

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Bakalářská práce

Tester statických charakteristik s mikrokontrolérem

Josef Burda
KYBERNETIKA A ROBOTIKA

Vedoucí práce
doc. Ing. Jan FISCHER, CSc.

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Burda** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **466347**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Tester statických charakteristik s mikrokontrolérem

Název bakalářské práce anglicky:

Microcontroller Based DC Characteristics Tester

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte metodu měření statických charakteristik obvodů s polovodičovými prvky s využitím mikrořadiče řady STM32Fxxx. Sestavte potřebné elektronické obvody s mikrořadičem řady STM32Fxxx, který pomocí vnitřních převodníků DAC a ADC zajistí nastavování vstupních napětí a monitorování výstupních napětí testovaného obvodu. Orientujte se na určení statických parametrů měřících obvodů s tranzistory a operačními zesilovači. Vytvořte potřebné programové vybavení pro vlastní mikrořadič i pro nadřazené PC, kterým se experiment bude ovládat.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Yiu, J.: The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors
- [2] STMicroelectronics: RM0316, STM32F3 Reference manual
- [3] STMicroelectronics: DS10362 - STM32F303 Data

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Jan Fischer, CSc., katedra měření FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **31.01.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce:

do konce letního semestru 2019/2020

doc. Ing. Jan Fischer, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce doc. Ing. Jana Fischera, CSc. a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze dne 24.5.2019

.....
Josef Burda

Poděkování

Chtěl bych poděkovat za veškerou podporu, které se mi při tvorbě práce dostalo. Zvláště bych chtěl poděkovat vedoucímu doc. Ing. Janu Fischerovi, CSc. za neúnavnou podporu v průběhu celého projektu. Díky také patří všem kolegům, kteří byli ochotni diskutovat nápady a testovat aplikaci. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a realizací systému pro měření statických charakteristik polovodičových součástek. K měření je využit vývojový kit NUCLEO osazený mikrokontrolérem z řady STM32, který má za úkol provádět měření a odesílat změřené hodnoty nadřazenému PC. Aplikace na nadřazeném PC řídí měření a prezentuje jeho výsledky v grafické podobě. V rámci práce byly vytvořeny programy pro mikrokontrolér a PC. Součástí práce je také sbírka úloh, při jejichž řešení bude systém využit. Hlavním cílem je podpora výuky elektroniky.

Klíčová slova: mikrokontrolér, STM32F303RE, NUCLEO, charakteristiky, tranzistory, diody, operační zesilovače

Abstract

The main goal of this thesis is to design and realise a system for measuring DC characteristics of semiconductor components. The measurements are done by an STM32 series microcontroller which measures the desired parameters and sends the results to a parent PC. The parent PC application controls the measurement and presents the results in a graphical form. A firmware for the microcontroller and a PC application were created as a part of this thesis. This thesis also contains a set of laboratory assignments for which the system will be used. The main goal of the project is the support of electronics education.

Keywords: microcontroller, STM32F303RE, NUCLEO, characteristic, transistors, diodes, operational amplifiers

Title translation: Microcontroller based DC characteristics tester

Obsah

1	Úvod	1
2	Rozbor zadání	2
2.1	Měření charakteristik	2
2.2	Použitý vývojový kit s mikrokontrolérem	3
2.3	Omezení mikrokontroléru	4
2.4	Řešení omezení mikrokontroléru	4
2.5	Software	4
2.6	Laboratorní úlohy	5
3	Vlastnosti mikrokontroléru	6
3.1	Omezení vstupních napětí AD převodníku	6
3.1.1	Ochrana vstupů před poškozením	6
3.1.2	Měření kladných napětí větších než 3.3 V	7
3.1.3	Měření malých napětí	7
3.1.4	Měření bipolárních napětí	8
3.2	Vlastnosti DA převodníku	10
3.2.1	Změna rozsahu výstupního napětí	10
3.2.2	Zatěžovací charakteristika - <i>current source</i>	11
3.2.3	Zatěžovací charakteristika - <i>current sink</i>	13
3.2.4	Linearita převodu DA převodníku	14
3.2.5	Kanál 2 DA převodníku	15
3.3	Pin v digitálním režimu	16
4	Vlastnosti použitých operačních zesilovačů	19
4.1	Vstupní napěťový offset	19
4.2	Přenosová charakteristika	20
4.3	Zatěžovací charakteristika	20
4.3.1	Operační zesilovač v režimu <i>Current source</i>	21
4.3.2	Operační zesilovač v režimu <i>Current sink</i>	21
4.4	Výběr vhodného OZ	22
5	Automatické měření charakteristik	25
5.1	Charakteristika diody	26
5.2	Bipolární tranzistory	26
5.2.1	Převodní charakteristika NPN tranzistoru	27
5.2.2	Výstupní charakteristika NPN tranzistoru	27
5.2.3	Vstupní odpor báze - h_{11E}	28

5.3	Unipolární tranzistory	29
5.3.1	Převodní charakteristika N-MOS	29
5.3.2	Výstupní charakteristika	30
6	Implementace softwaru	31
6.1	Prototyp FW v mbed	31
6.2	Firmware pro mikrokontrolér	31
6.2.1	Knihovna <code>init.h</code>	32
6.2.2	Knihovna <code>adc.h</code>	33
6.2.3	Knihovna <code>dac.h</code>	33
6.2.4	Knihovna <code>usart.h</code>	34
6.2.5	Knihovna <code>manual.h</code>	35
6.2.6	Knihovna <code>remote.h</code>	35
6.3	Aplikace pro PC	36
6.3.1	Použité knihovny	36
6.3.2	Modul <code>communication.py</code>	37
6.3.3	Modul <code>measure.py</code>	38
6.3.4	Modul <code>gui.py</code>	40
7	Uživatelský návod	43
7.1	Než začnete měřit	43
7.2	Bezpečnost	43
7.3	Manuální režim	43
7.4	Automatická měření	44
8	Laboratorní úlohy	46
8.1	Ověření principu superpozice	46
8.2	Ověření Théveninova teorému	47
8.3	Přední napětí diod	47
8.4	Ověření závislosti předního napětí diody na teplotě	47
8.5	Ověření diodového modelu bipolárního tranzistoru	48
8.6	Převodní charakteristika NPN tranzistoru	48
8.7	Výstupní charakteristika NPN tranzistoru	49
8.8	Vstupní odpor báze NPN tranzistoru - h_{11E}	49
8.9	Převodní charakteristika N-MOSFET	50
8.10	Výstupní charakteristika N-MOSFET	50
8.11	Vstupní napěťový offset operačního zesilovače	50
8.12	Rozsah výstupního napětí operačního zesilovače	51
9	Závěr	53
A	Fotodokumentace použitého hardware	56
B	Obsah přiloženého CD	57

Seznam obrázků

2.1	Vývojový kit NUCLEO-F303RE s mikrokontrolérem STM32F303RE	3
2.2	Schéma měřicího systému	5
3.1	Vstupní struktura AD převodníku, převzato z [2]	6
3.2	Ochrana vstupu mikrokontroléru	7
3.3	Snížení měřeného napětí pomocí odporového děliče	7
3.4	Převodní charakteristika obvodu pro převod bipolárních napětí na unipolární	9
3.5	Obvody pro převod bipolárních napěťových úrovní na unipolární	9
3.6	Zesílení výstupního napětí DA převodníku pomocí neinvertujícího zesilovače	12
3.7	Obvod pro převod unipolárního napětí na bipolární	12
3.8	Měření zatěžovací charakteristiky DAC	13
3.9	Zatěžovací charakteristika DAC s vypnutým bufferem	13
3.10	Struktura R-2R použitá v DA převodníku	13
3.11	Zatěžovací charakteristika DA převodníku se zapnutým výstupním bufferem	14
3.12	Náhradní schéma výstupního bufferu DA převodníku	14
3.13	Napětím řízený zdroj napětí s OZ a tranzistorem	15
3.14	Měření zatěžovací charakteristiky DAC v režimu <i>current sink</i>	15
3.15	Zatěžovací charakteristika DAC v režimu <i>current sink</i>	15
3.16	Převodní charakteristika DA převodníku s vypnutým bufferem	16
3.17	Převodní charakteristika DA převodníku se zapnutým bufferem	16
3.18	Detaily nelinearity převodu DA převodníku se zapnutým bufferem	17
3.19	Převodní charakteristika DA převodníku se zapnutým bufferem a pull-down rezistorem	17
3.20	Převodní charakteristika DA převodníku se zapnutým bufferem a pull-up rezistorem	17
3.21	Vliv paralelní LED na převodní charakteristiku kanálu 2 DA převodníku	18
3.22	Zatěžovací charakteristiky pinu v režimu digitálním režimu	18
4.1	Schéma pro měření výstupního napěťového offsetu OZ	20
4.2	Měření převodní charakteristiky OZ	21
4.3	Porovnání přenosu operačních zesilovačů	21
4.4	Obvod pro měření zatěžovací charakteristiky operačního zesilovače	21
4.5	Zatěžovací charakteristiky operačních zesilovačů	22
4.6	Obvod pro měření zatěžovací charakteristiky operačního zesilovače jako <i>current sink</i>	23
4.7	Zatěžovací charakteristiky operačních zesilovačů v režimu <i>current sink</i>	24

4.8	Vnitřní struktura OZ LM324	24
5.1	Přiřazení vstupů a výstupů mikrokontroléru k pinům na vývojovém kitu	25
5.2	Schéma obvodu pro měření VA charakteristiky	26
5.3	Srovnání VA charakteristik 3 různých diod	26
5.4	Schéma obvodu pro měření převodní charakteristiky NPN tranzistoru .	27
5.5	Převodní charakteristika tranzistoru BC546C	27
5.6	Schéma obvodu pro měření výstupní charakteristiky NPN tranzistoru .	28
5.7	Výstupní charakteristika tranzistoru BC546C	28
5.8	Schéma obvodu pro měření převodní charakteristiky N-MOS tranzistoru	30
5.9	Převodní charakteristika N-MOS tranzistoru BS170	30
5.10	Schéma obvodu pro měření výstupní charakteristiky N-MOS tranzistoru	30
5.11	Výstupní charakteristika N-MOS tranzistoru BS170	30
6.1	Možnosti měření VA charakteristiky	39
6.2	Schéma pro měření β , h_{11E} a převodní charakteristiky NPN tranzistoru	40
6.3	Úvodní menu PC aplikace	42
6.4	Obrazovka pro měření VA charakteristiky s grafickým výstupem	42
7.1	Manuální režim v terminálovém okně	44
8.1	Zapojení úlohy pro ověření principu superpozice	46
8.2	Schéma obvodu pro měření vnitřního obvodu DA převodníku	47
8.3	Měření voltampérové charakteristiky	48
8.4	Diodové modely bipolárních tranzistorů	48
8.5	Zapojení pro měření převodní charakteristiky NPN tranzistoru	49
8.6	Zapojení pro měření výstupní charakteristiky NPN tranzistoru	49
8.7	Zapojení pro měření převodní charakteristiky N-MOS tranzistoru	50
8.8	Zapojení N-MOS tranzistoru pro měření výstupní charakteristiky	51
8.9	Měření výstupního napěťového offsetu operačního zesilovače	51
8.10	Zapojení OZ pro měření rozsahu výstupního napětí	52
A.1	Příklad zapojení úlohy měření VA charakteristiky diody	56

