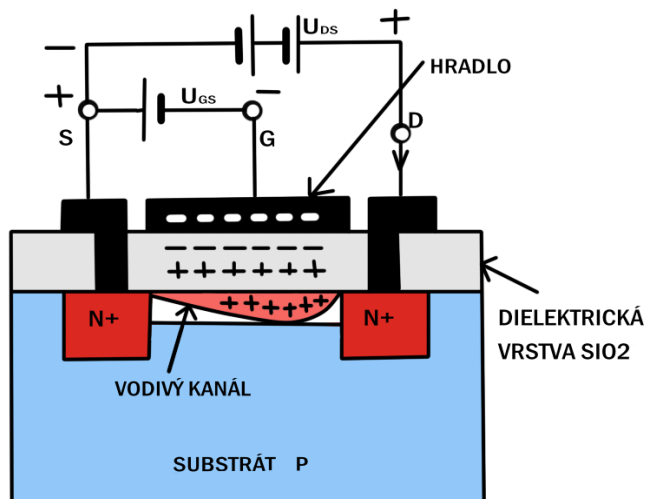
Tranzistory MOSFET mají vodivý kanál v blízkosti řídicí elektrody, která je oddělena izolantem. Proud procházející tranzistorem, respektive odpor jeho kanálu, je závislý na koncentraci nosičů náboje v oblasti kanálu. Elektrické pole vzniklé díky rozdílu potenciálů mezi hradlem a vodivým kanálem přitahuje, případně odpuzuje, nosiče náboje z oblasti kanálu, a tím je umožněn přenos proudu mezi elektrodami drain a source.

Tranzistory MOSFET se z pohledu stavu kanálu při nulovém napětí na řídicí elektrodě dělí na tranzistory s indukovaným kanálem a tranzistory s vodivým kanálem. V případě tranzistoru s indukovaným kanálem, při nulovém napětí U_{GS} proud kanálem neprochází, teprve se zvyšujícím se napětím U_{GS} jsou do oblasti kanálu přitaženy nosiče náboje. Princip činnosti MOSFET tranzistoru je znázorněn na obrázku č. 5.



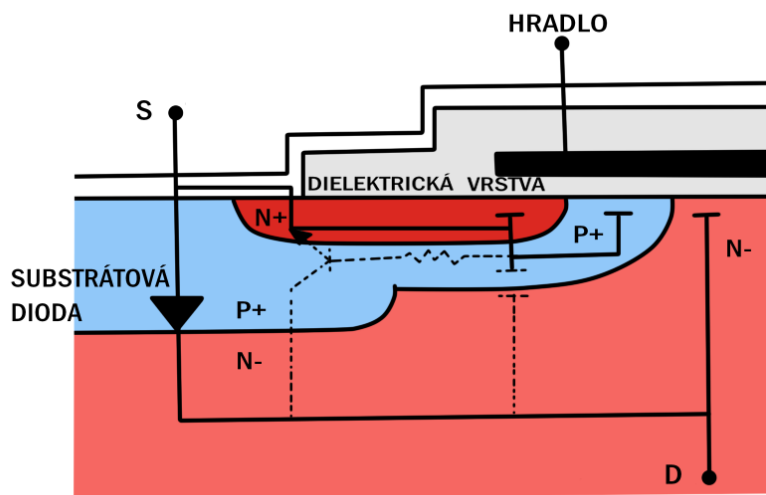
Obrázek 5: Princip funkce MOSFET s indukovaným kanálem

Naopak v tranzistoru s vodivým kanálem při nulovém napětí U_{GS} již existuje vodivý kanál, připojení záporného napětí na řídicí elektrodu způsobí odpuzení nosičů náboje z oblasti kanálu, a tím zaškrcení protékající proudu.



Obrázek 6: princip funkce MOSFET tranzistoru s vodivým kanálem

Pro detekci a testování funkce MOSFET tranzistoru je podstatné, že tranzistory vždy obsahují "parazitní" diodu mezi elektrodami drain a source. Tranzistor obsahuje 2 PN přechody mezi source elektrodou a substrátem a mezi drain elektrodou a substrátem. Aby tyto PN přechody nemohly fungovat jako parazitní bipolární tranzistor, je substrát vodivě spojen s source elektrodou. To zaručuje zkratování báze a emitoru parazitního bipolárního tranzistoru, který tak zůstává uzavřený. [citováno z 10]



Obrázek 7:Parazitní bipolární tranzistor ve struktuře unipolárního tranzistoru

Z hlediska testování funkčnosti je účelné MOSFET tranzistory rozdělit na:

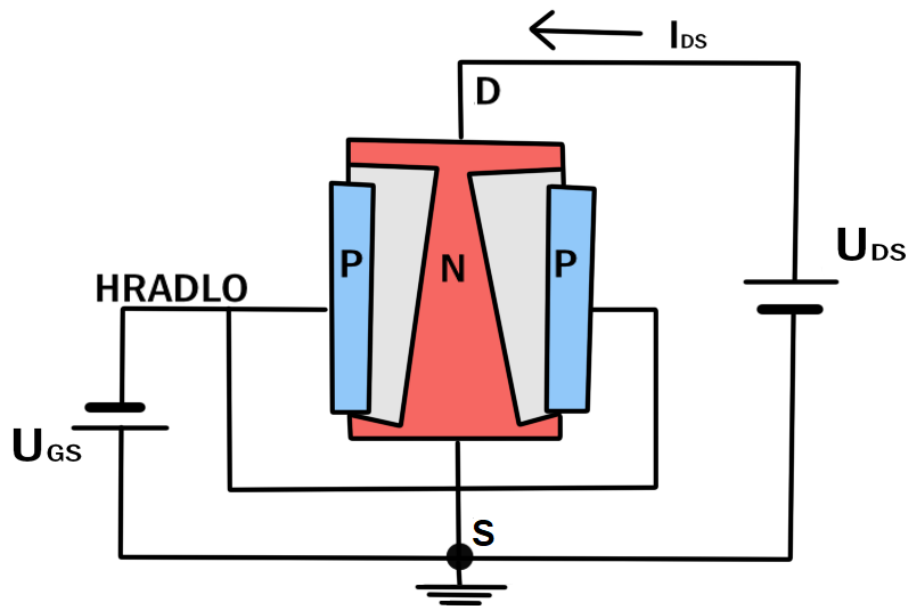
- Vodivost N s indukovaným kanálem
- Vodivost N s vodivým kanálem
- Vodivost P s indukovaným kanálem
- Vodivost P s vodivým kanálem

Dále se tranzistory MOSFET dělí na mnoho různých podtypů dle použitých materiálů a geometrie struktury, které ovlivňují podstatným způsobem parametry tranzistoru (maximální proud, strmota, odpor kanálu v sepnutém stavu, maximální frekvence a podobně), ovšem z pohledu základního testování funkčnosti tranzistoru nemají podstatný vliv.

2.2.2 Tranzistory JFET

Tranzistor JFET nemá izolované hradlo, ale oddělení hradla a vodivého kanálu je realizováno PN přechodem v závěrném směru. Z hlediska vnější funkce se chová podobně jako MOSFET s vodivým kanálem.

Při zvyšování záporného napětí na PN přechodu mezi hradlem a source elektrodou, dochází k rozšiřování depletiční oblasti tohoto PN přechodu, rozšiřování depletiční oblasti snižuje průřez vodivého kanálu, zvyšuje tím jeho odpor a tranzistor se uzavírá.



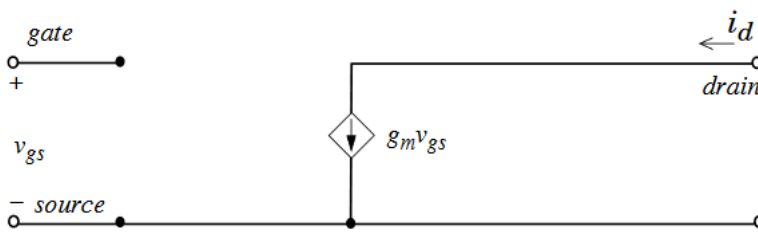
Obrázek 8: Princip funkce tranzistoru JFET

2.2.3 Model funkce unipolárního tranzistoru v obvodu

Nejjednodušší malosignálový model funkce unipolárního tranzistoru je zdroj proudu řízený napětím. U tohoto modelu se předpokládá, že tranzistor je v režimu saturace a budící signál je malý a nezpůsobí významný posun pracovního bodu. Proud procházející elektrodami drain a source je u tohoto modelu závislý pouze na napětí U_{GS} a traskonduktanci dle rovnice 2.6

$$I_D = U_{GS} \cdot g_m \quad (2.6)$$

Tento zjednodušený model také zanedbává vliv změny napětí U_{DS} na přenos tranzistoru. U pokročilejších obvodových modelů je tento vliv charakterizován pomocí výstupní vodivosti. Parazitní proud procházející skrz izolační vrstvu hradla je také zanedbán.



Obrázek 9: Malosignálový model funkce unipolárního tranzistoru

2.2.4 Měřitelné parametry unipolárních tranzistorů

Mezi typické parametry unipolárních tranzistorů, které lze zjišťovat nedestruktivními metodami měření, patří transkonduktance, prahové napětí V_{TH} , odpor kanálu v sepnutém stavu $R_{DS(on)}$, kapacita hradla C_{GS} a únikový proud hradlem I_{GS} .

V následujících odstavcích je stručně popsána metodika měření těchto parametrů, případně jakým způsobem budou pomocí navrhovaného testeru tranzistorů měřeny.

Prahové napětí - Tento parametr označovaný v katalogových listech jako V_{Th} nebo $V_{GS(Th)}$ udává minimální napětí na hradle, při kterém je umožněn průchod proudu mezi elektrodami drain a source. Měření prahové napětí obvykle probíhá za podmínky stejného napětí mezi elektrodami drain a source jako je napětí mezi hradlem a source. Jako prahové napětí některé zdroje [12] uvádějí napětí, při kterém protéká tranzistorem proud $I_D=3 \cdot I_S$, kde I_S je specifický proud závislý na výrobní technologii a rozměrech hradla, jiné zdroje [11] uvádějí jako doporučený testovací proud $250\mu A$. Navrhovaný tester bude měřit prahové napětí při testovacím proudu $250\mu A$, případně bude možné odečíst hodnotu při jiném proudu z grafu závislosti protékajícího proudu na napětí hradla.

Transkonduktance - Dopředná transkonduktance g_m je parametr udávající signálový zisk (zesílení) při provozu tranzistoru v lineární oblasti. Vyjadřuje poměr mezi změnou proudu kanálem a změnou napětí na hradle tranzistoru. Pro funkci v lineární oblasti lze použít zjednodušený vzorec 2.7

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \quad (2.7)$$

Měření transkonduktance se doporučuje provádět při nízkém proudu tranzistorem a po krátkou dobu, aby se předešlo ohřevu tranzistoru, a tím zkreslení měření.

Odpor kanálu v sepnutém stavu - Odpor vodivého kanálu $R_{DS(on)}$ mezi elektrodami drain a source způsobuje při průchodu úbytek napětí, a tím výkonovou ztrátu, která způsobuje zahřívání tranzistoru. Velikost odporu kanálu je závislá na konstrukci tranzistoru, teplotě a napětí přivedeném na hradlo. Vyšší napětí na hradle vyvolá silnější elektrické pole, které přitáhne do oblasti kanálu více nosičů a odpor kanálu klesá. U výkonových tranzistorů může být odpor kanálu v sepnutém stavu i menší než $1m\Omega$. Měření u výkonových tranzistorů se provádí obvykle při proudu $0,5A$ až $10A$ a napětí na hradle $10V$ až $15V$. Vzhledem ke skutečnosti, že navrhovaný tester bude omezen napájením z USB ($500mA$ při $5V$), bylo nezbytné tester doplnit o zvyšující měnič napětí a výkonové budící obvody, což by si vyžádalo značné zvýšení složitosti a ceny výsledného řešení. Funkce měření odporu kanálu v sepnutém stavu nebude testerem podporována.

Kapacita hradla - Vodivý kanál unipolárního tranzistoru a hradlo oddělené velmi tenkou vrstvou oxidu křemíku, vytvářejí nežádoucí parazitní kapacity. Z těchto kapacit je, pro potřeby návrhu budícího obvodu či výběru vhodného tranzistoru, nejdůležitější kapacita mezi hradlem a drain elektrodou označovaná C_{GS} a kapacita C_{GD} označovaná také jako Millerova kapacita. Při každé

změně napětí na hradle musí budící obvod přivést nebo odvést náboj potřebný ke změně napětí na tomto kondenzátoru, což limituje maximální použitelnou frekvenci a vytváří požadavky na proudovou zatížitelnost budiče. Kapacita C_{GS} se u běžně používaných tranzistorů pohybuje od stovek pF do jednotek nF. Pro měření kapacity bude tester využívat metodu nabíjení kondenzátoru přes rezistor známé hodnoty.

Únikový proud hradlem - Ve statickém režimu je proud I_{GS} procházející izolační vrstvou mezi hradlem a vodivým kanálem velmi nízký, typicky méně než 100nA. Takto nízký proud je pod rozlišovací schopností navrhovaného testeru. Výrazně větší únikový proud značí průraz izolační vrstvy hradla a taková porucha bude detekovatelná.