Seznam tabulek

3.1	Poměry rezistorů pro převod vybraných bipolárních napětí	10
4.1	Vstupní napěťový offset OZ - změřené hodnoty a hodnoty z datasheetů	20
5.1	Srovnání změřených a vypočtených hodnot h_{11E} pro různé tranzistory .	29

Seznam zkratek

AD	Analogově digitální
ADC	Analogově digitální převodník
DA	Digitálně analogový
DAC	Digitálně analogový převodník
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter, komunikační rozhraní
USB	Universal Serial Bus
GUI	Graphical User Interface = Grafické uživatelské rozhraní
VA	Voltampérová
OZ	Operační zesilovač
FW	Firmware

Kapitola 1

Úvod

Někteří studenti elektroniky mají problémy s pochopením základních vlastností elektronických součástek, jako jsou diody a tranzistory. Jedním z nejlepších způsobů jak se seznámit s vlastnostmi těchto součástek je změřit jejich charakteristiky.

Při měření charakteristik se potřeba nastavovat vstupní veličiny obvodu a měřit jeho výstupní veličiny. V laboratoři se k měření charakteristik obvykle používají multimetry a nastavitelné zdroje napětí. Jedná se o poměrně náročné přístroje, které nejsou dostupné v dostatečném množství na to, aby mohli studenti pracovat samostatně. Další nevýhodou tohoto přístupu je, že měření probíhá manuálně a studenti v omezeném čase, který je na laboratorní úlohu vyčleněn, změří charakteristiku pouze v malém množství bodů.

Cílem této práce je vývoj softwarově definovaného měřicího přístroje pro měření statických charakteristik polovodičových součástek pomocí mikrokontroléru. Náhradou laboratorních přístrojů mikrokontrolérem lze dosáhnout výrazného snížení nákladů na vybavení, takže bude moci každý student provádět svá vlastní měření. Měření bude prováděno pomocí periférií mikrokontroléru (AD a DA převodníky). Díky použití mikrokontroléru bude možné měření charakteristik automatizovat pomocí nadřazené PC aplikace, která bude sloužit také k prezentaci výsledků měření.

Systém budu realizovat s mikrokontrolérem STM32F303RE osazeným na vývojové desce NUCLEO. Použití mikrokontroléru na vývojové desce výrazně usnadní práci se zařízením, zejména při zapojování úloh na kontaktním poli.

Kapitola 2

Rozbor zadání

Jak již bylo řečeno v úvodu, cílem tohoto projektu je vytvořit nástroj pro měření statických charakteristik obvodů s polovodičovými prvky. Pro měření těchto charakteristik je potřeba nastavovat vstupní veličiny a měřit výstupní veličiny obvodu. V laboratořích se tato měření provádí s nastavitelnými zdroji napětí a laboratorními multimetry. Toto vybavení je ovšem nákladné a studentům málo dostupné. Dalším problémem je to, že měření s laboratorním vybavením se složitě automatizuje, což vede k tomu, že student změří charakteristiku v malém množství bodů.

V tomto projektu budou tedy tyto laboratorní přístroje nahrazeny vývojovým kitem s mikrokontrolérem STM32F303RE, který má integrované digitálně analogové a analogově digitální převodníky. Tyto převodníky nahradí nastavitelné zdroje napětí, respektive voltmetry. Tento přístup samozřejmě přináší jistá omezení, která bude nutné analyzovat a navrhnout řešení. Další výhodou použití mikrokontroléru je možnost jednoduché automatizace měření, která měření charakteristik zjednoduší a hlavně výrazně zrychlí.

Většina charakteristik je uváděna jako graf závislosti výstupní veličiny na vstupní. Z tohoto důvodu bude zapotřebí vytvořit PC aplikaci, která bude sloužit pro komunikaci s uživatelem. Uživatel bude zadávat požadované hodnoty vstupních veličin a následně mu bude vykreslen graf změřené charakteristiky.

2.1 Měření charakteristik

Úkolem je navrhnout metodu měření charakteristik polovodičových součástek. Polovodičovými součástkami jsou v tomto případě myšleny hlavně analogové elektronické součástky, jako diody tranzistory a operační zesilovače. Diody jsou obvykle charakterizovány voltampérovými charakteristikami. U tranzistorů je důležitá znalost převodní a výstupní charakteristiky. Při práci s operačními zesilovači nás zajímá zejména rozsah výstupního napětí.

Při měření těchto charakteristik je zapotřebí nastavovat vstupní veličiny obvodu. K tomu slouží DA převodník. Při měření některých charakteristik je nutné nastavovat dva vstupní parametry obvodu. Zvolený mikrokontrolér má dvoukanálový DA převodník, tudíž bude možné měřit i tyto charakteristiky.

Jak již jsem zmínil výše, součástí mikrokontroléru jsou čtyři analogově digitální převodníky. Tyto převodníky mají multiplexované vstupy, takže jeden převodník může měřit napětí až na 16 kanálech. Pro potřeby tohoto projektu bude stačit měřit čtyři různá napětí. Bohužel není možné použít pouze jeden AD převodník, jelikož na vybraných pinech zvoleného mikrokontroléru dochází ke konfliktu funkcí. Budou tedy

použity dva převodníky.

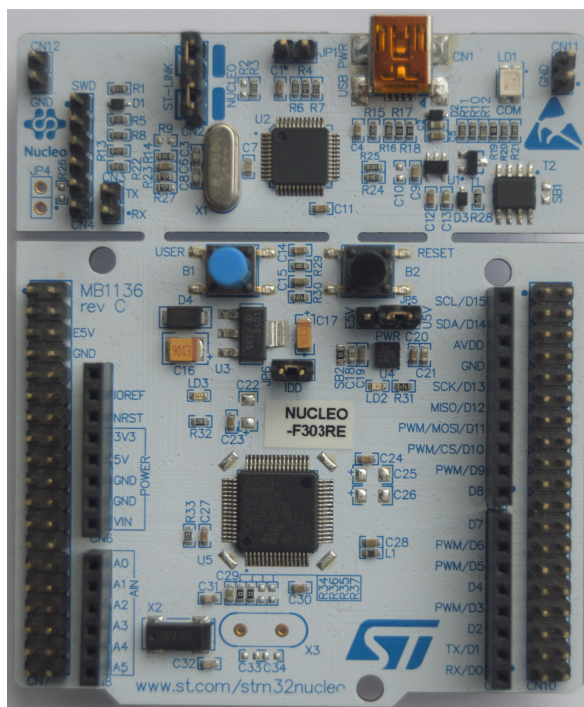
Vývojový kit budu tedy používat jako čtyřkanálový voltmetr a dvoukanálový nastavitelný zdroj napětí. Mikrokontrolér bude možné provozovat v manuálním nebo automatické režimu. V manuálním režimu bude mikrokontrolér nahrazovat laboratorní přístroje, ale měření bude probíhat stále manuálně. Uživatel bude tedy ručně nastavovat výstupní napětí a odečítat měřená napětí. V automatickém režimu bude měření řízeno aplikací na nadřazeném PC, ve které budou také prezentovány výsledky. Pro automatická měření jsou navrženy měřicí procedury pro vybrané charakteristiky.

2.2 Použitý vývojový kit s mikrokontrolérem

Na základě doporučení vedoucího práce jsem se v tomto projektu rozhodl použít vývojový kit **NUCLEO-F303RE**, jehož fotografie je na obrázku 2.1. Tento kit se na fakultě při výuce už v několika kurzech používá a je tedy široce dostupný. Mikrokontrolér **STM32F303RE** osazený na zvoleném vývojovém kitu obsahuje řadu periférií. Pro účely tohoto projektu jsou důležité následující:

- čtyři multiplexované aproximační 12 bitové AD převodníky
- dvoukanálový 12 bitový DA převodník
- sériové komunikační rozhraní USART.

Součástí vývojového kitu je také zařízení ST-Link, které obsahuje USB-USART převodník, který umožňuje komunikaci mikrokontroléru s PC. Na vývojovém kitu jsou dostupná napájecí napětí 5 V a 3.3 V, kterými lze napájet měřené obvody a pomocné obvody. Samotný mikrokontrolér je napájen napětím 3.3 V, což omezuje vstupní a výstupní napětí.



Obrázek 2.1: Vývojový kit NUCLEO-F303RE s mikrokontrolérem STM32F303RE

2.3 Omezení mikrokontroléru

Většina omezení zvoleného kitu vyplývá z omezení daného napájecím napětím mikrokontroléru. Na rozsah napájecího napětí je omezeno jak vstupní, tak výstupní napětí.

Pokud nejsou dodrženy limity vstupního napětí, může dojít k poškození procesoru. V kapitole 3 diskutuji možnosti ochrany vstupů a obvodové techniky pro změnu úrovní vstupního napětí.

Výstupní napětí DA převodníku je rovněž omezeno na rozsah 0 V až 3.3 V. DA převodník také vykazuje výstupní odpor přibližně $12.5\text{ k}\Omega$, jak lze vypočítat z jeho zatěžovací charakteristiky na obrázku 3.9. Výrobce tento problém řeší připojením výstupního bufferu (operační sledovač) na výstup DA převodníku. Použitý operační zesilovač nevykazuje příliš dobré vlastnosti, jak diskutuji v kapitole 3, ve které jsou také navržena řešení.

2.4 Řešení omezení mikrokontroléru

Jak jsem zmínil výše, součástí práce bude také návrh obvodových technik na úpravu vstupních a výstupních napětí mikrokontroléru a kompenzaci nedostatků mikrokontroléru. Velká část těchto obvodů obsahuje operační zesilovače. Bude zapotřebí zjistit jaké jsou požadavky na použité operační zesilovače a jejich napájení. Ve většině případů jsou použity tzv. *single supply OZ*, které jsou běžnější v průmyslu, ale obvody pro měření bipolárních obvodů samozřejmě vyžadují symetrické napájení. Hlavními sledovanými parametry jsou linearita přenosu a zatěžovací charakteristika.

2.5 Software

Softwarová vybava tohoto systému se bude sestávat ze dvou částí. Tou první bude firmware (FW) mikrokontroléru, který bude sloužit k inicializaci a obsluze periférií mikrokontroléru. Druhou částí bude aplikace pro nadřazené PC, která bude sloužit k provádění automatických měření charakteristik. Myšlenkové schéma výsledného měřicího systému je na obrázku 2.2.

Pro ověření principu bude firmware nejdříve vytvořen v online vývojovém prostředí `mbed`. Výhodou tvorby firmwaru pro mikrokontroléry v tomto prostředí je to, že není nutné studovat referenční manuály a datasheety, jelikož programování v tomto prostředí není závislé na hardware. Výhodou tohoto přístupu je také to, že je velmi jednoduché převést vytvořený program na jinou platformu (stačí znovu zkompileovat). Nevýhodou je omezený přístup ke konfiguraci procesoru a jeho periférií. To způsobí, že nebude využit plný potenciál mikrokontroléru. Tento firmware bude použit pouze v takzvaném manuálním režimu. V tomto režimu bude komunikace s uživatelem probíhat prostřednictvím terminálové aplikace a uživatel bude ručně volit výstupní napětí a odečítat vstupní napětí.

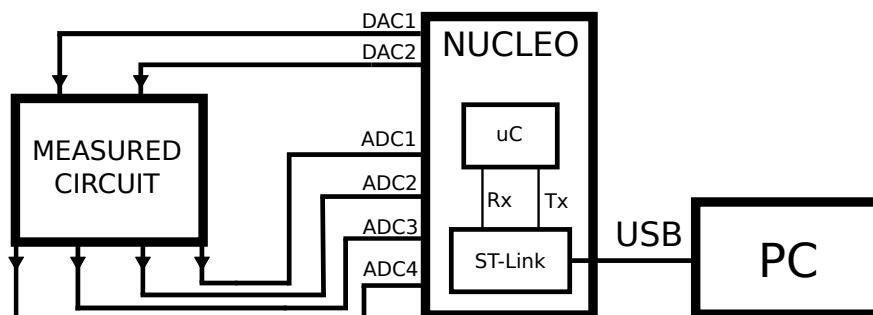
Dalším krokem bude vývoj firmware pomocí standardní sady vývojových nástrojů ve vývojovém prostředí Keil uVision. Vzhledem k tomu, že procesor nebude vykonávat příliš složité úkoly, rozhodl jsem se implementovat firmware bez použití knihoven, jako jsou Hardware Abstraction Layer (HAL) a podobně. Tento přístup znamená, že abych mohl správně inicializovat a obsluhovat procesor, budu muset pečlivě studovat referenční manuál procesoru [1].

Firmware mikrokontroléru bude nabízet dva režimy. První bude již zmíněný manuální režim. V tomto režimu bude uživatel prostřednictvím libovolné terminálové aplikace nastavovat a odečítat napětí. Druhý režim bude takzvaný Automatický. V automatickém režimu bude firmware přijímat příkazy z PC aplikace, prostřednictvím kterých bude aplikace nastavovat požadovaná výstupní napětí a žádat o hodnoty měřených napětí. Mezi těmito režimy bude možné přepínat jednoduchým příkazem, tudíž nebude nutné během měření měnit firmware procesoru.

Až bude vytvořen firmware hotov, bude zapotřebí vytvořit PC aplikaci, která využije Automatický režim firmwaru mikrokontroléru. V této aplikaci budou předdefinovány měřicí procedury pro vybrané charakteristiky. Změřené charakteristiky budou uživateli prezentovány v grafické podobě. Data bude možné z aplikace exportovat pro další zpracování.

2.6 Laboratorní úlohy

Vzhledem k tomu, že výsledek této práce má být použit jako podpůrný nástroj při výuce elektroniky, je vhodné, aby její součástí byla i sbírka úloh. Na těchto úlohách si studenti budou moci ověřit vlastnosti základních polovodičových součástek a zároveň si osvojí práci s měřicím přístrojem. Příkladem takové úlohy je ověření teplotní závislosti prahového napětí diody tak, že student změří její voltampérovou charakteristiku při jejím ochlazování (např. foukáním) a při jejím zahřívání (stačí uchopit prsty).



Obrázek 2.2: Schéma měřicího systému

Kapitola 3

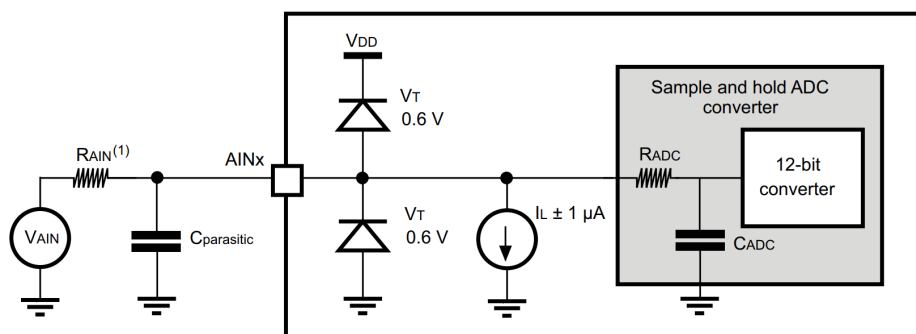
Vlastnosti mikrokontroléru

Použitý vývojový kit je napájen napětím 5 V z USB. Součástí kitu je také regulátor napětí 3.3 V, který zajišťuje napájení procesoru. Obě tato napětí, tedy 5 V a 3.3 V, jsou vyvedena na piny, které mohou být použity pro napájení měřených obvodů. Rozsah napájecího napětí, 0 V až 3.3 V, omezuje vstupní i výstupní napětí procesoru na tento rozsah.

3.1 Omezení vstupních napětí AD převodníku

Rozsah měřeného vstupního napětí je omezen napájecím napětím procesoru na 0 V až 3.3 V. Dle informací dostupných v datasheetu procesoru [2] je minimální hodnota vstupního napětí -0.3 V a maximální 4 V. Toto jsou ovšem hodnoty, při jejichž překročení může dojít k nevratnému poškození procesoru. Toto je způsobeno tím, že při připojení napětí mimo tento rozsah dojde k otevření ochranných diod ve struktuře vstupního pinu, která je na obrázku 3.1, což způsobí zkrat mezi vstupem a napájením.

Rozsah měřeného napětí je tedy 0 V až 3.3 V. Pokud chceme měřit napětí mimo tento rozsah je nutné mařené napětí nejdříve upravit. V následujících několika částech se budu věnovat obvodovým technikám na ochranu vstupu a změnu úrovní vstupních napětí.



Obrázek 3.1: Vstupní struktura AD převodníku, převzato z [2]

3.1.1 Ochrana vstupů před poškozením

Pokud nepotřebujeme měřit napětí mimo rozsah procesoru, stačí omezit proud který by procházel ochrannou diodou, pokud by bylo na vstup AD převodníku omylem

připojeno napětí mimo rozsah 0 V až 3.3 V. Dle datasheetu [2] je tento proud maximálně ± 5 mA. Tento proud lze omezit zapojením rezistoru R_1 mezi vstup procesoru a měřený obvod, jak je naznačeno na obrázku 3.2. Volba odporu tohoto rezistoru závisí na tom, jaké největší napětí může být na vstup přivedeno. Minimální odpor rezistoru R_1 lze určit takto:

$$R_H = \frac{U_{max} - 3.3 \text{ V}}{5 \text{ mA}} \quad (3.1)$$

$$R_L = \frac{U_{min} - 0 \text{ V}}{-5 \text{ mA}} \quad (3.2)$$

$$R_1 \geq \max\{R_H, R_L\}, \quad (3.3)$$

kde U_{max} je nejvyšší napětí v měřeném obvodu a U_{min} je nejnižší napětí.

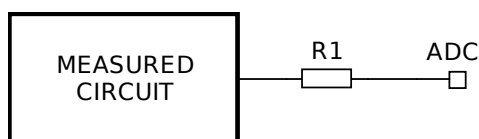
3.1.2 Měření kladných napětí větších než 3.3 V

Pokud chceme měřit kladná napětí větší, než 3.3 V, musíme toto napětí snížit. Nejjednodušší je použít odporový dělič napětí s vhodným dělicím poměrem k_D , jak je naznačeno ve schématu na obrázku 3.3. Pro dělicí poměr k_D platí jednoduchý vztah,

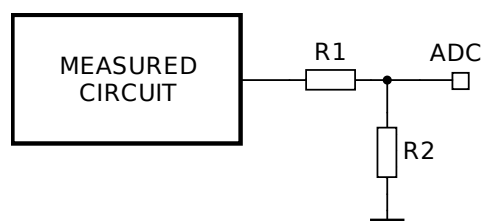
$$k_D = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{3.3 \text{ V}}{U_{max}}, \quad (3.4)$$

kde U_{max} je maximální napětí, které chceme měřit. Při volbě hodnot rezistorů je zapotřebí dbát na to, aby dělič nezatěžoval měřený obvod. Zároveň nesmí být odpor rezistoru R_2 příliš velký, jelikož by byl omezen proud, kterým se přebíjí vzorkovací kondenzátor AD převodníku, více o této problematice v kapitole 5. Vhodné hodnoty odporů jsou řádově jednotky k Ω . Toto snížení napětí je samozřejmě nutné zohlednit při měření a změřené napětí převést takto:

$$U = \frac{U_{ADC}}{k_D}. \quad (3.5)$$



Obrázek 3.2: Ochrana vstupu mikrokontroléru



Obrázek 3.3: Snížení měřeného napětí pomocí odporového děliče

3.1.3 Měření malých napětí

V některých případech jsou měřená napětí naopak oproti rozsahu AD převodníku velmi malá. V takovém případě se může stát, že změna napětí bude menší, než rozlišení AD převodníku, tedy 0.806 mV, a nebude zaznamenána. Můžeme využít zapojení OZ jako neinvertujícího zesilovače s dostatečným zesílením. Například, když budou měřená napětí v rozsahu 0 V až 1 V, je vhodné zvolit zesílení zesilovače 3. Zesílení napětí je nutné zohlednit při interpretaci výsledků.