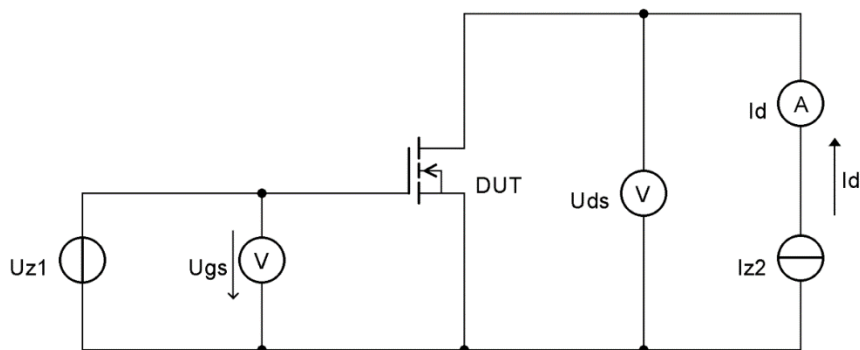
2.2.5 Poruchy unipolárních tranzistorů

Častou příčinou zničení unipolárních tranzistorů je průraz izolační vrstvy mezi hradlem a vodivým kanálem. Tloušťka izolační vrstvy tvořená oxidem křemíku je typicky v jednotkách nanometrů, proto i napětí několika voltů vytváří intenzitu elektrického pole v řádech MV/m. Průraz může být způsoben přechodovým dějem při použití nevhodného budiče nebo absenci ochranných obvodů, případně vybitím elektrostatického náboje, ke kterému může dojít při nevhodné manipulaci a nedodržením zásad práce s elektrostaticky citlivými komponenty.

Dalšími poškozeními specifickými pro unipolární tranzistory je přerušení nebo průraz substrátové diody, případně u JFET tranzistorů poškození PN přechodu hradla. Podobně jako u bipolárních tranzistorů, může dojít k tepelnému poškození při nadměrném výkonovém namáhání.

2.2.6 Měřicí zapojení pro měření bipolárních tranzistorů

Pro měření unipolárních tranzistorů nelze použít stejné měřicí zapojení jako u bipolárních tranzistorů. Nastavitelný proudový zdroj, který řídí proud do báze tranzistoru, je třeba nahradit nastavitelným napěťovým zdrojem. Měřicí zapojení pro unipolární tranzistor je znázorněno na obrázku č. 10.



Obrázek 10: Měřicí zapojení pro unipolární tranzistor

3 MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VELIČIN

Měření elektrických veličin je proces, při kterém se s využitím vhodných měřicích přístrojů zjišťují hodnoty elektrického napětí, proudu či jiné fyzikální veličiny v měřeném obvodu. Vědní obor zabývající se měřením a měřicími postupy pro zjišťování různých, nejen elektrických fyzikálních veličin, se nazývá metrologie. Metrologie také definuje matematické postupy pro odhad nejistoty měření, odchylek měření a postupy ověřování a kalibrace měřicích přístrojů.

Metody pro měření elektrických veličin dělíme na přímé a nepřímé. Přímá měřicí metoda je taková, kdy použitý měřicí přístroj přímo převádí hodnotu měřené veličiny (například napětí) na pozorovatelnou změnu (například výchylka indikátoru na měřicím přístroji).

3.1 Přímé a nepřímé metody měření elektrických veličin

Při využití nepřímé měřicí metody nelze měřený výsledek přímo odečíst z měřicího přístroje. Při nepřímém měření je měřicím přístrojem měřena jiná elektrická veličina nebo veličiny a poté je pomocí předem známých rovnic vypočítána hodnota neznámé veličiny. Například při měření napětí a proudu protékajícího rezistorem, lze pomocí Ohmova zákona vypočítat hodnotu elektrického odporu tohoto rezistoru.

Podobným způsobem je možné pomocí Ohmova zákona vypočítat hodnotu proudu ze změřené hodnoty napětí a známého odporu. Další nepřímou metodou měření, která je využita v realizaci této diplomové práce, je měření proudového zesilovacího činitele tranzistoru. Ze změřených proudů I_B a I_C je vypočítán proudový zesilovací činitel β podle rovnice (2.3).

Kapacita je další veličinou, která bude v této práci měřena pomocí nepřímé metody. Kondenzátor o neznámé kapacitě je nabíjen přes rezistor se známou hodnotou. Napětí na kondenzátoru v průběhu tohoto přechodového děje lze popsat rovnicí:

$$U_C = U_0 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}}\right) \quad (3.1)$$

Kde U_0 je napětí zdroje, R je hodnota rezistoru a U_C je okamžité napětí na kondenzátoru v čase t od počátku nabíjení. Úpravou lze získat rovnici pro výpočet neznámé kapacity ze známých ostatních veličin:

$$C = \frac{-t}{R \cdot \left(1 - \frac{U_C}{U_0}\right)} \quad (3.2)$$

3.2 Odchylyky měření

Odchyłka měření vyjadřuje rozdíl mezi konvenčně pravou hodnotou měřené veličiny a hodnotou změřenou měřicím přístrojem. Odchylyky měření lze rozdělit na systematické odchylyky a nahodilé odchylyky.

Nahodilé odchylyky mají různé příčiny vzniku a při opakovaném měření se projevují různě a jejich velikost se mění. U nahodilých odchylek nelze deterministicky definovat jejich velikost, proto je nelze korigovat. Velikost nahodilých odchylek lze odhadovat pomocí statistických metod.

Systematické odchylyky se naopak projevují při každém opakování stejně. Princip jejich vzniku je známý a je možné na základě parametrů okolí deterministicky stanovit jejich velikost, případně velikost systematické odchylyky stanovit měřením stejného jevu pomocí přesnějšího, kalibračního měřicího přístroje. Příkladem systematické odchylyky při měření odporu rezistoru, je odpor kabelů, kterými je rezistor připojen k měřicímu přístroji. Pokud je nám odpor těchto kabelů známý, je možné provést korekci hodnoty odečtené z měřicího přístroje o odpor kabelů a výsledkem se více přiblížit ke konvenčně pravé hodnotě.

Některé odchylyky mají absolutní velikost nebo je jejich velikost závislá na velikosti měřitelného intervalu, například kvantovací chyba AD převodníku. Proto je nezbytné použít vhodný rozsah měřicího přístroje, nebo jinak uzpůsobit podmínky měření, aby byla relativní velikost odchylyky minimalizována.

V průběhu testování prototypu měřiče tranzistorů bylo zjištěno, že parazitní vlastnosti vstupně/výstupních linek mikrokontroleru mají nežádoucí vliv na přesnosti měření, který je nezbytné kompenzovat. Především je to únikový proud linek, které jsou nastaveny jako vstupní, odpor interního polovodičového spínače v sepnutém stavu a parazitní kapacity.

3.3 Analogově-digitální převodníky

Analogově-digitální (dále AD) převodník je zařízení, které převádí analogovou hodnotu napětí nebo proudu do podoby číslcového slova - množiny bitů, která může být dále zpracována digitálním způsobem. Nejvýznamnějším parametrem AD převodníku je počet napěťových úrovní, které dokáže převodník od sebe rozlišit. AD převodníky se obvykle vyrábějí s rozlišením 2^N úrovní, kde N je počet bitů digitálního slova na výstupu převodníku. Čím více napěťových úrovní je schopen rozlišit, tím menší je kvantovací chyba převodu analogové hodnoty na digitální, a také se zvětšuje dynamický rozsah.

Dalšími důležitými parametry, které je třeba zvážit při výběru AD převodníku pro konkrétní aplikaci jsou: rychlost vzorkování, rozsah vstupních napětí a digitální rozhraní.

AD převodníky lze podle principu funkce na několik typů:

- **Paralelní komparační převodníky** – Tento typ převodníku obsahuje 2^N komparátorů a napěťové reference pro 2^N napěťových hladin. Stav výstupů 2^N komparátorů je kódován pomocí N -bitového kódového slova. Tento typ AD převodníku se vyznačuje velmi

vysokou rychlostí vzorkování, převodníky tohoto typu se vyrábějí obvykle jako 6ti až 12-bitové, a uplatnění nalézají především v digitálních osciloskopech a jiných přístrojích pro měření a zpracování rychlých signálů.

- **Převodníky s postupnou aproximací** – Tento typ převodníků obsahuje jeden komparátor a N-bitový DA převodník. Řídící logika převodníků nastavuje na výstupu DA převodníku hodnotu napětí, která je komparátorem porovnávána s neznámým vstupním napětím. Převod probíhá v N krocích, během kterých dochází k postupné aproximaci hodnoty neznámého vstupního napětí.
- **Integrační převodník s dvojí integrací** – Tyto převodníky pracují na principu převodu neznámého napětí na čas, který je měřen digitálním čítačem. Tento typ AD převodníku se využívá obvykle v digitálních multimetrech.
- **Sigma-delta převodníky** – Sigma-delta převodník se skládá z sigma-delta modulátoru a digitální filtru. Sigma-delta převodníky vynikají vysokým rozlišením, běžně dostupné jsou až 24-bitové převodníky. Uplatnění nalézají v měření stejnosměrných signálů a vzorkování audio signálu.

3.4 Digitálně-analogové převodníky

Digitálně-analogový (dále DA) převodník je zařízení, které převádí digitální hodnotu obvykle reprezentovanou v binární podobě jako n bitů na analogovou hodnotu napětí nebo proudu.

Základní typy DA převodníků jsou:

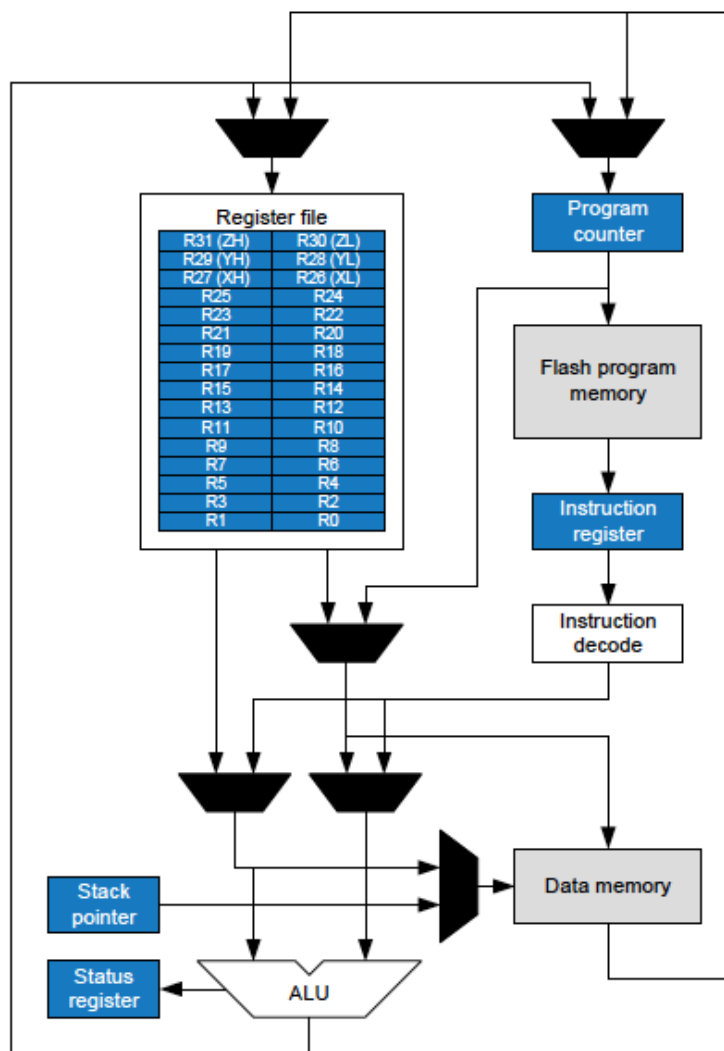
- **Převodníky s rezistorovou sítí** – existují v různých variantách zapojení, R-2R, převodníky s binární rezistorovou sítí (R,2R,4R,8R, ...) a další. Převodníky s rezistorovou sítí obvykle pracují na principu digitálně ovládaných, přepínaných zdrojů proudu. Dle hodnoty vstupního digitálního slova jsou aktivovány zdroje proudu příslušející k jednotlivým bitům (typicky rezistory jsou pomocí polovodičových spínačů připojeny k referenčnímu napětí). Výstup takového DA převodníku je proudový. V případě že jsou dle stavu vstupu jednotlivé váhové rezistory připojovány k referenčnímu napětí nebo k napájecí zemi (případně zápornému referenčnímu napětí), je výstup DA převodníku napěťový. Tato varianta DA převodníků má vysokou výstupní impedanci, v případě požadavku na nízkou výstupní impedanci je nutno doplnit vhodný oddělovací zesilovač.
- **Nepřímé DA převodníky** - využívají mezipřevodu digitální hodnoty na signál s pulzně šířkovou modulací (PWM) o vysoké frekvenci. PWM signál je přiveden na vstup filtru typu dolní propust, kde je nosná frekvence PWM signálu potlačena a na výstup se dostává napětí úměrné střední hodnotě signálu. Dle hodnoty vstupního slova je nastavována střída modulovaného signálu a tím i výstupní napětí

DA převodníky se obvykle vyrábějí v lineárním provedení, kde výstupní hodnota napětí nebo proudu je přímo úměrná vstupní digitální hodnotě. Pro specifické použití existují i DA převodníky s nelineární převodní charakteristikou. Motivací pro použití nelineárních DA převodníků je obvykle snaha o zvětšení dynamického rozsahu při zachování počtu bitů vstupního slova.

4 MIKROKOTROLÉR ATMEGA

Pro realizaci navrhovaného testeru byl zvolen mikrokontrolér ATmega 64A. První prototyp byl otestován na vývojové desce Arduino Mega, která je osazena mikrokontrolérem AtMega 2560. Oba typy mikrokontrolér jsou 8-bitové, vybavené stejným jádrem AVR, liší se pouze velikostí paměti a periferiemi. Jádro AVR je postaveno na architektuře RISC, většina instrukcí je vykonávána v jednom taktu hodinového signálu. Jádro mikrokontroléru může pracovat na frekvenci až 16MHz. Jádro AVR není vybaveno instrukcemi pro práci s čísly v plovoucí řádové čárce. Práce s čísly v plovoucí řádové čárce je v programu samozřejmě možná, ovšem aritmetické operace jsou kompilátorem převedeny na posloupnost instrukcí, které je jádro schopno zpracovat, ovšem za cenu nižší rychlosti zpracování.

Mikrokontrolér je dále vybaven 4kB interní paměti SRAM a 64kB paměti typu flash pro uložení programu (8kB SRAM a 256kB programové flash u AtMega2560). Do pracovního adresního prostoru je mapována vnitřní SRAM paměť, řídicí registry jádra a všech periferií a případně také externí paměť, pokud je připojena.



Obrázek 11: Architektura jádra AVR (převzato [5])

Zápis do paměti programu je možný pomocí ISP nebo JTAG programátoru, případně s využitím bootloaderu. Bootloader je část programu která je uložena v rezervované části paměti programu a je spuštěna po restartu mikrokontroléru. Kód bootloaderu může přepisovat zbylou část programové paměti. Bootloader lze s výhodou využít v aplikacích, kdy je mikrokontrolér propojen s počítačem, jedno komunikační rozhraní může být využito v běžném provozu pro přenos dat a v případě potřeby i pro aktualizaci programu. Pro počáteční zápis bootloaderu je nezbytné použít ISP nebo JTAG programátor. Pro uložení konfigurace lze použít interní paměť typu EEPROM. Obsah této paměti je možné číst i modifikovat v kterékoliv části programu a zůstává nezměněn i při aktualizaci programu v paměti flash. EEPROM paměť lze s výhodou využít pro persistentní uložení dat, specifických pro konkrétní vyrobený kus zařízení a celý obsah paměti flash může být shodný pro všechny kusy s různou konfigurací. Toto umožňuje i snadnější vytváření distribuci aktualizací firmware.

4.1 Periferie mikrokontroléru

Mikrokontrolér je kromě jádra a paměti vybaven řadou periférií, které umožňují provádění přesně časovaných operací a komunikaci s okolím.

Mezi nejdůležitější periferie pro řízení chodu programu patří přerušovací systém. Přerušování umožňuje programu přerušit běh v určitém místě a rychle přejít k obsluze požadavku, který přerušování vyvolal. Přerušování mohou být vyvolána změnou logické úrovně na některém ze vstupně výstupních pinů, časovačem/čítačem nebo některou z komunikačních periférií. Časovače a čítače je také možné využít k přesnému časování operací a měření času s přesností lepší než 1 μ s. Čítače je také možné využít pro generování signálu s pulzně šířkovou modulací nezávisle na jádru mikrokontroléru.

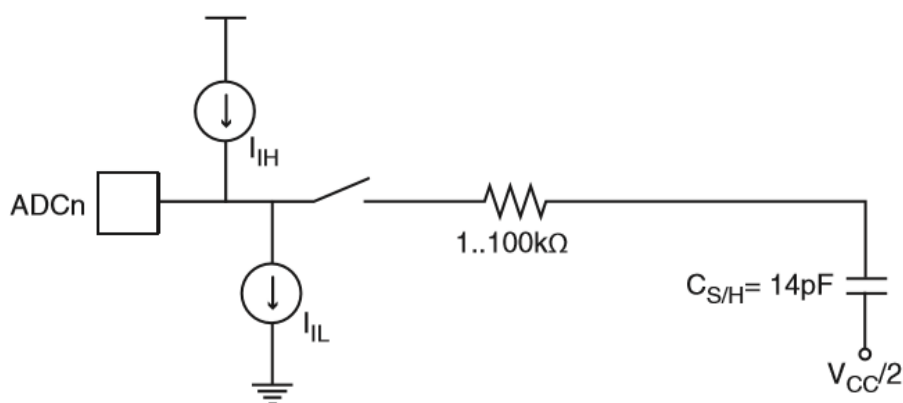
Velmi důležitými perifériemi jsou vstupně výstupní porty (I/O Porty). AtMega 64A je interně vybavena celkem jedenácti 8-bitovými porty ovšem ne všechny porty jsou připojeny na vývody mikrokontroléru. V závislosti na typu pouzdra a počtu jeho vývodů je k dispozici 54 až 84 vstupně výstupních linek.

Každá vstupně výstupní linka může být nastavena jako vstupní nebo výstupní nezávisle na ostatních linkách stejného portu. V případě, že je linka nastavena jako vstupní, je možné volitelně aktivovat pull-up rezistor. Tato možnost je výhodná například pro připojení tlačítek, kdy není nutné doplňovat externí rezistory. V případě, že pull-up rezistor není aktivní, je vstupní port ve stavu vysoké impedance. Dle specifikace výrobce je parazitní únikový proud tekoucí z/do vstupní linky maximálně 1 μ A. Experimentálně bylo ověřeno, že za běžných podmínek je tento proud menší než 100nA.

V případě nastavení linky jako výstupní, může dle specifikace výrobce dodávat proud až 40mA. Pro linky nastavené jako výstupní byla experimentálně zjišťována velikost odporu polovodičového spínače v sepnutém stavu uvnitř budiče portu. Bylo změřeno, že spínače mají

v sepnutém stavu odpor přibližně 23Ω , která se mění v rozsahu $\pm 2\Omega$ v závislosti na napájecím napětí a protékajícím proudu.

Mikrokontrolér je vybaven 10-bitovým analogově digitálním (A/D) převodníkem s postupnou aproximací. Součástí modulu AD převodníku je také multiplexor (přepínací matice) která umožňuje postupné měření analogového napětí až na 16ti vstupech. Pro možnost přepočtu změřené hodnoty A/D převodník na skutečné napětí je integrována napěťová reference. Zapojení vstupní části AD převodníku znázorněno na obrázku 12.



Obrázek 12: Zapojení vzorkovače AD převodníku (převzato z datasheetu)

Aby nedocházelo ke zkreslení měření, je zapotřebí, aby měřený zdroj analogového napětí měl relativně nízkou výstupní impedanci. V opačném případě by docházelo ke zkreslení měřené hodnoty z důvodu úbytku napětí na výstupní impedanci zdroje analogového signálu a napětí na vzorkovacím kondenzátoru by za dobu vzorkování nedosáhlo měřeného napětí.

4.2 Komunikační rozhraní

Mikrokontrolér je vybaven několika komunikačními rozhraními, pro která je implementována hardwarová podpora. Mezi implementovaná rozhraní patří I2C (TWI), SPI a 4 UART kanály.

Vysílání či příjem jednotlivých bitů a časování nástupných a sestupných hran hodinového signálu probíhá bez zásahu jádra mikroprocesoru. Obsluha programem je potřebná teprve ve chvíli, kdy je přijat nebo odeslán celý byte a je nezbytné do potřebného registru vložit další byte k odeslání.

4.2.1 USB rozhraní

Mikrokontrolér AtMega 64 není vybaven hardwarovou podporou pro USB rozhraní. Komunikaci po USB je možné doplnit softwarově. Například knihovnou v-usb [9]. Softwarová implementace je relativně náročná na výpočetní výkon, potřebnou paměť a generuje množství požadavků na obsluhu přerušení. Obsluha přerušení komplikuje interakci s ostatními

periferiemi vyžadujícími přesné časování. Mezi výhody softwarové implementace patří minimální náklady na součástky.

Díky výše uvedeným nevýhodám se softwarová implementace USB rozhraní na mikrokontrolérech AtMega využívá pouze ojediněle a většina konstrukcí je doplněna převodníkem USB–UART ve formě samostatného integrovaného obvodu, který implementuje komunikaci na USB sběrnici a funkcionalitu virtuálního sériového portu hardwarově, případně pomocí mikroprocesoru a uzavřeného firmware, bez možnosti vnějšího zásahu. Operační systém prezentuje programům virtuální sériový port na USB převodníku stejně, jako by šlo fyzický sériový port v PC. Převodníky USB-UART obvykle vytvářejí mezi programem a mikrokontrolérem komunikační kanál, který je zcela transparentní a chování je stejné jako v případě, že by byl mikrokontrolér připojen přes budič sériové linky přímo k sériovému portu počítače. Na straně mikrokontroléru je podpora UART rozhraní implementována hardwarově a komunikace po tomto rozhraní je možná s minimální náročností na systémové zdroje.

4.2.2 I²C rozhraní

I²C rozhraní, označované také jako 2 wire serial interface (dvoudrátové sériové rozhraní) je používáno pro komunikaci mezi integrovanými obvody a moduly uvnitř zařízení. I²C rozhraní je tvořeno sběrnici se dvěma vodiči – hodinový signál a obousměrný datový vodič. Hodinový signál je generován zařízením řídícím komunikaci (master). Ke sběrnici může být připojeno až 127 periferních (slave) zařízení, které jsou odlišeny svojí adresou. Některé typy periferních zařízení typicky integrovaných obvodů nebo displejů mají adresu pevně nastavenou a není možné připojit k sběrnici více než jedno zařízení stejného typu. Jiné integrované obvody jsou vybaveny logickým vstupem nebo vstupy, které umožní nastavit jeden nebo několik nejnižších bitů adresy zařízení, takových periférií je možné k jedné sběrnici připojit více současně podle toho, kolik je možné nastavit unikátních adres. Typicky používaná rychlost pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a periferiemi je 100kbit/s případně 400kbit/s. AtMega má implementovanou hardwarovou podporu pro tuto sběrnici a může vykonávat jak funkci periferního zařízení (slave), tak i funkci zařízení řídícího komunikaci (master).

5 NÁVRH ZAPOJENÍ TESTERU TRANZISTORŮ

Při návrhu testeru bylo zapotřebí respektovat několik podmínek, které vyplývají ze zadání, těmi jsou napájení testeru z USB rozhraní počítače (dle definice USB normy 4,45 – 5,25V, max. 500mA) a funkce automatické detekce zapojení vývodů testovaného tranzistoru. Dále je návrh přizpůsoben určení zařízení, které je cíleno spíše do domácí nebo školní dílny, nikoliv jako vysoce přesný laboratorní měřicí přístroj. Proto byl návrh uzpůsoben pro jednoduchou vyrobiteľnost zařízení v amatérských podmínkách, dostupnost použitých komponent v kusovém množství a nízkou cenu.

Pro měření parametrů bipolárních tranzistorů jsou zapotřebí 2 proměnné proudové zdroje. První proudový zdroj, pro obvod kolektoru s větším maximálním výstupním proudem (alespoň desítky mA) a druhý proudový zdroj, pro řízení proudu do báze, kde je naopak zapotřebí co nejmenšího kroku regulace proudu. Poměr minimálního výstupního proudu zdroje pro bázi a maximálního výstupního proudu zdroje pro kolektor definuje měřitelný rozsah proudového zesílení. Jako minimální rozsah pro měření proudového zesílení bylo zvoleno 0 až 1000, tak aby měřič umožňoval ověření správné funkce výkonových tranzistorů s vnitřním zapojením typu darlington, u kterých dosahuje činitel proudového zesílení typicky hodnoty 600 až 1000. Výstup těchto proudových zdrojů nemusí být regulovatelný spojitě, ale je nezbytné, aby byl přepínatelný v dostatečném počtu úrovní pro nastavení vhodného pracovního bodu.

Pro měření vlastností unipolárních tranzistorů je zapotřebí jeden proměnný proudový zdroj pro obvod kolektoru, a jeden napěťový zdroj pro nastavení napětí na hradle unipolárního tranzistoru. Rozsah napětí $U_{GS} = 0$ až 4,5V je dostatečný pro ověření funkce valné většiny typů unipolárních tranzistorů. Požadavky kladené na zdroj proudu pro obvod kolektoru jsou stejné jako při měření bipolárního tranzistoru.

V první fázi návrhu byla zvažována konstrukce napěťového a dvou proudových zdrojů a přepínací matice, která by umožnila připojení libovolného zdroje ke kterémukoliv měřicímu kanálu. Analyzoval jsem dostupná řešení, a žádné z nich nebylo optimální pro dosažení cíle v daných podmínkách.