3.1.4 Měření bipolárních napětí

V mnoha aplikacích, hlavně OZ, se používá symetrické napájení. Aby bylo možné měřit jak záporná tak kladná napětí, je zapotřebí tato napětí posunout a zmenšit tak, aby bylo možné je měřit AD převodníkem procesoru. Příklad takového převodu je na obrázku 3.4. Takový převod lze realizovat pasivním i aktivním obvodem a volba záleží hlavně na tom, do jaké míry můžeme měřený obvod zatěžovat.

Aktivní obvod

Při studiu této problematiky jsem na stránce [4] narazil na jednoduché a elegantní řešení, které v následujících odstavcích popíšu.

Víme, že rozsah vstupního napětí potřebujeme zmenšit tak, aby $U_{max} - U_{min} = 3.3\text{ V}$ a následně jej ještě posuneme, aby $U_{max} = 0\text{ V}$. Z těchto požadavků můžeme sestavit přenosovou funkci hledaného obvodu:

$$U_{out} = G \cdot U_{in} + U_{off} \quad (3.6)$$

$$G = \frac{3.3\text{ V}}{U_{max} - U_{min}} \quad (3.7)$$

$$U_{off} = -U_{min} \cdot G \quad (3.8)$$

Z tohoto přenosu je již patrné, že hledaným zapojením je neinvertující sčítací zesilovač s OZ, jehož zapojení je na obrázku 3.5a. Tento obvod má přenos

$$U_{out} = \left(U_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_{off} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right). \quad (3.9)$$

Dosadíme-li do přenosové funkce (3.9) hraniční hodnoty rozsahu vstupu a výstup, dostaneme následující soustavu dvou lineárních rovnic:

$$U_{out,min} = \left(U_{in,min} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_{off} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \quad (3.10)$$

$$U_{out,max} = \left(U_{in,max} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_{off} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \quad (3.11)$$

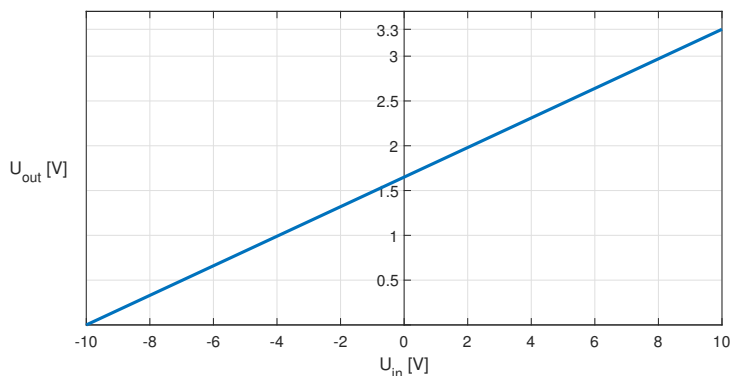
Za předpokladu, že $U_{out,min} = 0\text{ V}$, můžeme z rovnice (3.10) odvodit

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.12)$$

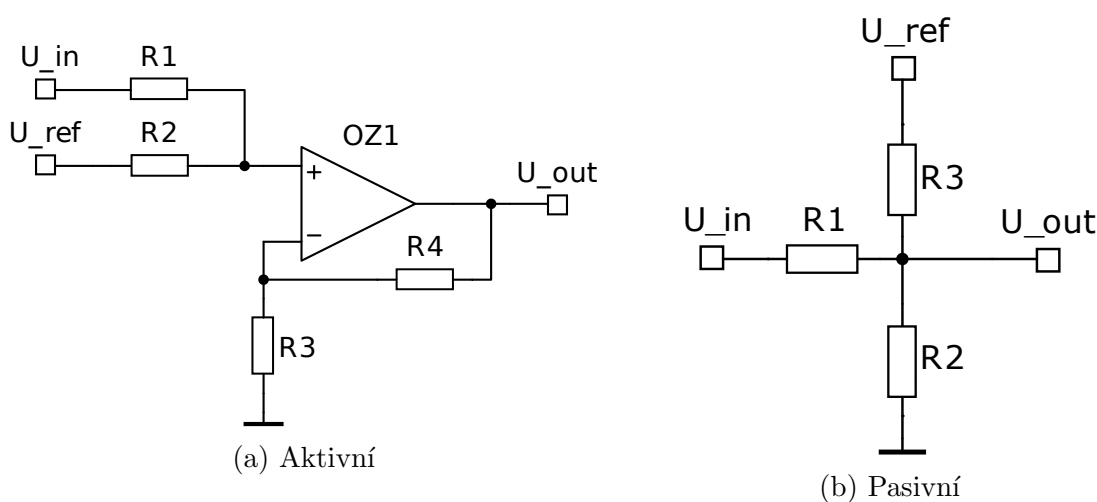
Dosazením vztahu (3.12) do rovnice (3.11) a jejím vyřešením získáme vztah

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{U_{in,max} - U_{off}}{U_{out,max}} = \frac{U_{in,max} + U_{out,min} \cdot G}{U_{out,max}}. \quad (3.13)$$

Ze vztahu (3.13) tedy vypočteme poměry použitých rezistorů. Dva ze čtyř rezistorů můžeme volit libovolně a zbylé dva vybereme tak, aby byl dodržen vypočtený poměr. Hodnoty rezistorů volíme tak, aby měl obvod dostatečně velký vstupní odpor, tedy řádově jednotky až desítky $k\Omega$.



Obrázek 3.4: Převodní charakteristika obvodu pro převod bipolárních napětí na unipolární



Obrázek 3.5: Obvody pro převod bipolárních napětíových úrovní na unipolární

Pasivní obvod

Funkci převodu bipolárních napětí na unipolární lze realizovat i čistě pasivním obvodem. Stačí k tomu tři rezistory zapojené dle schématu na obrázku 3.5b. Pro přenos tohoto obvodu platí následující vztah:

$$U_{out} = \frac{R_2(R_3U_{in} + R_1U_{ref})}{R_1R_2 + R_2R_3 + R_1R_3} \quad (3.14)$$

Dosažením minimálních a maximálních hodnot vstupního a výstupního napětí, získáme soustavu dvou rovnic o třech neznámých. Hodnotu rezistoru R_1 můžeme zvolit libovolně a zbylé dvě dopočítáme. Řešením soustavy získáme následující vztahy:

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{GU_{ref}}{GU_{in,max} - U_{out,max} + U_{ref} - GU_{off}} \quad (3.15)$$

$$R_3 = R_1 \cdot \frac{GU_{ref}}{U_{out,min} - GU_{in,min}} \quad (3.16)$$

Z těchto vzorců lze také odvodit vztah pro minimální hodnotu U_{ref} :

$$U_{ref} \geq \frac{GU_{in,max} - U_{out,max}}{G - 1} \quad (3.17)$$

Pokud vyjdou záporné hodnoty rezistorů, je zapotřebí změnit vstupní parametry, často pomůže změnit U_{ref} . V tabulce 3.1 jsou předpočítané hodnoty rezistorů pro převod různých napěťových úrovní na rozsah 0 V až 3.3 V s použitím $U_{ref} = 3.3$ V. Hodnoty jsou uvedeny v poměru k rezistoru R_1 , který volíme libovolně.

$U_{in,min}$ [V]	$U_{in,max}$ [V]	R_2/R_1	R_3/R_1
-3.3	3.3	není	1
-5	5	1.94	0.66
-10	10	0.49	0.33
-12	12	0.14	0.275
-15	15	0.28	0.22

Tabulka 3.1: Poměry rezistorů pro převod vybraných bipolárních napětí

3.2 Vlastnosti DA převodníku

Při měření jsou vstupní veličiny měřeného obvodu nastavovány pomocí DA převodníků. Aby bylo možné nastavovat tyto veličiny přesně a spolehlivě je zapotřebí znát chování výstupu DA převodníku jako zdroje napětí. Výstupní napětí jsou stejně jako vstupní omezena napájecím napětím na rozsah 0 V 3.3 V. Všechna měření uvedená v této kapitole byla prováděna na kanálu 1 DA převodníku.

3.2.1 Změna rozsahu výstupního napětí

Pokud chceme nastavovat napětí mimo rozsah 0 V až 3.3 V, je zapotřebí napěťové úrovně patřičným způsobem změnit. Pro větší výstupní napětí stačí napětí zesílit, naopak pro nižší výstupní napětí je potřeba napětí snížit. Pokud by je měřené napětí bipolární, je nutné ho nejdříve posunout a následně zmenšit jeho rozsah. Všechny změny napětí je nutné zohlednit při interpretaci výsledků.

Kladná napětí větší než 3.3 V

Pro zvýšení výstupního napětí je nejjednodušší použít operační zesilovač v zapojení neinvertující zesilovač s odpovídajícím zesilovacím činitelem, jehož schéma na obrázku 3.6. Zesilovací činitel lze vypočítat takto:

$$A_1 = \frac{U_{max}}{3.3 \text{ V}} \quad (3.18)$$

$$A_1 = \frac{R_1}{R_2} + 1, \quad (3.19)$$

kde U_{max} je maximální požadované výstupní napětí.

Operační zesilovač musí být napájen dostatečně velkým napětím na to, aby pokryl požadovaný rozsah napětí. Pokud je použit *rail to rail* OZ, stačí napájení ze stejného napětí, jako je maximální požadovaný výstup. Pokud je použit obyčejný OZ je potřeba napětí vyšší.

Malá napětí

Chceme-li nastavovat napětí, které je menší než 3.3 V, můžeme na výstup DA převodníku připojit odporový dělič napětí stejně, jako při snižování vstupního napětí. Tímto přístupem také zlepšíme rozlišení výstupu. Při výběru hodnot rezistorů v děliči je potřeba dbát na to, aby nebyl výstup DAC příliš zatížen. Pokud by měl být výstup děliče zatěžován, je vhodné přidat na jeho výstup OZ jako sledovač a impedančně tak oddělit výstup děliče a měřený obvod.