V profesionálních měřicích přístrojích je obvyklé, že přepínací matice, případně přepínání rozsahů, je realizováno elektromechanickými relé. Mezi výhody relé patří velmi nízký odpor sepnutých kontaktů. Naopak nevýhodami jsou velké rozměry, pomalé spínání a vysoká cena řešení. Pro požadovanou přepínací matici by bylo zapotřebí nejméně 9 kusů přepínacích relé.

Druhou zvažovanou variantou realizace přepínací matice bylo nahrazení elektromechanických relé pomocí polovodičových spínačů, které mají kompaktnější rozměry, a nižší cenu. Velkou nevýhodou polovodičových spínačů je odpor sepnutého kanálu, především při použití řídicího nebo napájecího napětí pouze 5V. Dosažení nižšího odporu sepnutého kanálu je možné při použití vyššího ovládacího napětí, nicméně to by si vyžádalo přidání zvyšujícího měniče napětí pro napájení polovodičového spínacího prvku, důkladnou filtraci napájení, aby nedocházelo k přenosu rušení z tohoto měniče napětí do měřeného obvodu a

také vhodné převodníky úrovní aby bylo možné výstupy z mikrokontroléru ovládat polovodičové spínače vyšším napětím z výstupu měniče.

Protože nebylo nalezeno obvodově jednoduché a cenově přijatelné řešení přepínací matice, postupoval jsem dále v návrhu směrem k univerzálním měřicím kanálům, které budou schopny zastat kteroukoliv potřebnou funkci (proudový zdroj, proudová nora, napěťový zdroj, připojení ke kladné nebo záporné větvi napájení). Inspirací pro využití digitálně analogový převodníků s binárně váhovými rezistory k realizaci proudového i napěťového zdroje, schématu zapojení měřiče volt-ampérové charakteristiky diod, kde byl tímto způsobem realizován nastavitelný proudový zdroj. K vstupně výstupnímu portu mikrokontroléru jsou připojeny různé rezistory, dle nastavení jednotlivých linek jako vstupní nebo výstupní s nízkou nebo vysokou logickou úrovní je možno přepínat mezi těmito režimy funkce:

- **Napěťový zdroj** – všechny linky jsou nastaveny jako výstupní, dle digitální vstupní hodnoty jsou přepínány mezi nízkou úrovní (0V) a vysokou úrovní (5V).
- **Proudový zdroj** – vstupně výstupní linky jsou přepínány mezi stavy vstup s vysokou impedancí nebo výstup ve vysoké logické úrovni (5V). V závislosti na kombinaci rezistorů připojených k aktivním výstupům je realizována funkce proměnného odporu mezi měřicím kanálem a kladnou napájecí větví. Při měření tranzistorů s polaritou NPN lze tento režim jako nastavitelný proudový zdroj.
- **Proudová nora** – vstupně výstupní linky jsou přepínány mezi stavy vstup s vysokou impedancí nebo výstup v nízké logické úrovni (0V). Při měření tranzistorů s polaritou PNP lze tento režim jako nastavitelný proudový zdroj.
- **Připojení k napájecímu napětí** – jedna vstupně výstupní linka je připojena přímo k měřicímu kanálu bez rezistoru. v případě jejího nastavení jako výstupní, je možno měřicí kanál připojit ke kladnému napájecímu napětí nebo napájecí zemi.

Výhodou těchto unifikovaných měřicích kanálů je větší flexibilita, kdy mohou být pouhou úpravou software doplněny nové funkce. Dle konfigurace jsou k dispozici až 3 napěťové zdroje nebo až 3 proudové zdroje s identickými parametry. Mezi nevýhody unifikovaných měřicích kanálů patří:

- Vyšší výstupní impedance v režimu napěťového zdroje ve srovnání s realizací napěťového zdroje specifickým obvodem, který je obvykle vybaven vhodným budičem výstupů.
- Menší dynamický rozsah ve srovnání s dvěma specifickými proudovými zdroji, kde každý z nich disponuje jiným rozsahem výstupního proudu dle potřebné funkce.

Z výše popsaných požadavků vyplývá, že dosažení lineární převodní charakteristiky u digitálně analogového převodníku v tomto použití není nezbytné, naopak žádoucí je co největší dynamický rozsah výstupu DA převodníku. Také z důvodu nedostupnosti řady rezistorů v hodnotách R, 2R, 4R, 8R, 16R... pro 12-bitový DA převodník, byla navržena převodní charakteristika jako nelineární. V DA převodníku jsou využity běžně dostupné hodnoty rezistorů z řady 220Ω, 470Ω, 1kΩ, 2,2kΩ, ... ,1MΩ. Digitálně analogový převodník disponuje rozsahem

výstupního proudu 0 až 42,6mA při napájecím napětím 5V. Proud je možné nastavit v 4096 úrovních, nejmenší možný krok je 5μA. Obdobně při režimu napěťového zdroje je možné výstupní napětí nastavit v 4096 úrovních v rozsahu výstupního napětí 0 až 5V, s nejmenším možným krokem 0,58mV. V režimu proudového zdroje lze převodní charakteristiku mezi vstupním slovem a výstupním proudem vyjádřit pomocí rovnice, kde U_{REF} je hodnota referenčního napětí, b_n je hodnota n-tého bitu vstupního slova a R_n je hodnota n-tého váhové rezistoru.

$$I = U_{REF} \cdot \sum \frac{b_n}{R_n} \quad (5.1)$$

Výstupní napětí v režimu napěťového zdroje lze vyjádřit dle rovnice pro výpočet napětí na nezátíženém odporovém děliči:

$$U = U_{REF} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_H} \quad (5.2)$$

Kde hodnoty rezistorů R_L a R_H jsou závislé na vstupním datovém slově dle rovnic:

$$R_H = \frac{1}{\sum \frac{b_n}{R_n}} \quad (5.3)$$

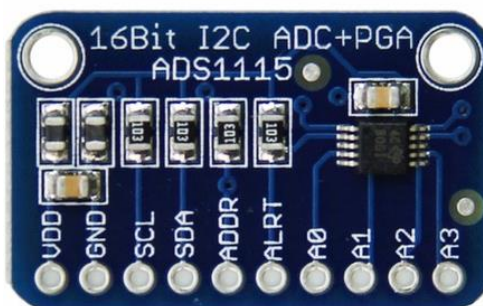
a

$$R_L = \frac{1}{\sum \frac{(1-b_n)}{R_n}} \quad (5.4)$$

Další částí řešení je měření analogového napětí a proudu. Využití analogově digitálního převodníku v mikrokontroléru AtMega je problematické z důvodu jejich nízké vstupní impedance. Impedanční oddělení by bylo realizovatelné pomocí operačního zesilovače v zapojení napěťového sledovače. Pro výběr operačního zesilovače je v tomto případě značně omezující nízké napájecí napětí (5V) a potřeba zpracování signálů od 0V do úrovně kladného napájecího napětí. Tyto požadavky by splnil operační zesilovač typu Rail-to-Rail. Z důvodu vyšší ceny těchto operačních zesilovačů, jsem se rozhodl pro řešení problému pomocí externího AD převodníku, který je vybaven vstupy s vyšší impedancí.

Vybraný AD převodník Texas Instruments ADS1115 je 16-bitový převodník disponující 4mi vstupy a vstupním zesilovačem s nastavitelným ziskem. Vstupní impedance AD převodníku je dle specifikace výrobce 10MΩ. AD převodník pracuje na principu sigma-delta a jeho maximální vzorkovací frekvence je 860 vzorků/s, což je pro potřeby měření dostatečné. AD převodník komunikuje s mikrokontrolérem přes I2C sběrnici a je také vybaven interním zdrojem přesného referenčního napětí. Při nastavení vhodného rozsahu vstupního napětí tzn. ±6,144V, je kvantovací krok 0,185mV. Převodník je dodáván v pouzdru pro povrchovou montáž VSSOP10 s roztečí vývodů 0,5mm. Důležitým kritériem pro výběr tohoto AD převodníku byla nízká cena a také dostupnost v podobě modulu jako je na obrázku 13. Rozteč vývodů 0,5mm vyžaduje

vysokou přesností při výrobě plošného spoje a následném ručním osazení. Dostupnost hotového modulu s roztečí vývodů 2,5mm usnadňuje výrobu testeru v domácích podmínkách.



Obrázek 13: modul s AD převodníkem ADS1115

AD převodník umožňuje jednorázová měření, která jsou spouštěna příkazem po I2C sběrnici nebo režim průběžného měření, kdy probíhá měření na jednom vybraném vstupu opakovaně v pravidelných časových intervalech. Přepínání mezi režimy je možné pouze nastavením hodnoty v konfiguračním registru přístupném přes I2C. Při dokončení převodu analogové hodnoty je výsledek uložen ve výstupním registru a dokončení měření je nadřazenému mikrokontroleru signalizováno změnou logické úrovně na ALRT výstupu. ALRT výstup je připojen na vstup mikrokontroleru s podporou funkce přerušování. Obslužná funkce přerušování zajišťuje synchronizovanou změnu stavu výstupních linek a přesné měření času který uplynul mezi jednotlivými měřeními. Přesné měření času je nezbytné pro měření kapacity nepřímou metodou popsanou v kapitole 3.

V případě nastavení DA převodníku do režimu proudového zdroje je měření výstupního proudu realizováno nepřímou metodou jako měření úbytku napětí na známém rezistoru. Pro výpočet protékajícího proudu je nutné znát přesné hodnoty váhových rezistorů. Použití AD převodníku s 16-bitovým rozlišením také umožňuje základní funkci auto-kalibrace. Po připojení kalibračního rezistoru s přesně známou hodnotou je možné poměrovou metodou určit odpor všech váhových rezistorů v DA převodníků a následně tyto hodnoty použít tyto korigované hodnoty pro přesnější výpočet protékajícího proudu.

Komunikace s PC po sběrnici USB je realizována přes převodník USB na sériový port. Nejčastěji používanými integrovanými obvody pro tento účel jsou Prolific PL2302, FTDI 232RL a Silicon Labs CP2012. Z důvodu spolehlivosti, nízkého počtu externích součástek a dostupnosti v kusovém množství byl vybrán FTDI 232RL. Tento integrovaný obvod obsahuje integrovaný oscilátor i zakončovací rezistory pro impedanční přizpůsobení USB sběrnice. Pro jeho správnou funkci je zapotřebí pouze několik externích kondenzátorů, což zjednodušuje návrh plošného spoje. Pro usnadnění aktualizace firmware je výstupní linka sériového portu DTR spojena s resetovacím vstupem mikrokontroléru. PC v případě potřeby může vyvolat reset, a tím spustit bootloader. To umožňuje vynechání fyzického tlačítka pro reset. USB převodník FTDI 232RL

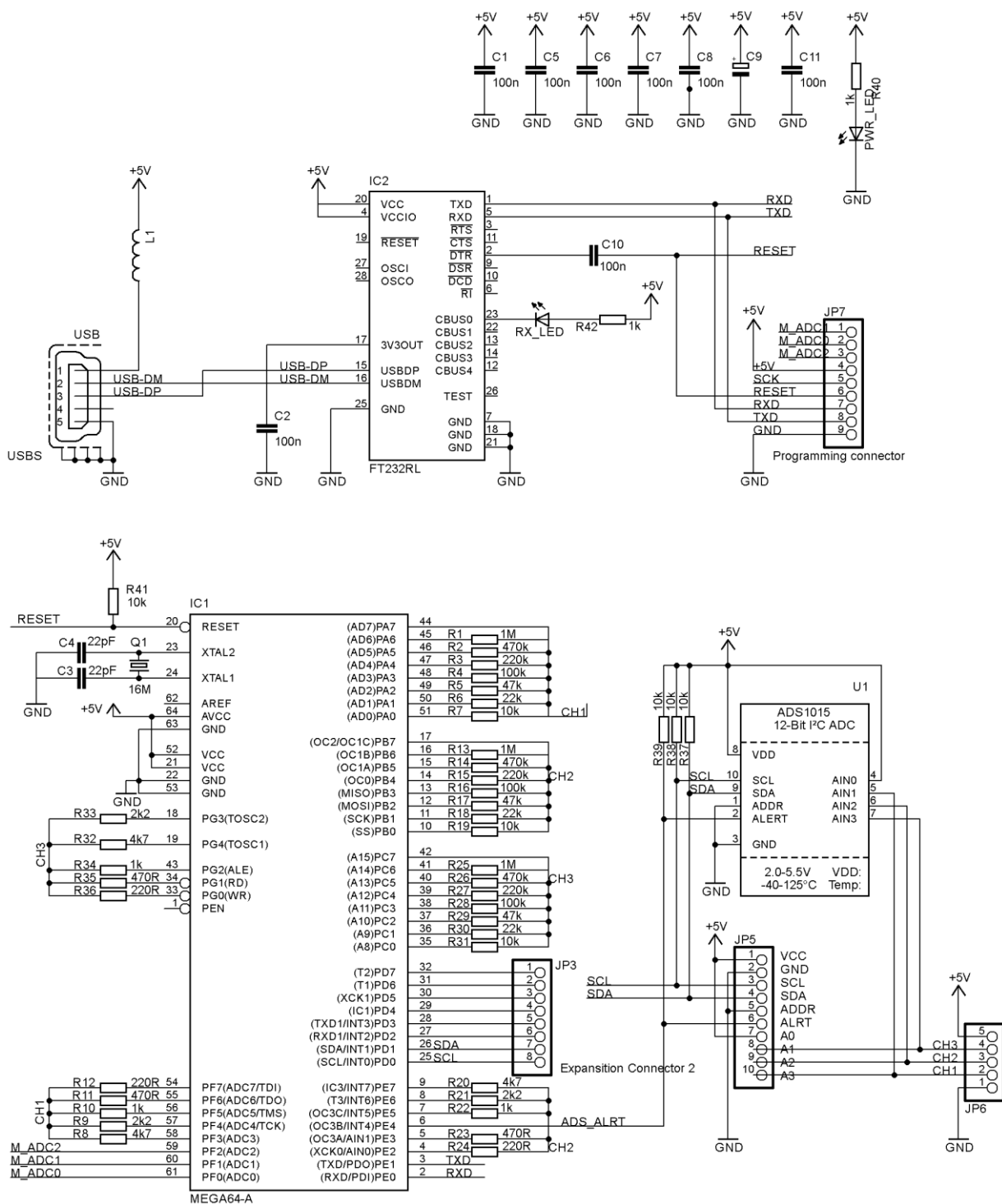
podporuje všechny standartní i nestandardní přenosové rychlosti v rozsahu 183baud až 3Mbaud ^[14]. Použitelné nestandardní přenosové rychlosti lze vypočítat dle vzorce:

$$BaudRate = \frac{3000000}{(N/8)} \quad (5.5)$$

Kde N je libovolné celé číslo v rozsahu 8 až 2¹⁷. Nastavení přenosové rychlosti je flexibilnější než u mikrokontroléru AVR a nastavením nestandardní komunikační rychlosti, lze kompenzovat odchylku přenosové rychlosti, způsobenou neceločíselným poměrem frekvencí oscilátoru mikrokontroléru a přenosové rychlosti.

Zdrojem taktovacího signálu pro mikrokontrolér je externí krystal. Použití interního RC oscilátoru by nebylo v tomto případě vhodné. Frekvence interního RC oscilátoru vykazuje závislost na napájecím napětí, které nemusí být konstantní, a může se pohybovat v toleranci definované USB normou. Odchylka frekvence oscilátoru by měla za následek nepřesné měření času, a tedy nízkou přesnost měření kapacit. V případě větší odchylky frekvence by došlo k chybám v komunikaci po sériovém portu. Krystal s frekvencí 16MHz byl vybrán pro zajištění bezproblémové kompatibility s knihovnou MegaCore a případnými dalšími částmi programu, kde je kód citlivý na časování přizpůsoben frekvenci 16MHz, která je použita na standartních Arduino deskách.

5.1 Schéma zapojení



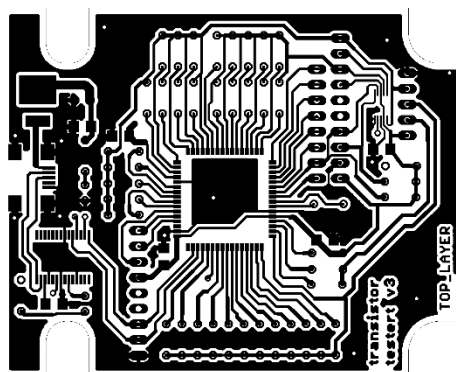
Obrázek 14: Schéma zapojení prototypu

5.2 Návrh desky plošného spoje

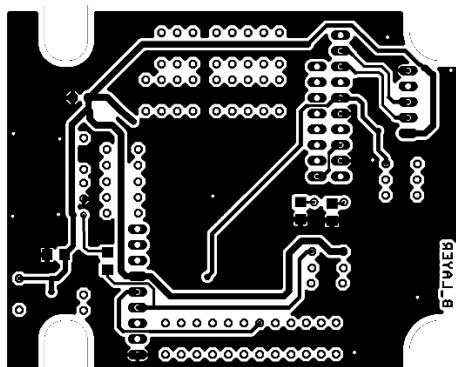
Při přípravě prvního prototypu byla navržena deska plošných spojů, která je rozšířením pro Arduino Mega 2560 R3. Tato deska je jednostranná a obsahuje pouze rezistory DA převodníku a modul AD převodníku. Tato varianta by mohla být použita při výrobě cenově optimalizované verze měřiče tranzistorů pro občasné použití. Výkres této desky je součástí přílohy.

Finální verze desky plošných spojů, na rozdíl od prototypu, je dvoustranná a obsahuje i mikroprocesor a obvody USB rozhraní. Rozměry desky jsou přizpůsobeny dostupné plastové krabičce. Deska plošného spoje je navržena pro použití jak vývodových součástek, tak i součástek pro povrchovou montáž (dále SMD). Mikroprocesor a další integrované obvody jsou dostupné pouze v SMD pouzdrech. Nevyužité vstupně výstupní linky mikroprocesoru jsou vyvedeny na konektory a lze je využít pro případné budoucí rozšíření.

Nevyužité vstupně/výstupní linky mikrokontroléru jsou připojeny k jednořadým konektorům pro případné budoucí rozšíření. Výkres plošného spoje je v měřítku 1:1 na obrázcích 15 a 16. Kompletní podklady pro výrobu plošného spoje ve formátu pro CAD software Eagle jsou součástí přílohy.



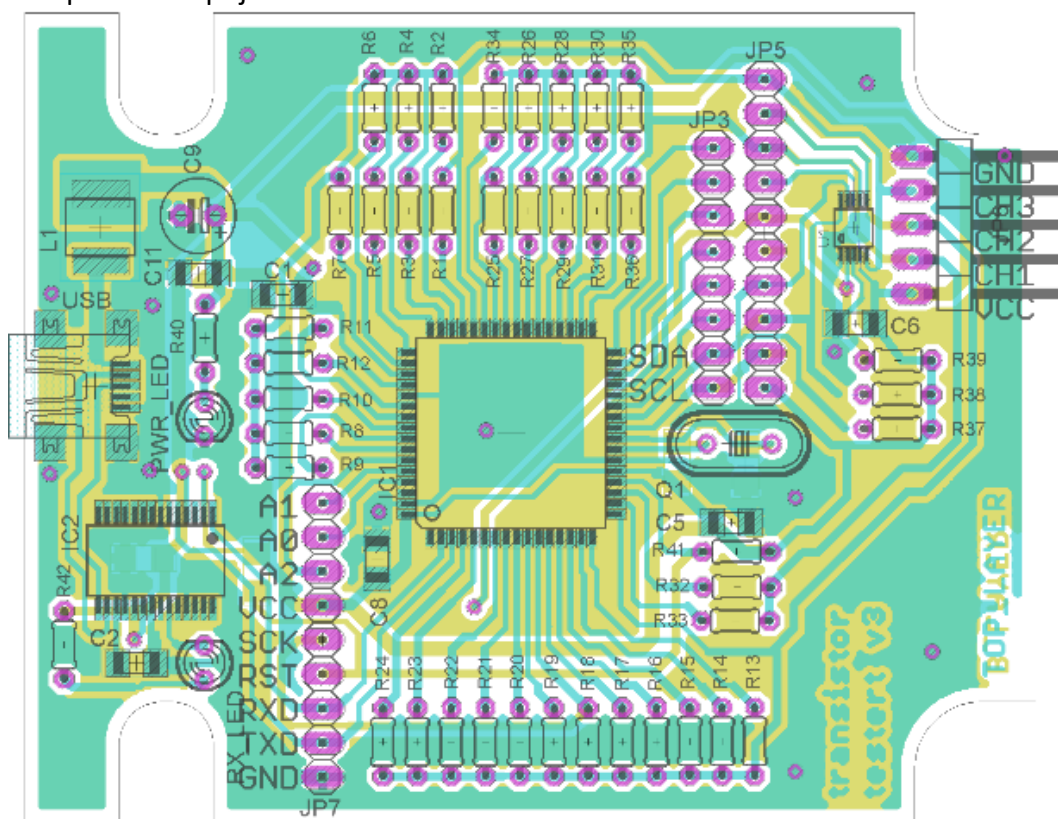
Obrázek 15: Výkres desky plošného spoje: horní vrstva



Obrázek 16: Výkres desky plošného spoje: spodní vrstva

Vzhledem k malé rozteči vývodů u pouzder použitých integrovaných obvodů je vhodné, aby plošný spoj byl opatřen nepájivou maskou. Prokovení otvorů na desce plošných spojů není nezbytné, vývodové součástky je v tomto případě zapotřebí připájet na obou stranách plošného spoje. Propojení zemnicí plochy mezi horní a spodní stranou desky je vhodné realizovat ve více místech pro snížení impedance zemní smyčky. Kondenzátory pro filtraci napájecího napětí jsou

umístěny co nejbližně integrovaným obvodům, z nedostatku prostoru na vhodných místech jsou použity kondenzátory v provedení pro povrchovou montáž. Taktéž kondenzátory potřebné pro správnou funkci krystalového oscilátoru jsou umístěny v jeho těsné blízkosti tak, aby byla minimalizována možnost vyzařování nežádoucích rušivých signálů. Prvních 6 pinů konektoru JP7 slouží jako programovací konektor pro počáteční naprogramování bootloaderu. Zbylá část konektoru JP7 a konektor JP3 slouží pro případná budoucí rozšíření. Na konektor JP3 je také vyvedena I2C sběrnice kterou by bylo možné využít například pro připojení displeje. Konektor JP5 je připraven pro osazení modulu AD převodníku, v případě, že AD převodník není osazen přímo na hlavní desce plošného spoje. Osazení konektorů, které nebudou využity je možné vynechat z důvodů zvýšení odolnosti proti elektromagnetickému rušení. Rozmístění součástek na desce plošného spoje



Obrázek 17: Osazovací plán desky plošného spoje

Testovací patice není umístěna přímo na hlavní desce plošného spoje, ale je připojena ke konektoru na jejím okraji. V případě potřeby je možné testovací patici s hlavní deskou propojit kabelem, a tím usnadnit montáž do libovolné krabičky větších rozměrů nebo jiného tvaru. V případě, že není možné vývody testovaného tranzistoru zasunout do testovací patice, jako například tranzistory v pouzdru TO3 nebo pouzdra pro povrchovou montáž, je možné propojit testovaný tranzistor s měřičem vhodnými kabely bez použití testovací patice.

6 FIRMWARE MIKROKONTROLÉRU

Firmware mikrokontroléru je napsán v jazyce C++ a vytvořen ve vývojovém prostředí Arduino. Vývojové prostředí Arduino a jeho podpůrné knihovny nejsou v základní verzi kompatibilní s vybraným mikrokontrolérem AtMega64. Díky modulárnosti vývojového prostředí Arduino je možné instalací doplňkových balíčků přidat kompatibilitu s různými mikrokontroléry nejenom s architekturou AVR ale i ARM a mnoha dalšími. Kompatibilitu s vybraným typem mikrokontroléru a několika dalšími typy z řad AtMega128x a AtMega256x, poskytuje knihovna MegaCore. Tato knihovna obsahuje pro každý z podporovaných typů mikrokontrolérů optimalizovanou variantu bootloaderu a hlavičkové soubory s definicemi adres registrů a definice jejich hardwarových možností. Knihovnu MegaCore je možné doinstalovat do vývojového prostředí pomocí vestavěného nástroje “manažer desek” nebo stáhnout z [13]. Knihovna MegaCore je šířena pod licencí LGPL.

Mikrokontrolérem komunikuje s počítačem pomocí vlastního, textově orientovaného protokolu. Komunikace vždy probíhá podle schématu příkaz-odpověď. Komunikaci vždy zahajuje počítač odesláním příkazu mikrokontroléru, mikrokontrolér po jeho provedení odešle odpověď s potvrzením nebo změřenou hodnotou. Textově orientovaný protokol je méně efektivní a náročnější na systémové zdroje než případný binárně orientovaný protokol, ovšem textově orientovaný komunikační protokol umožňuje snadnější ladění a testování. Objem přenášených dat je nízký, a velikost operační paměti mikrokontroléru není v tomto případě omezující. Příkazy odesílané počítačem mikrokontroléru dosahují délky maximálně desítek bajtů. Odpovědi mikrokontroléru mohou být delší, nicméně delší odpovědi jsou odesílány po částech a tím je eliminována potřeba velké vyrovnávací paměti. Obsluha komunikace po sériové lince je v mikrokontroléru realizována synchronním, blokujícím způsobem. Program čeká na přijetí příkazu ukončeného znakem nového řádku, po změření hodnoty nebo vykonání jiného příkazu je odpověď odesílána také blokujícím způsobem, běh programu pokračuje až po odeslání textu po sériové lince. Využití asynchronní komunikace by bylo možné, ale vzhledem k použití rychlosti komunikace přes 100kBaud/s a přenosu malého množství dat, by zrychlení funkce programu bylo malé a vedlo by ke značnému zvýšení složitosti programu.