Bipolární napětí

Je-li zapotřebí nastavovat bipolární napětí, musí být použit obvod pro změnu úrovní z unipolárních na bipolární. Potřebujeme, aby takový obvod měl přenos

$$U_{out} = GU_{in} + U_{out,min}, \quad (3.20)$$

kde $G = \frac{\Delta U_{out}}{\Delta U_{in}}$ a $U_{out,min}$ je nejmenší výstupní napětí, které odpovídá $U_{in} = 0$ V. Těmto požadavkům odpovídá rozdílový zesilovač, jehož zapojení je na obrázku 3.7. Přenos tohoto obvodu je následující:

$$U_{out} = \left(\frac{R_4}{R_3} + 1 \right) \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{in} - \frac{R_4}{R_3} U_{ref}. \quad (3.21)$$

Porovnáním vztahů (3.20) a (3.21) získáme následující vztahy pro výpočet hodnot použitých rezistorů.

$$\frac{R_4}{R_3} = - \frac{U_{out,min}}{U_{ref}} \quad (3.22)$$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{G}{\frac{R_4}{R_3} + 1} \quad (3.23)$$

Hodnoty rezistorů R_1 a R_3 zvolíme libovolně a zbytek dopočteme následovně

$$R_4 = - \frac{U_{out,min}}{U_{ref}} R_3 \quad (3.24)$$

$$R_2 = \frac{GR_1}{\frac{R_4}{R_3} + 1 - G}. \quad (3.25)$$

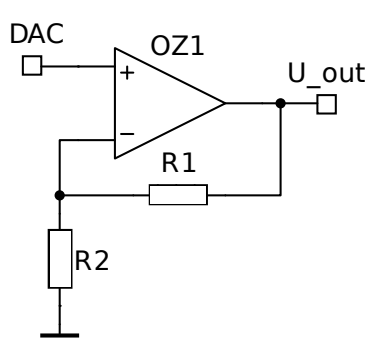
Ze vztahu (3.25) můžeme také odvodit podmínku pro použitelné řešení,

$$G \leq 1 + \frac{R_4}{R_3}. \quad (3.26)$$

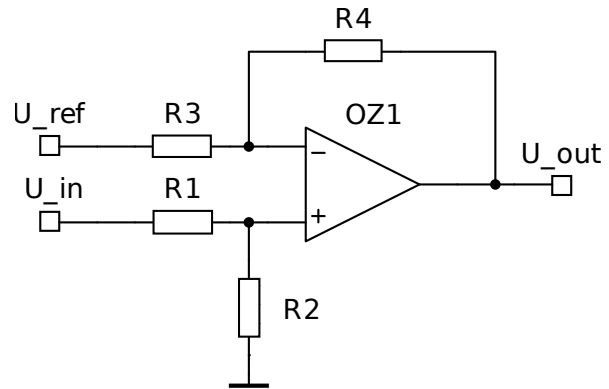
Pokud vyjde hodnota $R_1 = 0 \Omega$, znamená to, že rezistor R_1 nepotřebujeme a rezistor R_2 také ne. Jako napětí lze použít 3.3 V, popřípadě z něj pomocí odporového děliče získat vytvořit nižší.

3.2.2 Zatěžovací charakteristika - current source

Výstup DA převodníku chci používat jako zdroj napětí. Bohužel se nechová jako ideální zdroj napětí, a proto je potřeba znát jeho zatěžovací charakteristiku. Samotný



Obrázek 3.6: Zesílení výstupního napětí DA převodníku pomocí neinvertujícího zesilovače



Obrázek 3.7: Obvod pro převod unipolárního napětí na bipolární

DA převodník má příliš vysoký výstupní odpor, a proto výrobce na jeho výstup přidal výstupní buffer.

Nejdříve jsem měřil zatěžovací charakteristiku DA převodníku s vypnutým výstupním bufferem, kterou jsem měřil tak, jak je naznačeno ve schématu na obrázku 3.8. Postupně jsem měnil hodnotu R_1 a pozoroval změnu výstupního napětí DA převodníku v závislosti na výstupním proudu. Změřená zatěžovací charakteristika je na obrázku 3.9.

Ze změřené výstupní charakteristiky můžeme vypočítat výstupní odpor převodníku, který je přibližně $12.5\text{ k}\Omega$. Vzhledem k tomu, že se jeho hodnota s výstupním napětím nemění, jedná se nejspíše o převodník s rezistorovou sítí R-2R s napěťovým výstupem, jejíž schéma je na obrázku 3.10. Změřený výstupní odpor je pro buzení obvodů příliš velký a jak je vidět ze zatěžovací charakteristiky, už při odběru několika μA začíná výstupní napětí klesat. Z tohoto důvodu je na výstupu DA převodníku výstupní buffer (operační sledovač), který snižuje výstupní impedanci převodníku. Struktura výstupu je na obrázku 3.12a.

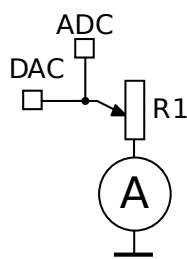
Tento buffer lze pomocí softwaru procesoru aktivovat či deaktivovat. Aktivoval jsem tedy výstupní buffer DA převodníku a opět změřil jeho zatěžovací charakteristiku, stejným způsobem jako bez bufferu. Změřená charakteristika je na obrázku 3.11 a můžeme z ní určit výstupní odpor R_1 použitého OZ, který je přibližně $160\ \Omega$. Tento odpor se projeví až ve chvíli, kdy zpětná vazba nedokáže kompenzovat úbytek napětí v důsledku výstupního odporu. Na obrázku 3.12b je tento výstupní odpor zakreslen ve výstupní struktuře DA převodníku.

Řešení

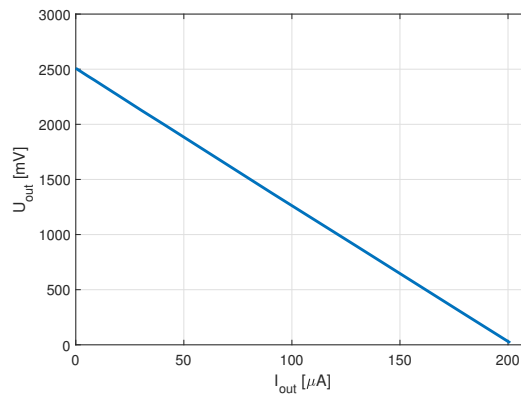
Problém dodávání dostatečného proudu lze vyřešit pomocí vhodného zapojení s operačním zesilovačem.

Pokud potřebujeme proud do $\sim 20\text{ mA}$, stačí použít běžně dostupný operační zesilovač (např. LM324) zapojený jako neinvertující zesilovač. Požadované vlastnosti použitých OZ jsou dále diskutovány v kapitole 4.

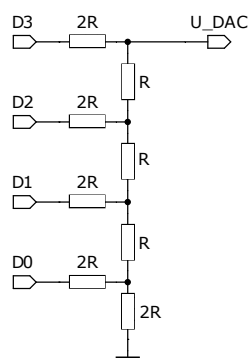
Jestliže jsou požadovány větší proudy, je vhodné použít zapojení OZ a tranzistoru jako řízeného zdroje napětí, které je na schématu na obrázku 3.13. Při použití tohoto zapojení je třeba dbát na maximální povolený proud kolektorem tranzistoru, jelikož by mohlo dojít k jeho poškození. Použitý tranzistor by měl mít pokud možno, co nejmenší



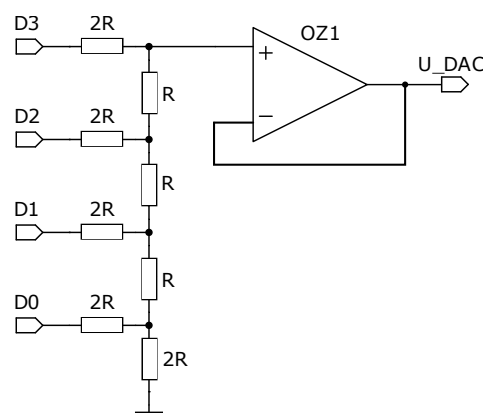
Obrázek 3.8: Měření zatěžovací charakteristiky DAC



Obrázek 3.9: Zatěžovací charakteristika DAC s vypnutým bufferem



(a) Bez bufferu



(b) S bufferem

Obrázek 3.10: Struktura R-2R použitá v DA převodníku

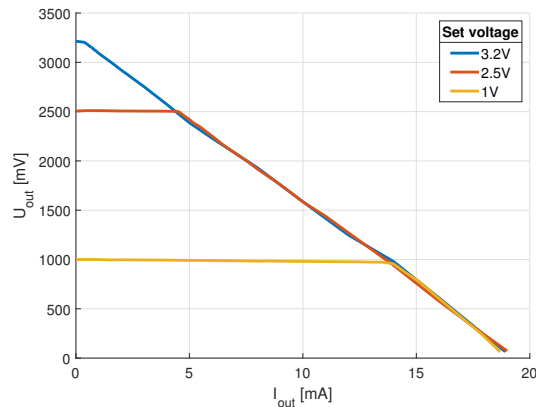
saturační napětí kolektor emitor, jelikož omezuje výstupní napětí. Tento nedostatek lze eliminovat použitím většího napájecího napětí U_{CC} , například 5 V.

Pokud v tomto zapojení zařadíme do zpětnovazební smyčky odporový dělič napětí, zvětšíme tím rozsah výstupního napětí, jak je uvedeno v sekci 3.2.1.

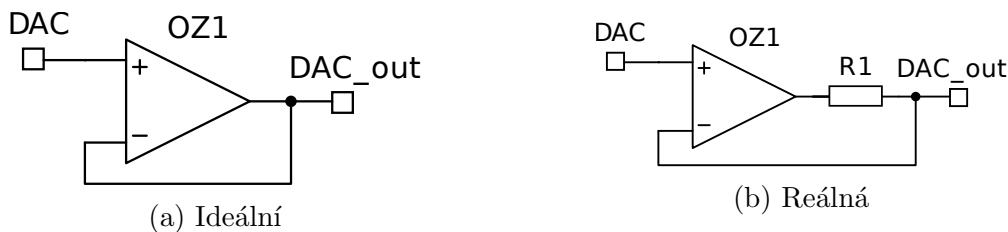
3.2.3 Zatěžovací charakteristika - current sink

Při měření některých charakteristik, například převodní charakteristiky PNP tranzistoru, je potřeba, aby proud vtékal do výstupu DA převodníku (tzv. *sink current*). Z tohoto důvodu jsem měřil i závislost výstupního napětí na vstupním proudu. Na výstup DA převodníku se zapnutým výstupním bufferem jsem připojil potenciometr, jak je nakresleno ve schématu 3.14. Graf změřené charakteristiky je na obrázku 3.15.

Na charakteristice je vidět, že když do výstupu teče proud větší než 5 mA, začíná výstupní napětí prudce narůstat. Toto je s největší pravděpodobností způsobeno zaškrcením kanálu N-MOS tranzistoru, který je mezi výstupem OZ a zemí, což způsobuje prudký nárůst jeho odporu.



Obrázek 3.11: Zatěžovací charakteristika DA převodníku se zapnutým výstupním bufferem



Obrázek 3.12: Náhradní schéma výstupního bufferu DA převodníku

Řešení

Pokud potřebujeme z obvodu odebírat proudy větší než $\sim 0.5 \text{ mA}$, nabízí se opět použít OZ zapojený jako sledovač, popřípadě neinvertující zesilovač. Bohužel, pokud je zesilovač tzv. *single supply*, projevuje se u něj, stejně jako u vnitřního bufferu, výstupní odpor a s rostoucím proudem výstupní napětí výrazně narůstá. Příklady tohoto chování jsou v kapitole 4. Tento problém lze vyřešit tím, že použijeme symetricky napájený OZ.

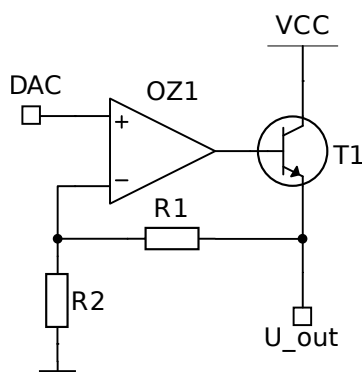
3.2.4 Linearita převodu DA převodníku

Při měření potřebujeme nastavovat výstupní napětí DA převodníku v plném rozsahu 0 V až 3.3 V. Abych ověřil zda, je to s použitým mikrokontrolérem možné, změřil jsem převodní charakteristiku DA převodníku. Charakteristiku jsem měřil s výstupním bufferem zapnutým i vypnutým, změřené charakteristiky jsou na obrázcích 3.16 a 3.17.

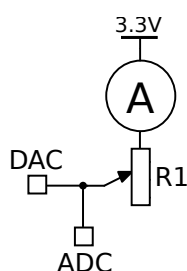
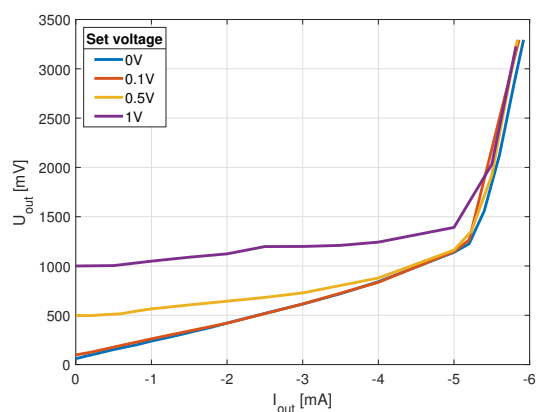
Jak je vidět na charakteristice na obrázku 3.17, pokud je zapnut výstupní buffer, projevuje se v krajních mezích napěťového rozsahu nelinearita bufferu. Detaily této nelinearity jsou na obrázcích 3.18a a 3.18b. Když je buffer vypnut, je charakteristika lineární v celém výstupním rozsahu. Toho využijeme při návrhu řešení.

Řešení

Jako nejjednodušší řešení nelinearity výstupního bufferu se nabízí použití pull-down, respektive pull-up rezistorů v závislosti na požadavcích měření. Odpor rezistoru je nutné zvolit takový, aby příliš nezatěžoval výstup převodníku. Změřil jsem převodní charakteristiku DA převodníku se zapnutým výstupním bufferem. Změřené charakteristiky



Obrázek 3.13: Napětím řízený zdroj napětí s OZ a tranzistorem

Obrázek 3.14: Měření zatěžovací charakteristiky DAC v režimu *current sink*Obrázek 3.15: Zatěžovací charakteristika DAC v režimu *current sink*

jsou na obrázcích 3.19 a 3.20. Jak je z těchto charakteristik vidět, přístup s použitím rezistorů nepřináší zásadní zlepšení a zároveň zavádí další omezení v podobě zvýšeného zatížení výstupu převodníku.

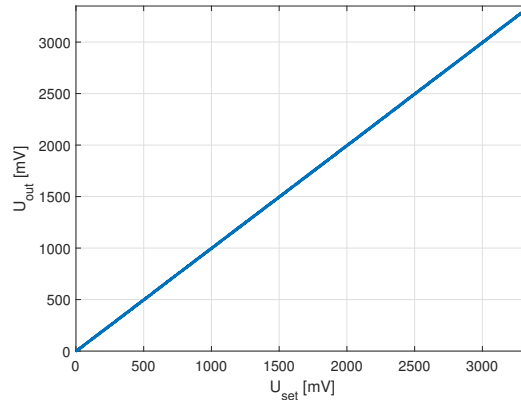
Při pohledu na charakteristiku převodu s vypnutým bufferem na obrázku 3.16 je vidět, že je lineární v celém výstupním rozsahu. Nelinearity výstupního bufferu lze tedy odstranit tak, že se vypne a nahradí se externím bufferem s OZ. Pokud jako externí buffer použijeme *rail to rail* OZ napájený z napětí většího než 3.3 V (např. 5 V), bude výstup v rozsahu 0 V až 3.3 V lineární a bude mít dostatečně nízký výstupní odpor na to, aby bylo možné z něj napájet měřený obvod.

Pokud potřebujeme zdroj napětí 0 V nebo 3.3 V, můžeme s výhodou využít pin v režimu digitálního režimu. Použití pinu v tomto režimu jsou diskutována v části 3.3.

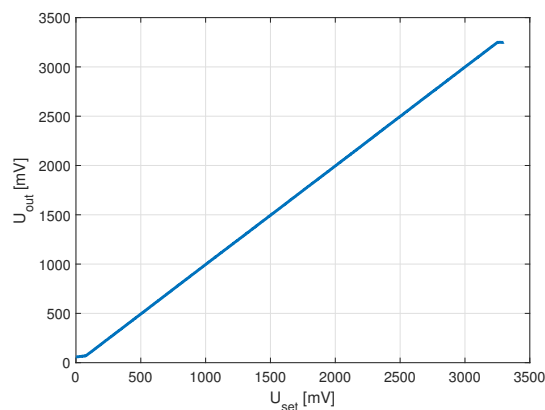
3.2.5 Kanál 2 DA převodníku

Jak jsem již zmínil, měření v této kapitole jsem prováděl pouze pro kanál 1 DA převodníku. Je tomu tak ze dvou důvodů. Tím prvním je, že integrovaný výstupní buffer druhého kanálu nelze v mikrokontroléru deaktivovat. Druhým důvodem je to, že k výstupu druhého kanálu DA převodníku je paralelně připojena zelená LED, která výstup zatěžuje. Nelinearita převodní charakteristiky na obrázku 3.21, odpovídá zatěžovací charakteristice na obrázku 3.11.

Z tohoto důvodu jsem při návrhu měřících procedur upřednostňoval kanál 1 a druhý



Obrázek 3.16: Převodní charakteristika DA převodníku s vypnutým bufferem



Obrázek 3.17: Převodní charakteristika DA převodníku se zapnutým bufferem

kanál je používán pro nekritické části měření.

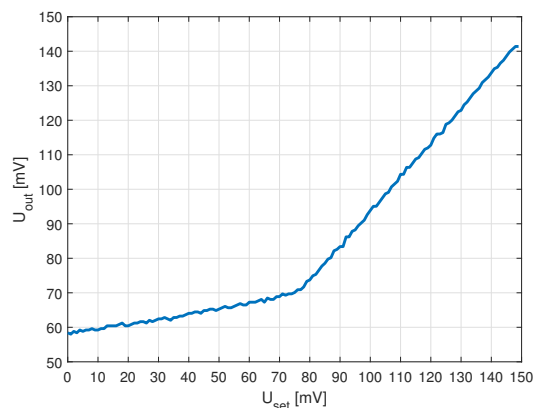
3.3 Pin v digitálním režimu

V předchozí části jsem popisoval použití DA převodníku jako nastavitelného zdroje napětí. Pokud jsou při měření potřeba pouze napětí 0 V a 3.3 V, mohou být jako zdroje těchto napětí využity piny procesoru v režimu digitální výstup.

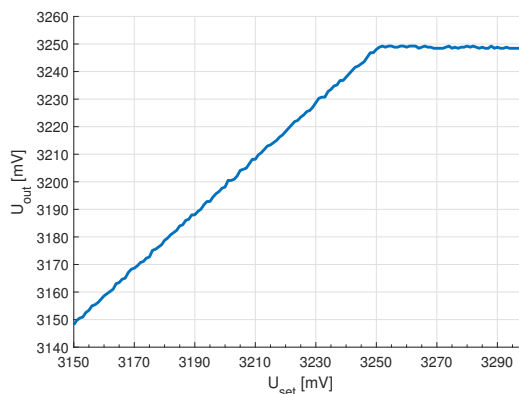
V tomto režimu je možno volit mezi dvěma úrovněmi. V logické 0 se výstup procesoru chová jako zdroj napětí 0 V s vnitřním odporem $\sim 25 \Omega$, jak je vidět na zatěžovací charakteristice na obrázku 3.22a. Je-li logická úroveň 1, chová se výstup jako zdroj napětí 3.3 V s vnitřním odporem $\sim 25 \Omega$, který lze vypočítat ze zatěžovací charakteristiky na obrázku 3.22b. Pro pin v digitálním režimu je maximální povolený proud ± 25 mA. Charakteristiky jsem měřil stejně, jako zatěžovací charakteristiky DA převodníku v sekci 3.2.

Pin procesoru lze během měření přepínat mezi analogovým a digitálním režimem. Toto lze využít při ověřování principu superpozice.