Data jsou přenášena po sériové lince ve slovech s 8mi datovými bity a zabezpečena jedním paritním bitem. Vzhledem vysoké spolehlivosti a nízké chybovosti přenosu dat po sériové lince na krátkou vzdálenost, není v komunikačním protokolu implementována dodatečná kontrola integrity přenesených dat. V případě, že dojde k chybě při přenosu dat, která je detekována přijatým znakem s chybnou paritou, je celá zpráva zahozena a počítač opakovaně pošle mikrokontroléru stejný příkaz a měření je provedeno znova. Pro zajištění vyšší robustnosti komunikace by bylo možné doplnit do přenášených zpráv kontrolní součet pro možnost ověření integrity. Mikrokontrolér s jádrem AVR není vybaven hardwarovým blokem pro akceleraci výpočtu cyklického redundantního součtu, tak jako některé mikrokontroléry s jádrem ARM. Výpočet CRC je poměrně náročný, nicméně vzhledem k velkému množství

nevyužité programové paměti by bylo možné použít knihovny pro výpočet CRC s předem vypočítanou tabulkou koeficientů. Vhodnou alternativou k CRC by mohl být například Fletcherův kontrolní součet, jehož výpočet je méně náročný.

Každý příkaz se skládá z prvních dvou znaků pro kód operace, typicky jde o zkratku názvu funkce, kterou příkaz volá. Druhou částí příkazu jsou případné parametry, jejichž počet a délka je různá dle operace. Příkaz je ukončen znakem nového řádku. Seznam podporovaných příkazů a jejich parametrů je shrnut v následující tabulce. Detailní popis příkazů a formátů jejich odpovědi je v příloze.

Op. Kód	Popis	Parametry
GV	Dotaz na verzi firmware (Get Version)	
RA	Čtení z interních AD převodníku (Read Analog)	Číslo vstupního pinu
RB	Čtení z externího AD převodníku ADS1115	Číslo vstupního pinu
RC	Čtení všech kanálů externího AD převodníku	
RD	Čtení log úrovně (Read Digital)	Číslo vstupního pinu
SM	Rozmítání hodnoty jednoho kanálu a měření po každé změně. (Sweep and Measure)	Výstupní kanál, počáteční hodnota, velikost kroku, režim výstupu
SD	Nastavení směru I/O linky (Set Direction)	Číslo pinu, směr I/O linky
WA	Nastavení hodnoty na výstupu DA převodníku (White Analog)	Výstupní kanál, nastavovaná hodnota, směr I/O linek
WD	Nastavení log. úrovně (Write Digital)	Číslo pinu, nastavovaná hodnota
WR	Kombinace operací WA a RC	Výstupní kanál, nastavovaná hodnota
MA	Rychlé měření charakteru propojení mezi všemi kanály (Measure All)	
MC	Měření kapacity (Measure Capacity)	Číslo výstupního pinu

Tabulka 1: Komunikační protokol - přehled podporovaných příkazů

Odpověď od mikrokontroléru vždy začíná znaky RS (response) a je ukončena znakem nového řádku. V případě funkcí jejichž výstupem je seznam hodnot, je použit zápis podobný struktuře pole v JSON notaci. Seznam hodnot je uzavřen v hranatých závorkách, hodnoty jsou odděleny čárkou.

Funkce pro nastavení směru komunikace, nastavení stavů digitálních pinů a čtení stavu digitálních vstupů využívají standardní funkce knihoven Arduino které poskytují abstraktní vrstvu nad registry vstupně výstupních portů.

Pro komunikaci s externím AD převodníkem ADS1115 je využita knihovna Adafruit ADS1x15 dostupná z [14]. Pro využití všech možností které AD převodník nabízí bylo zapotřebí tuto knihovnu doplnit o funkci pro spuštění režimu kontinuálního měření a upravit nastavení AD převodníku tak, aby mohla být využita nejvyšší podporovaná vzorkovací frekvence namísto výchozí vzorkovací frekvence 128Hz. Všechny funkce pro čtení z AD převodníku posílají do ovládací aplikace surovou hodnotu změřenou AD převodníkem. Přepočítání na hodnotu napětí ve voltech je provedeno až v ovládací aplikaci.

Jedinou funkcí, pro kterou je nezbytné přesné časování, je měření kapacity. Pro výpočet kapacity dle rovnice (3.2) je potřebné změřit hodnotu napětí na kondenzátoru ve známý čas od

počátku přechodového děje. Pro všechna ostatní měření je časový údaj irelevantní, protože ostatní parametry tranzistoru jsou měřeny jako odezva na stejnosměrné budící napětí. Pro měření kapacity, je AD převodník přepnut do režimu kontinuální vzorkování a dokončení konverze je signalizováno impulzem na ALRT výstupu. Vstup mikrokontroléru s podporou přerušení INT4 je nastaven pro detekci sestupné hrany. K měření uplynulého času je využit 16-bitový časovač/čítač. Frekvence tohoto čítače je nastavena na 1/8 frekvence hodinového signálu mikrokontroléru, tzn. 2Mhz. Tato frekvence umožňuje dosáhnout při měření času rozlišení 0,5 μ s a maximální měřené doby 32,7ms. Aktuální hodnota časovače je dostupná v registru TCNT3, což je virtuální 16-bitový registr. Fyzicky je tento virtuální registr tvořen dvěma 8-bitovými registry. Čtení stavu časovače se na úrovni jádra mikrokontroléru skládá z nejméně 2 instrukcí, nelze tedy garantovat atomicitu operace. Proto je na konci každého měřicího cyklu časovač zastaven, je uložena jeho hodnota a následně je časovač opět spuštěn.

V průběhu přechodového děje nabíjení kondenzátoru s neznámou kapacitou, je zaznamenáno 10 vzorků napětí a jeden další vzorek s větším časovým odstupem, který reprezentuje napětí na plně nabitém kondenzátoru. V obslužné proceduře externího přerušení je uložena dosažená hodnota časovače, časovač je resetován a následně je přečtena poslední zaznamenaná hodnota napětí z výstupního registru AD převodníku. Výstupem měření kapacity je soubor 11ti vzorků hodnoty napětí a času uplynulém mezi jednotlivými měřeními.

Pro urychlení měření volt ampérových charakteristik PN přechodů je ve firmware mikrokontroléru implementována funkce Pro rozmítání hodnoty napětí či proudu jednoho kanálu měření odezvy testovaného prvku po každé změně. Měření je provedeno vždy v 10ti bodech s nastavitelnou počáteční hodnotou a velikostí kroku. Výstupem je strukturovaný seznam hodnot, který pro každý krok měření obsahuje hodnotu nastavenou na DA převodníku a napětí odečtená ze všech vstupních kanálů.

7 OVLÁDACÍ APLIKACE

Ovládací aplikace je napsána v programovacím jazyce C# a využívá množství knihoven z frameworku Microsoft.NET. Grafické rozhraní aplikace je postaveno na frameworku WPF. Tento framework umožňuje snadné vytváření a editaci oken aplikace pomocí značkovacího jazyka XAML a také snadný programový přístup k prvkům formuláře. Velkou výhodou, ve srovnání s novějšímu technologii universal Windows platform (UWP), je zpětná kompatibilita se staršími verzemi systému Windows.

Kód ovládací aplikace je rozdělen do několika dílčích projektů. Rozdělení je provedeno z důvodu znovupoužitelnosti jednotlivých částí v jiných projektech, kde by mohl být hardware navržený v této diplomové práci využit k jiným účelům. Jako univerzální analogové vstupně výstupní zařízení. Druhou výhodou je usnadnění přenositelnosti na jiné operační systémy jako je například Linux, případně tvorba UWP varianty aplikace pro Windows 10. Hlavními částmi projektu jsou:

- **Knihovna LibThreadedSerialPort** – zajišťuje obsluhu komunikace po sériovém portu. Nadřazené vrstvě poskytuje jednoduché rozhraní pro odesílání a příjem jednoduchých textových zpráv prostřednictvím sériového portu.
- **Knihovna MeasureDeviceLibrary** - zapouzdřuje sestavování zpráv k odeslání a analyzuje přijaté zprávy. Obsahuje komplexnější funkce a vytváří abstraktní vrstvu nad navrženým měřicím zařízením. Provádí také korekci změřených hodnot dle kalibračních koeficientů.
- **TransistorTesterGUI** - Obsahuje grafické uživatelské rozhraní aplikace, definuje vzhled jednotlivých oken, interakce mezi ovládacími prvky a nižšími vrstvami a formátování dat nezbytné pro jejich vykreslení v grafech.

7.1 Knihovna pro komunikace se sériovým portem

Tato knihovna je vytvořena pro jiné zařízení, kde byla realizována komunikace s více mikrokontroléry připojenými k jednomu sériovému portu a využívající asynchronní komunikaci, nikoliv model dotaz-odpověď. Funkcionalita několika virtuálních přenosových kanálů uvnitř jednoho fyzického přenosového kanálu, ani možnosti asynchronní komunikace nejsou využity.

7.2 Knihovna MeasureDeviceLibrary

Tato knihovna obsahuje třídy pro reprezentaci a ovládání jednotlivých měřicích kanálů a funkce pracující s více kanály najednou. Nezbytná konfigurace měřicích kanálů je načtena ze souboru, pro přizpůsobení programu k práci s měřičem s jiným počtem bitů v měřicích kanálech nebo jinými hodnotami rezistorů není zapotřebí upravovat kód programu. Při zahájení spojení

je také kontrolováno, zda verze firmware a desky je shodná s verzí pro kterou je konfigurační soubor určen.

Knihovna MeasureDeviceLibrary zpřístupňuje ostatním částem programu jak jednoduché funkce pro přímé řízení vstupně/výstupních linek mikrokontroléru, tak i komplexnější funkce pro nastavení režimu funkce měřicího kanálu, nastavení výstupního proudu či napětí a kontroly, zda jsou požadované hodnoty v přípustných limitech. Mezi další funkce patří měření voltampérových charakteristik v různých režimech a měření kapacity.

Pro měření voltampérové charakteristiky je možné využít funkci "SweepAndMeasure" implementovanou ve firmware mikrokontroléru, která zajistí rychlé změření charakteristiky v 10-ti bodech. Druhou možností měření charakteristik, která nabízí větší flexibilitu, je nastavení výstupního kanálu a měření všech napětí v každém bodě. Měření v režimu bod po bodu zabere více času, ale nabízí prakticky neomezenou flexibilitu v počtu vzorků, proměnné velikosti kroků, rozmítání a podobně. Aby bylo sníženo napěťové namáhání neznámých komponent a minimalizovalo se riziko poškození měřeného tranzistoru, je zde implementována také metoda bezpečného měření charakteristik, kdy jsou testované PN přechody vystaveny napětí v závěrném směru maximálně 2,5V a proudu v propustném směru maximálně 2mA. Tyto hodnoty by neměly způsobit destrukci žádných běžně používaných polovodičových součástek. S funkcí měření voltampérových charakteristik úzce souvisí jejich automatizovaná analýza. Funkce pro automatickou analýzu dokáže určit, zda propojení mezi dvěma měřicími kanály má charakter spojení s nízkým až nulovým odporem – zkrat, rozpojeného obvodu či PN přechodu v závěrném směru, PN přechodu v propustném směru, nebo propojení rezistivního charakteru – například rezistor nebo částečně otevřený kanál u unipolárního tranzistoru. Vzhledem ke skutečnosti, že se očekává připojení neznámého typu polovodiče, je zapotřebí, aby algoritmus detekce byl dostatečně robustní a dokázal spolehlivě detekovat PN přechody s různou hodnotou prahového napětí od schottkyho diod s prahovým napětím přibližně 0,25V až po bipolární tranzistory s darlingtonovým zapojením, kde je úbytek na dvou polovodičových přechodech zapojených sériově více než 1,2V. Také strmost nárůstů proudu v závislosti na napětí je u polovodičů s odlišnou technologií výroby různá. Proto jednoduchá klasifikace založená na porovnání úbytku napětí v propustném směru s předem definovanými limity není spolehlivá a nemusí správně detekovat méně obvyklé typy PN přechodů jaké jsou popsány výše. Vzhledem k výše uvedeným rizikům byl navržen algoritmus detekce PN přechodu, založený na analýze diferenciálního odporu. PN přechody jsou typické vysokým diferenciálním odporem, pokud je napětí nižší než prahové a strmým poklesem diferenciálního odporu k velmi nízkým hodnotám po překročení prahového napětí. Navržený algoritmus nejprve vypočítá diferenciální odpor mezi vzorky voltampérové charakteristiky, poté testuje zda všechny vzorky s hodnotou větší než tříčtvrtinový kvartil tohoto výběru se nacházejí v první polovině vzorků příslušející k vzorkům měřeným s nižšími proudy a všechny zároveň hodnota všech vzorků diferenciálního odporu pro vyšší proudy je menší než jedna třetina maxima. Experimentálně

bylo ověřeno, že tento algoritmus dokáže spolehlivě detekovat různé PN přechody nezávisle na jejich prahovém napětí.

Další funkcí navazující na předchozí analýzu typu spojení je klasifikace typu tranzistoru. Z popisu vnitřní struktury a principu funkce jednotlivých typů polovodičů v [1], [2] a [4] lze odvodit následující pravidla pro klasifikaci těchto typů. Tester tranzistorů při požadavku na klasifikaci typu tranzistoru provede měření volt ampérové charakteristiky mezi všemi třemi kanály v obou polaritách, celkem je změřeno 6 charakteristik a stanoven charakter propojení pro každou dvojici kanálů v obou polaritách.