3. Vlastnosti mikrokontroléru

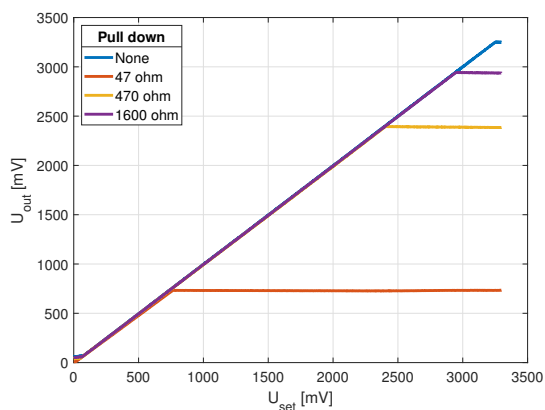


(a) Dolní limit

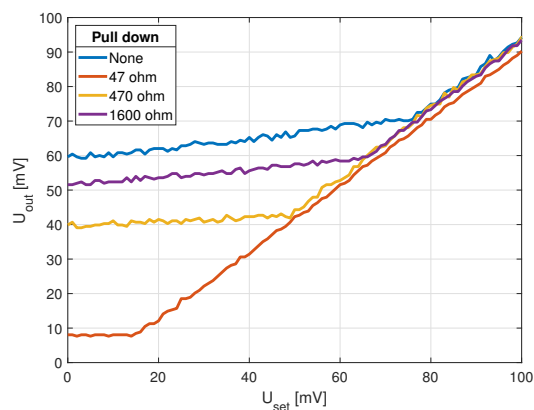


(b) Horní limit

Obrázek 3.18: Detaily nelinearit převodu DA převodníku se zapnutým bufferem

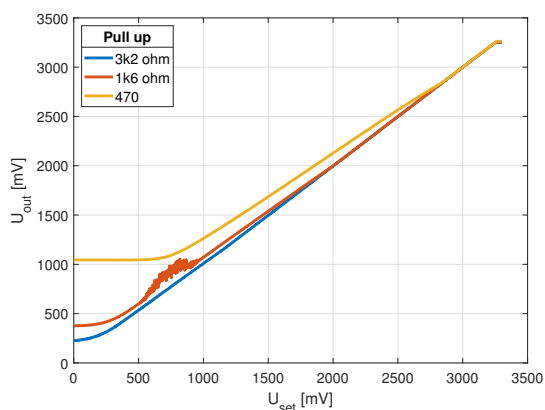


(a) Charakteristika

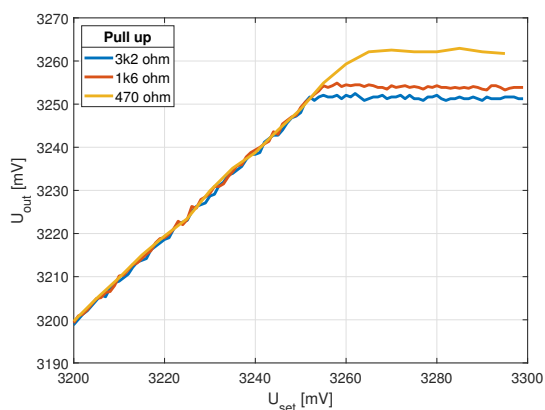


(b) Detail

Obrázek 3.19: Převodní charakteristika DA převodníku se zapnutým bufferem a pull-down rezistorem

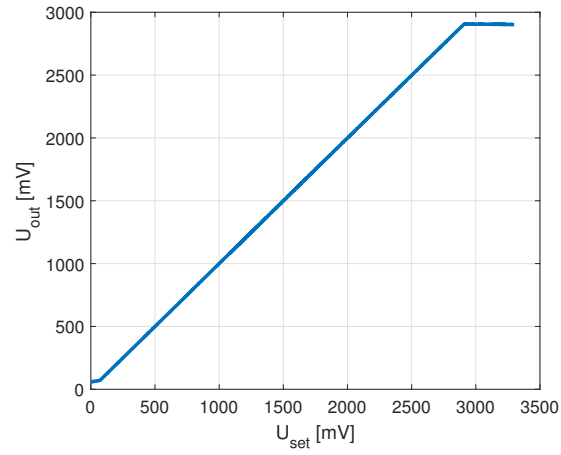


(a) Charakteristika

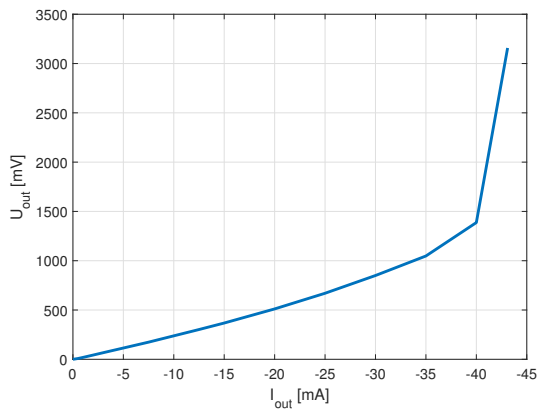


(b) Detail

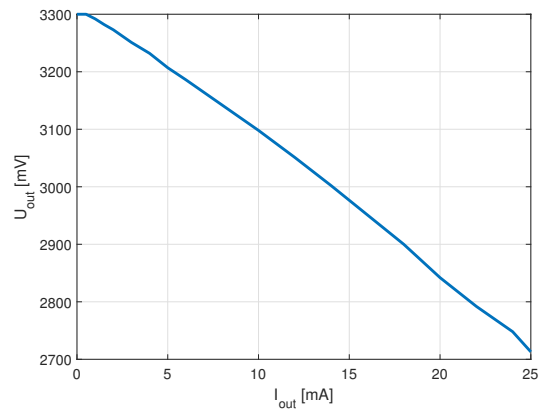
Obrázek 3.20: Převodní charakteristika DA převodníku se zapnutým bufferem a pull-up rezistorem



Obrázek 3.21: Vliv paralelní LED na převodní charakteristiku kanálu 2 DA převodníku



(a) Zdroj 0 V (logická 0)



(b) Zdroj 3.3 V (logická 1)

Obrázek 3.22: Zatěžovací charakteristiky pinu v režimu digitálním režimu

Kapitola 4

Vlastnosti použitých operačních zesilovačů

V kapitole 3 je ve většině navrhovaných obvodů použit operační zesilovač. V této kapitole rozeberu požadavky na vlastnosti operačních zesilovačů použitých při měření. Soustředím se budu hlavně na tzv. *single supply* OZ, jelikož na NUCLEO kitu není k dispozici záporné napájení a jejich aplikace v průmyslu je mnohem běžnější.

K dispozici jsem měl různé typy OZ:

- Texas Instruments LM324AN [7]
- STMicroelectronics TS274 [8]
- Microchip MCP6002 [9].

Každý z těchto OZ má odlišnou vnitřní strukturu a tedy i jiné vlastnosti. Není-li uvedeno jinak, OZ je napájen napětím 5 V.

4.1 Vstupní napěťový offset

Vstupní napěťový offset operačního zesilovače (dále jen "offset") je napětí, které při nulovém napětí mezi vstupy vyvolá nenulové napětí na výstupu. Dle datasheetů je offset všech použitých OZ maximálně jednotky mV. Rozhodl jsem se tyto hodnoty ověřit a vstupní napěťové offsety jednotlivých OZ jsem změřil a hodnoty zanesl do tabulky 4.1, kde jsou porovnány s typickými hodnotami z datasheetů.

Vstupní napěťový offset se běžně měří tak, že se oba vstupy zesilovače připojí na zem. Offset může mít kladnou i zápornou polaritu a je tedy nutné, aby byl při tomto měření OZ napájen symetricky. Pokud je OZ napájen unipolárně, záporný napěťový offset se při takovém měření neprojeví. Z tohoto důvodu jsem měření prováděl na OZ s posunutou nulou, což jsem udělal tak, jak je na schématu na obrázku 4.1. Ze změřeného napětí U_1 jsem poté vypočetl vstupní napěťový offset takto:

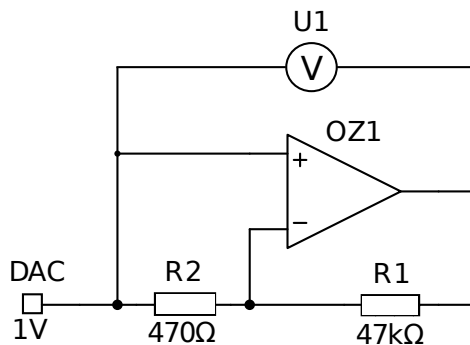
$$U_{off,meas} = \frac{U_1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} = \frac{U_1}{101}. \quad (4.1)$$

Řešení

Vzhledem k tomu, že při měření jsou obvykle použity malé zesilovací činitele (jednotky až desítky), není zkrácení výsledků měření nijak zásadní. Pokud bychom přeci jenom chtěli eliminovat vliv napěťového offsetu, stačí jej změřit a od výsledku s patřičným zesílením odečíst.

OZ	$U_{off,dat}$ [mV]	$U_{off,meas}$ [mV]
LM324AN	2	0.74
TS274	1.1	-0.73
MCP6002	± 4.5	-0.90

Tabulka 4.1: Vstupní napěťový offset OZ - změřené hodnoty a hodnoty z datasheetů



Obrázek 4.1: Schéma pro měření výstupního napěťového offsetu OZ

4.2 Přenosová charakteristika

Vzhledem tomu, že operační zesilovače jsou často používány k zesílení výstupního napětí DA převodníku a následnému buzení měřeného obvodu, potřebujeme znát přenosovou charakteristiku použitého OZ. Skryté nelinearity přenosu zesilovače by způsobily změnu nastavovaného napětí, což by mohlo změnit výsledek měření.

Vzhledem k tomu, že se jedná o stejnosměrný přenos, omezují ho dva základní parametry.

Tím prvním je *common mode input voltage*. Tento parametr udává rozsah vstupního napětí zesilovače, které vyvolá reakci na výstupu. V tomto ohledu je nejlepší OZ MCP6002, jelikož jeho *common mode voltage* pokrývá celý rozsah napájecího napětí [9]. Vliv tohoto parametru lze omezit tak, že nastavíme takové zesílení, aby vstupní napětí bylo v přípustném rozsahu a přitom byl pokryt požadovaný rozsah výstupního napětí.

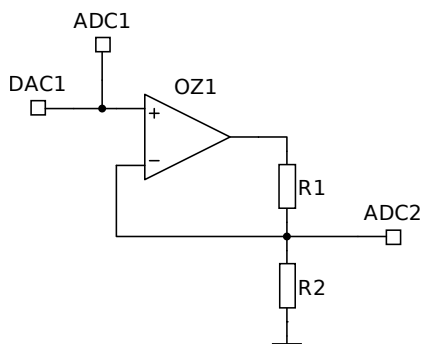
Druhým parametrem omezujícím přenos OZ, je rozsah výstupního napětí. Ten je obvykle omezen napájecím napětím a výstupní strukturou zesilovače.