Bipolární tranzistor obsahuje dva PN přechody, které jsou oba orientovány jedním směrem ke společné elektrodě - báze. Dvě zbylé elektrody nejsou vzájemně vodivě propojeny při nulovém proudu bází. Podle toho, zda jsou PN přechody k bázi orientovány v propustném nebo závěrném směru, lze určit, zda jde o tranzistor PNP nebo NPN. U běžných tranzistorů nelze pouze z voltampérových charakteristik propojení zjistit pozici elektrod emitor a kolektor. V průběhu identifikace tranzistoru je změřeno proudové zesílení pro obě možné varianty zapojení elektrod emitoru a kolektoru. Varianta, pro kterou je proudové zesílení výrazně vyšší, značí činnost tranzistoru v normálním režimu a tedy správnou pozici emitoru a kolektoru.

Tranzistory MOSFET vždy obsahují substrátovou diodu mezi elektrodami drain a source, a jejich hradlo je odděleno vrstvou izolantu. Tranzistor MOSFET lze detekovat jako jeden PN přechod mezi dvěma kanály, a třetí kanál nemá s předchozí dvojicí žádné vodivé spojení. Pouze z voltampérových charakteristik a typu propojení nelze určit, zda jde o tranzistor s P nebo N vodivým kanálem. Pro určení polaritu tranzistoru je zapotřebí dalších testů. Testování polaritu MOS tranzistoru probíhá připojením proudového zdroje na elektrody drain a source tak, aby substrátová dioda byla polarizována v závěrném směru. Následným testováním lze určit, zda se vodivý kanál tranzistoru otevírá při kladných nebo záporných hodnotách napětí na hradle.

Tranzistory JFET obsahují PN přechod mezi hradlem a elektrodou source. Vodivý kanál mezi elektrodami drain a source typicky vykazuje bez přítomnosti napětí na hradle odporový charakter. Podle orientace PN přechodu mezi hradlem a vodivým kanálem lze určit, zda jde o tranzistor s P nebo N vodivým kanálem.

Při testování známého tranzistoru jsou využita stejná kontrolní pravidla. Kontrolní funkce může v případě známého typu tranzistoru a zapojení jeho vývodů podrobněji určit zjištěnou poruchu, jako například „přerušeni přechodu báze-emitor“ nebo „průraz substrátové diody“. V případě, že je připojen poškozený tranzistor neznámého typu a není zadáno ani zapojení jeho vývodů, algoritmus jej nedokáže na základě počtu a pozice PN přechodů správně rozpoznat a podrobnější popis poruchy není k dispozici.

Při měření výstupní charakteristiky tranzistoru za konstantních vstupních podmínek je nezbytné kompenzovat vliv odporu sepnutých tranzistorů uvnitř mikrokontroléru, které připojují jeden z vývodů testovaného tranzistoru k zemi nebo kladnému napájecímu napětí. V průběhu měření charakteristiky, kdy dochází ke změnám proudu I_C u bipolárních, respektive I_D u unipolárních tranzistorů, se také mění úbytek napětí na parazitním odporu. Tím dochází k nežádoucí změně

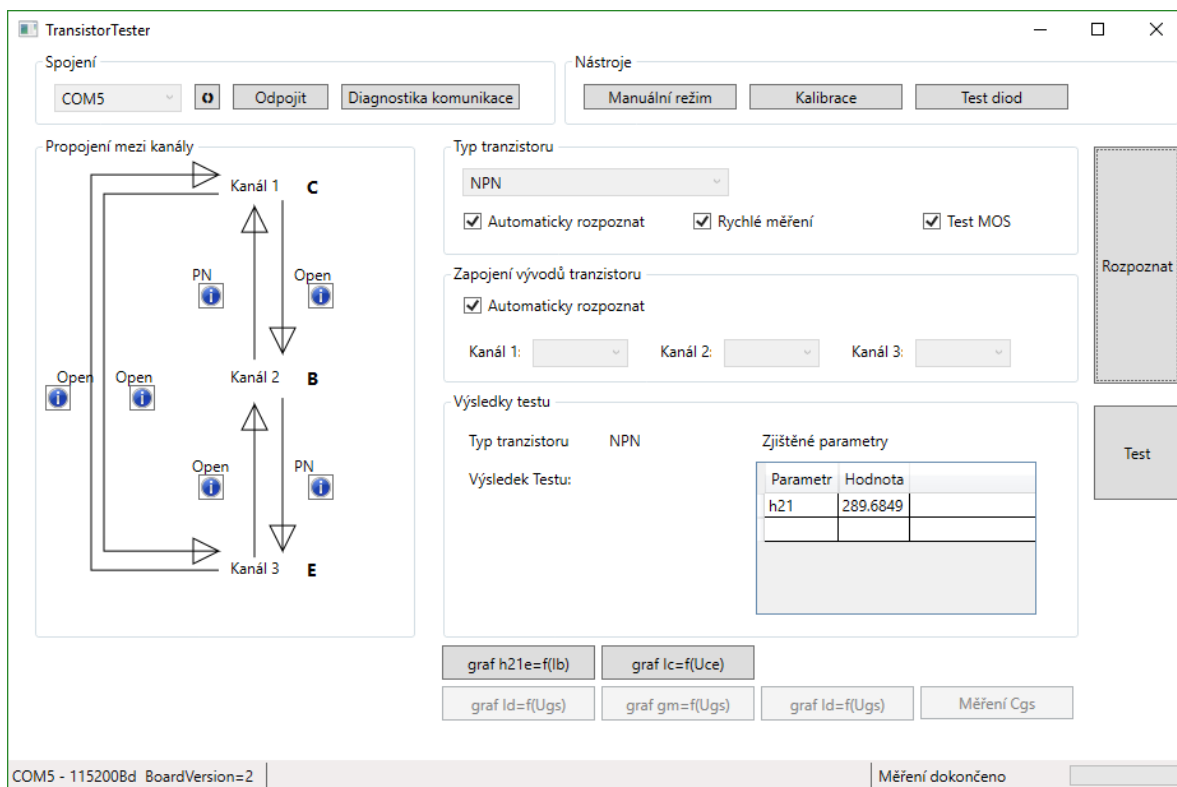
proudu do báze nebo napětí na hradle. Algoritmus kompenzace této změny pracuje na principu proporcionálního regulátoru. Dokud je odchylka mezi nastavenou a skutečnou hodnotou budicího napětí větší než nastavený limit (10mV nebo 0,5%), je měření opakováno s budicím napětím upraveným proporcionálně k velikosti odchylky. Pokročilejší algoritmus pro kompenzaci odchylky s přesnějším odhadem nově nastavované hodnoty by mohl přinést snížení počtu opakování měření a tím celkové zrychlení měření charakteristik.

V programu je také vestavěna funkce kalibrace AD převodníku. Program nastaví v 5-ti krocích vhodné napětí na výstupu DA převodníku, které je změřeno všemi kanály AD převodníku a uživatel je vyzván k ručnímu zadání skutečné hodnoty napětí zjištěné pomocí dostatečně přesného voltmetru. K stanovení dvou kalibračních koeficientů (posuv nulového napětí a násobitel) z 5-ti vzorků je použita metoda nejmenších čtverců. Veškerá konfigurace aplikace i kalibrační konstanty jsou ukládány v textových souborech ve formátu xml které umožňují v případě potřeby ruční editaci.

Kontrola správné funkce DA převodníku je zde pro rychlé odhalení chyb v průběhu osazení plošného spoje. Testuje se symetrie hodnot váhových rezistorů u jednotlivých kanálů. V případě záměny hodnot rezistorů nebo zkratu na desce plošných spojů je symetrie porušena a výstupem testu DA převodníku je varování s informací u kterého měřicího kanálu byla nalezena nesrovnalost.

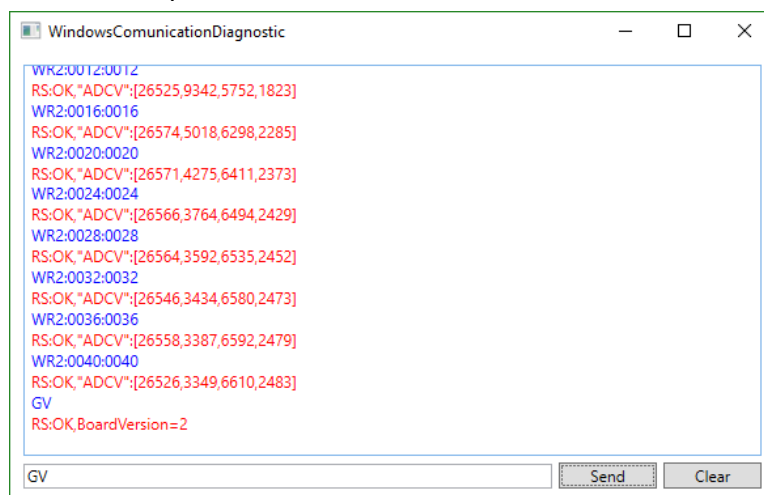
7.3 Grafické uživatelské rozhraní

Grafické uživatelské rozhraní se skládá z několika oken. Hlavní okno programu zobrazuje informace o charakteru propojení mezi měřicími kanály a výsledky testu připojeného tranzistoru. Dále umožňuje manuálně vybrat typ tranzistoru a jeho zapojení jeho vývodů nebo spustit měření charakteristik.



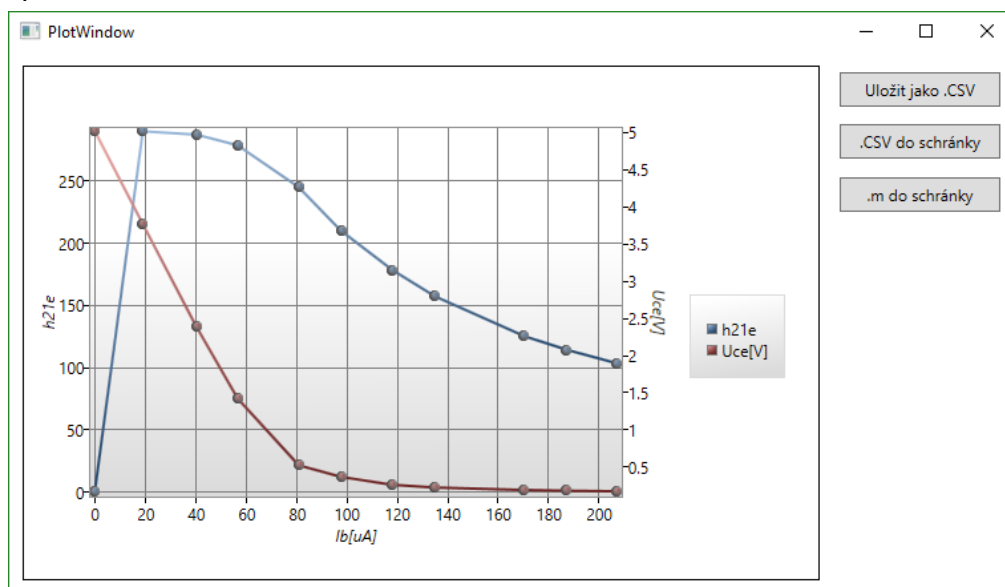
Obrázek 18: Hlavní okno aplikace

V dolní části hlavního okna se nachází stavová lišta zobrazující otevřený komunikační port a zjištěnou verzi připojené desky. Pro testovací a ladicí účely je v programu implementována funkce diagnostiky sériové komunikace. Okno diagnostiky komunikace je sériovým terminálem, který zobrazuje probíhající komunikaci mezi programem a mikrokontrolerem, případně umožňuje manuální odesílání příkazů.



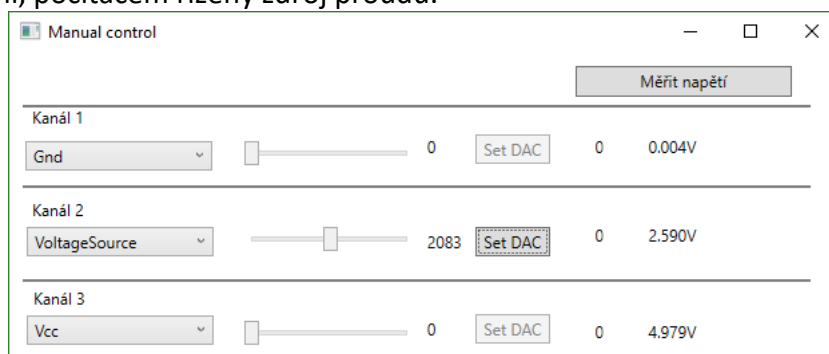
Obrázek 19: Okno diagnostiky komunikace

Změřené charakteristiky se zobrazují vždy v novém okně, kterých může být otevřeno několik současně. Hlavní částí okna je komponenta grafu z knihovny WPF Toolkit Data Visualization Controls. Tato komponenta grafu má široké možnosti nastavení, podobně jako graf v tabulkové procesoru excel. Dále jsou v okně grafu tlačítka pro export zobrazené charakteristiky ve formátu CSV nebo jako definice pole jazyka Matlab pro usnadnění dalšího zpracování naměřených dat.



Obrázek 20: Okno grafu

Okno manuálního ovládání umožňuje uživatelsky přímo ovládat DA převodníky jednotlivých měřicích kanálů a měřit napětí na všech kanálech. Jeho využití je pro testování LED diod, nebo jako univerzální, počítačem řízený zdroj proudu.



Obrázek 21: Okno manuálního ovládání

8 ZÁVĚR

V průběhu práce na této diplomové práci se podařilo navrhnout a realizovat funkční vzorek testeru tranzistorů, který přináší zajímavý kompromis mezi přesností měření, složitostí návrhu a cenou realizace. Velkou výhodou je univerzálnost navrženého řešení, které umožňuje, v případě potřeby, doplnění nových funkcí úpravou software, a i hardware lze snadno přizpůsobit měřené úloze nebo místu použití díky vyvedení několika dosud nevyužitých vstupně výstupních linek na rozšiřující konektory. Také architektura ovládacího programu a jeho rozdělení do knihoven je přizpůsobeno případným dalším úpravám a přidání nových funkcí.

Použitý AD převodník vyniká vysokou přesností měření napětí díky rozlišení 16bitů, ovšem jeho nízká vzorkovací frekvence omezující pro použití při měření dynamických dějů. Přesnost navrženého způsobu měření proudu je dostatečná pro orientační měření parametrů tranzistorů a dále by ji bylo možné zlepšit osazením rezistorů s menší tolerancí a rozšířením ovládacího programu o funkci kalibrace proudu. Přesnost měření kapacit je dostatečná pro účely orientačního měření parazitních kapacit unipolárních tranzistorů, ovšem navržený tester nelze považovat za plnohodnotnou náhradu RLC měřiče.

Ve srovnání s továrně vyráběným testerem polovodičových součástek jako je například Atlas DCA 75 od výrobce Peak electronic nabízí nižší cenu a vyšší univerzálnost a uživatelskou přizpůsobitelnost. Na druhou stranu Atlas DCA 75 nabízí větší měřitelný rozsah proudového zesílení a díky využití interního zvyšujícího měniče napětí také širší rozsah napětí pro buzení unipolárních tranzistorů a propracovanější software umožňující pokročilá nastavení při měření charakteristik.



Obrázek 22: Atlas DCA 75(vlevo) a univerzální tester elektronických součástek

Dalším produktem, se kterým lze navržený tester porovnávat, jsou univerzální testery elektronických součástek, které lze zakoupit ve formě modulu či stavebnice obvykle na asijských internetových obchodech za cenu méně než 300Kč. Tato zařízení jsou obvykle vybavena funkcí pro automatické rozpoznání typu tranzistoru a detekce zapojení jeho vývodů ovšem pouze 3 až 4bitovým DA převodníkem a neumožňují měření charakteristik ani propojení s počítačem.

Literatura

- [1] BART V. VAN ZEGHBROECK. *Principles of semiconductor devices and heterojunctions*. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2010. ISBN 9780130409041.
- [2] FROHN, Manfred. *Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0123-3.
- [3] MUSIL, Vladislav. *Elektronické součástky*. Vyd. 4., upr. Brno: VUTIUM, 2005. ISBN isbn80-214-2627-6.
- [4] BEJČEK, Ludvík, Miloslav ČEJKA, Jiří REZ, Eva GESCHIDTOVÁ a Miloslav STEINBAUER. *Měření v elektrotechnice*. Brno: VUTIUM, 2006.
- [5] KESTER, Walt. *The Data Conversion Handbook*. Elsevier Newnes. Amsterdam: Heidelberg, 2007. ISBN 0-7506-7841-0.
- [6] *Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V: Datasheet* [online]. In: . [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf
- [7] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry ATMEL*. 2. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. μ C & praxe. ISBN 80-7300-209-4.
- [8] WILLIAMS, Elliot. *Make: AVR programming*. Sebastopol, Calif.: Maker Media, 2014. [Make.magazine.com](http://make.magazine.com). ISBN 978-1449355784.
- [9] *V-USB: A Firmware-Only USB Driver for the AVR* [online]. [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: <http://vusb.wikidot.com/>
- [10] EDITED BY F.F. MAZDA a WITH SPECIALIST CONTRIBUTORS. *Electronics engineer's reference book*. 6th ed. London: Butterworths, 1989. ISBN 9780408054300.
- [11] *Measuring Power MOSFET Characteristics, Aplikační poznámka AN-957* [online]. [cit. 2018-2-20]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/90715/an957.pdf>
- [12] SIEBEL, OSMAR FRANCA. *MOSFET threshold voltage: Definition, extraction, and some applications*. *Microelectronics Journal*. 2012, **2012**(5), 329-336. ISSN 0026-2692.
- [13] *MegaCore: An Arduino hardware package for ATmega64* [online]. [cit. 2018-4-25]. Dostupné z <https://github.com/MCUdude/MegaCore>
- [14] *FTDI 232RL Datasheet ATmega64* [online]. [cit. 2018-4-25]. Dostupné z http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf

Použité softwarové knihovny třetích stran

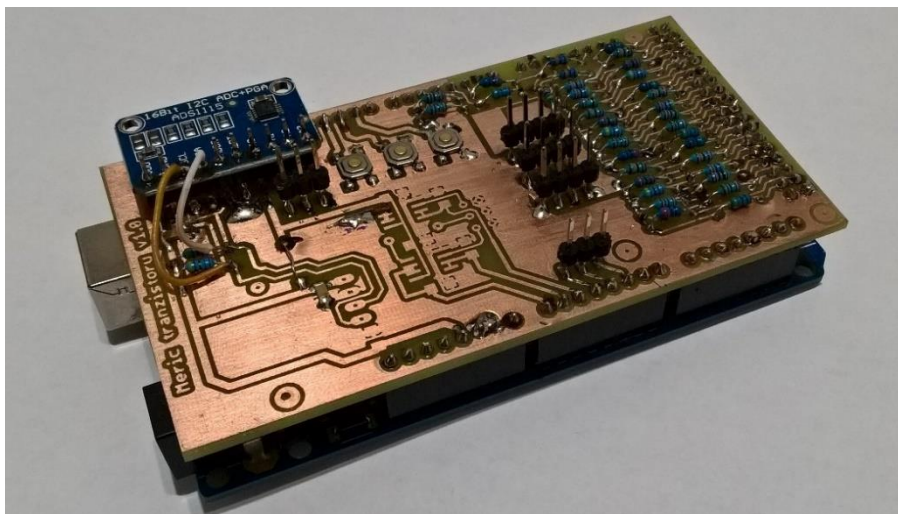
ADS1X15 (https://github.com/adafruit/Adafruit_ADS1X15)	BSD licence
MegaCore (https://github.com/MCUdude/MegaCore)	LGPL licence
Arduino core and libraries (https://www.arduino.cc)	LGPL licence
Math.NET Numerics (https://numerics.mathdotnet.com)	MIT licence
Microsoft .NET Framework -	MIT/proprietární licence

Z použití knihoven třetích stran s výše uvedenými licencemi neplynou žádná omezení ani povinnost dále šířit odvozené dílo

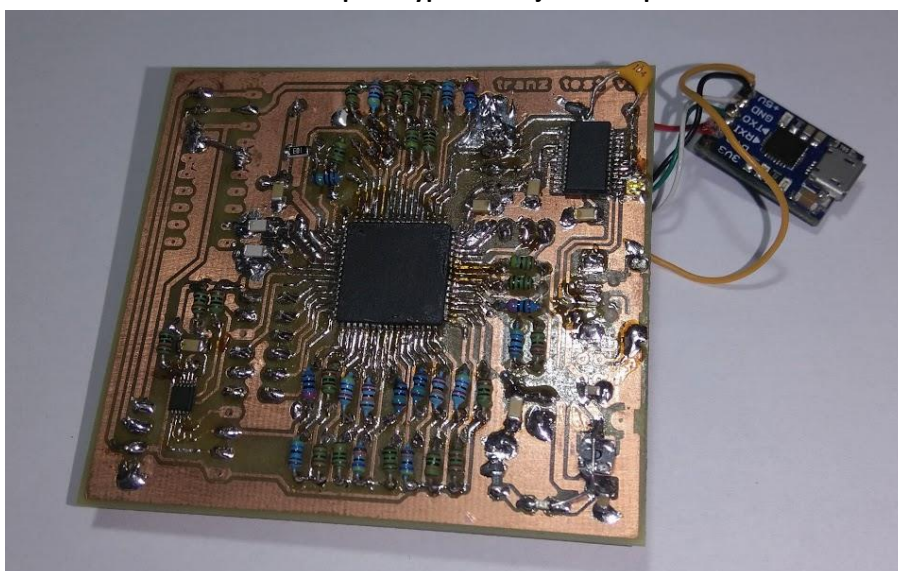
Seznam symbolů, veličin a zkratek

FEKT	-	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	-	Vysoké učení technické v Brně
B	-	Báze
E	-	Emitor
C	-	Kolektor
FET	-	Tranzistor řízený polem(Field Effect Transistor)
G	-	Řídící elektroda unipolárního tranzistoru (Gate)
S	-	Emitor unipolárního tranzistoru (Source)
D	-	Kolektor unipolárního tranzistoru (Drain)
ADC	-	Analogově digitální převodník
DAC	-	Digitálně analogový převodník
SRAM		Statická paměť s náhodným přístupem
JTAG		Rozhraní pro testování mikrokontrolérů (Joint Test Action Group)
USB		Universal Serial Bus
CRC		Cyklický redundantní součet
PC	-	Osobní počítač
WPF	-	Windows Presentation Foundation
XML		rozšiřitelný značkovací jazyk.(eXtensible Markup Language)
JSON		Notace zápisu objektů v javascriptu (Java Script Object Notation)

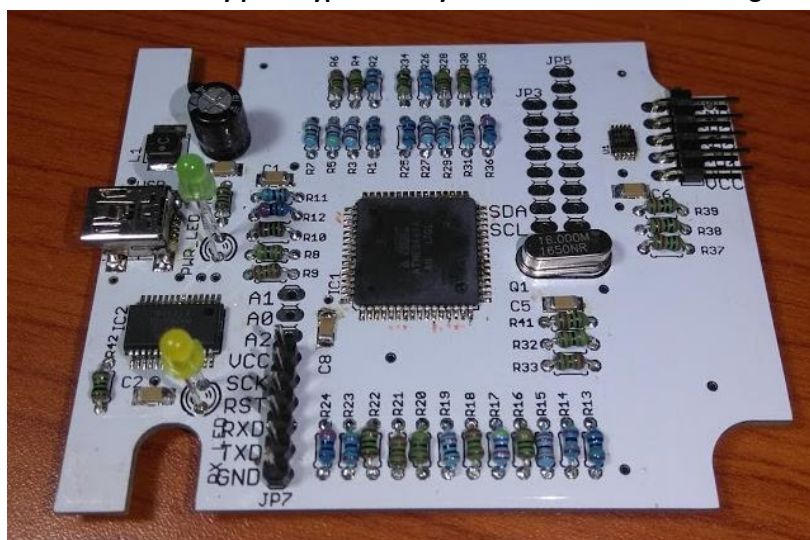
Fotografie



Obrázek 23: První prototyp - rozšiřující deska pro arduino



Obrázek 24: Druhý prototyp s osazeným mikrokontrolérem Atmega64



Obrázek 25: Finální verze desky plošného spoje

Seznam použitých součástek

Označení	Hodnota	Pouzdro	Počet ks.
C1,C2, C5, C6, C7, C8, C10, C11	100n	C1206	8
C3, C4	22pF	C1206	2
C9	330u/6.3V	E2,5-6	1
IC1	MEGA64-A	TQFP64	1
IC2	FT232RL	SSOP28	1
U1	ADC_ADS1015	MSOP10	1
USB	MINI-USB-SHIELD-UX60A	UX60A-MB-5ST	1
JP3	PINHD-1X8	1X08	1
JP5	PINHD-1X10	1X10	1
JP6	PINHD-1X5/90	1X05/90	1
JP7	PINHD-1X9	1X09	1
L1	1uH	L5650M	1
PWR_LED, RX_LED	LED3MM	LED3MM	2
Q1	16M	HC49U-V	1
R12, R24, R36	220R	0204/5	3
R11, R23, R35	470R	0204/5	3
R10, R22, R34, R40, R42	1k	0204/5	5
R9, R21, R33	2k2	0204/5	3
R8, R20, R32	4k7	0204/5	3
R7, R19, R31, R37, R38, R39, R41	10k	0204/5	7
R6, R18, R30	22k	0204/5	3
R5, R17, R29	47k	0204/5	3
R4, R16, R28	100k	0204/5	3
R3, R15, R27	220k	0204/5	3
R2, R14, R26	470k	0204/5	3
R1, R13, R25	1M	0204/5	3

Tabulka 2: Seznam součástek

Seznam příloh na CD

/Eagle/	Schéma a výkres plošného spoje ve formátu pro CAD Eagle.
/Firmware/m64Teseter/	Zdrojový kód firmware mikrokontroléru.
/Firmware/lib/	Modifikovaná knihovna pro komunikace s ADC
/Firmware/Cfg-EEPROM/	Firmware pro naplnění konfigurační EEPROM
/PcSoftware/src/	Zdrojový kód ovládací aplikace
/PcSoftware/bin/	Zkompilovaná ovládací aplikace