Přenosovou charakteristiku operačních zesilovačů jsem měřil na neinvertujícím zesilovači se zesílením 2 ($R_1 = R_2$), jak je na schématu na obrázku 4.2. Porovnání změřených přenosových charakteristik je na obrázku 4.3.

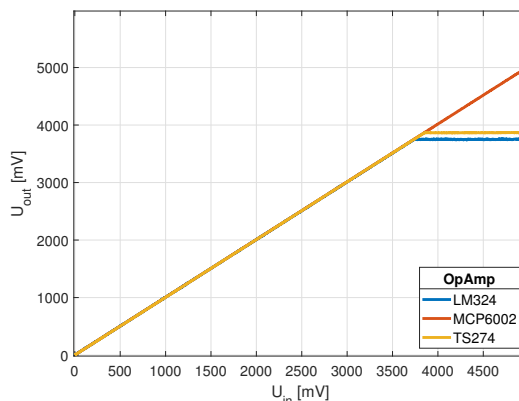
Jak je vidět z tohoto porovnání, všechny tři OZ jdou poměrně dobře k 0 V, ale pouze MCP6002 jde i k 5 V, tedy napájení. To je způsobeno tím, že na rozdíl od zbylých dvou je MCP6002 typu *rail to rail*. Tyto charakteristiky ovšem platí pro nezátížené OZ. V další části, tedy prozkoumám vlastnosti OZ jako zdrojů napětí.

4.3 Zatěžovací charakteristika

V kapitole 3 jsem navrhl několik řešení s použitím operačního zesilovače jako zdroje napětí. Je tedy potřeba ověřit chování operačních zesilovačů jako budičů obvodů s nízkou vstupní impedancí.



Obrázek 4.2: Měření převodní charakteristiky OZ



Obrázek 4.3: Porovnání přenosu operačních zesilovačů

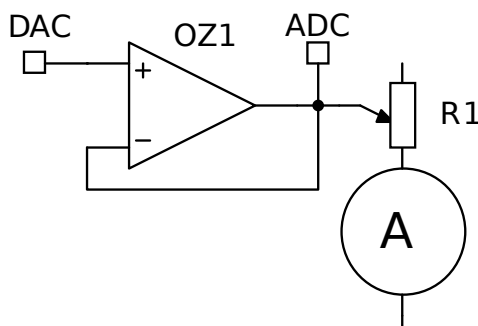
4.3.1 Operační zesilovač v režimu Current source

Při měření se budou velmi často operační zesilovače používat pro buzení měřených obvodů a bude z nich tedy odebírán proud. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí změřit zatěžovací charakteristiky použitých OZ.

Charakteristiky jsem měřil na zapojení na obrázku 4.4 s OZ napájeným z 5 V. Postupně jsem snižoval odpor potenciometru a sledoval závislost výstupního napětí na výstupním proudu. Změřené charakteristiky jsou na obrázku 4.5.

Z tohoto měření vychází jako nejlepší operační zesilovač LM324, neboť dodává největší proud, než začne výstupní napětí zesilovače klesat. Zesilovač TS274 má charakteristiku velmi podobnou výstupnímu bufferu mikrokontroléru. V kombinaci s tím, že oboje pochází od stejného výrobce to napovídá, že je použita podobná vnitřní struktura OZ.

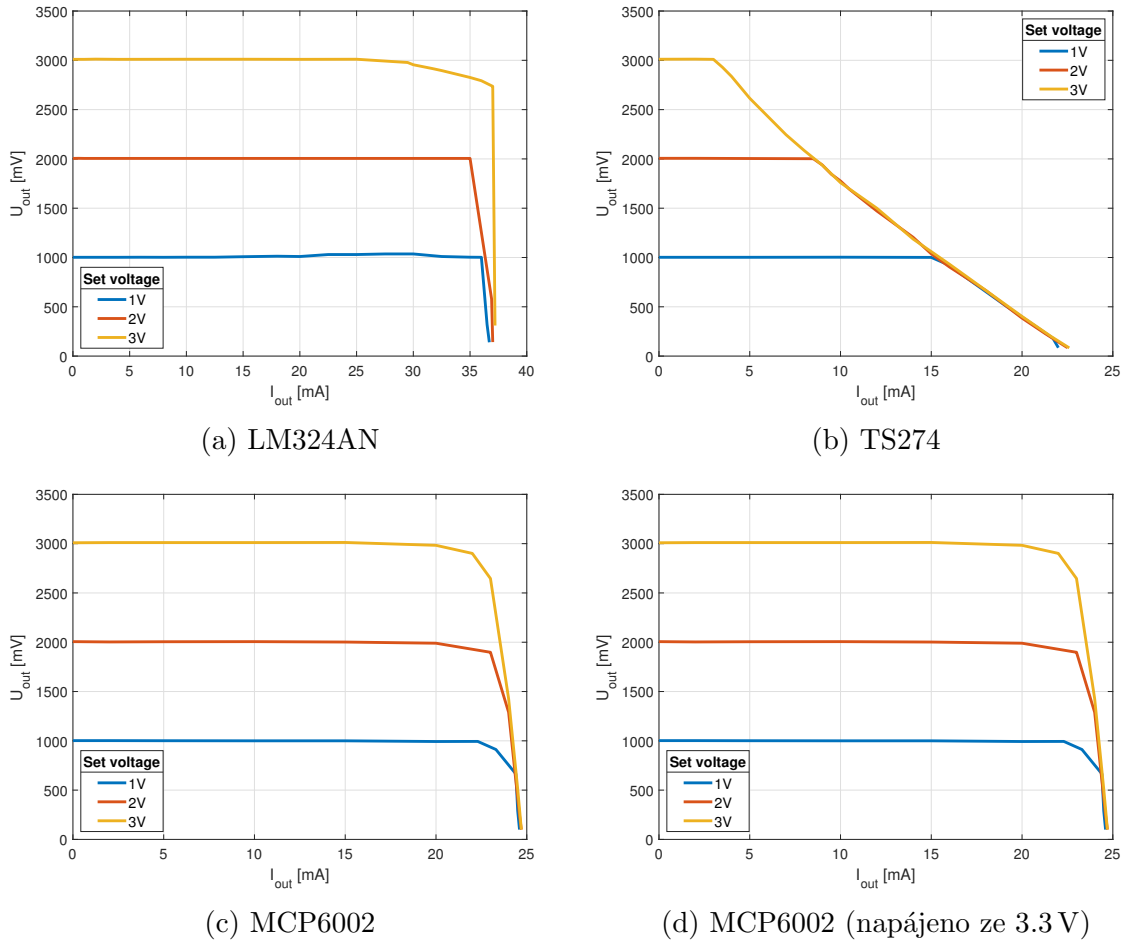
Porovnáním charakteristik OZ MCP6002 napájeného z různých napětí na obrázcích 4.5c a 4.5d je patrné, že u tohoto OZ nemá napájecí napětí vliv na maximální možný výstupní proud.



Obrázek 4.4: Obvod pro měření zatěžovací charakteristiky operačního zesilovače

4.3.2 Operační zesilovač v režimu Current sink

Jak jsem již zmínil v předchozí kapitole, někdy je zapotřebí proud z měřeného obvodu odebírat. Změřil jsem tedy zatěžovací charakteristiku operačních zesilovačů v režimu *current sink*, abych ověřil, zda jsou použité OZ k tomuto účelu vhodné.



Obrázek 4.5: Zatěžovací charakteristiky operačních zesilovačů

Charakteristiku jsem měřil stejně jako v případě výstupního bufferu DA převodníku, schéma zapojení je na obrázku 4.6. Změřené charakteristiky jsou na obrázcích 4.7.

Z těchto charakteristik lze učinit několik závěrů. První je ten, že LM324 může mít na výstupu napětí 0 V, ale pouze pokud není zatížen. Při zatížení je nejnižší výstupní napětí přibližně 600 mV. Toto lze také ověřit pohledem na strukturu na obrázku 4.8, ve které je mezi výstupem a zemí zakreslen zdroj proudu 50 μA . Pokud je tato hodnota překročena dojde k prudkému nárůstu výstupního napětí právě na hodnotu 600 mV, což je způsobeno přítomností bipolárního tranzistoru.

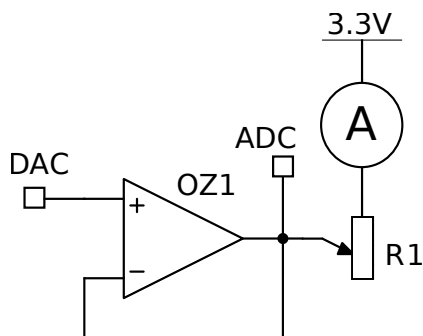
Dále je vidět, že TS274 vykazuje vnitřní odpor $\sim 250 \Omega$, což je pro měření příliš velká hodnota.

MCP6002 má při vstupních proudech do 12 mA vnitřní odpor $\sim 180 \Omega$ a při vyšších napětích tato hodnota dále roste. Z tohoto důvodu také není vhodný pro měření.

4.4 Výběr vhodného OZ

Pokud chceme při měření charakteristiky použít operační zesilovač, musíme dbát na výběr vhodného OZ. V této kapitole jsem rozebral několik parametrů, které jsou pro přesné měření klíčové.

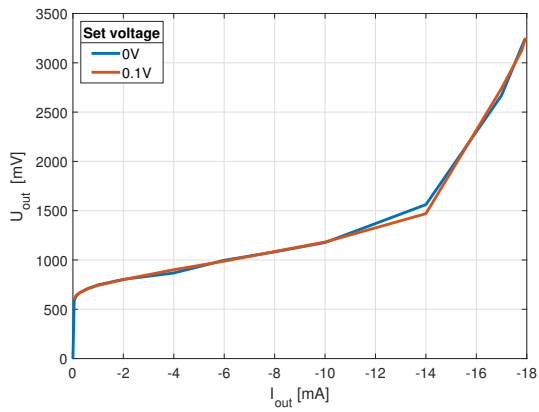
Pro použití při měření charakteristik je vhodné použít OZ, které mohou na výstupu



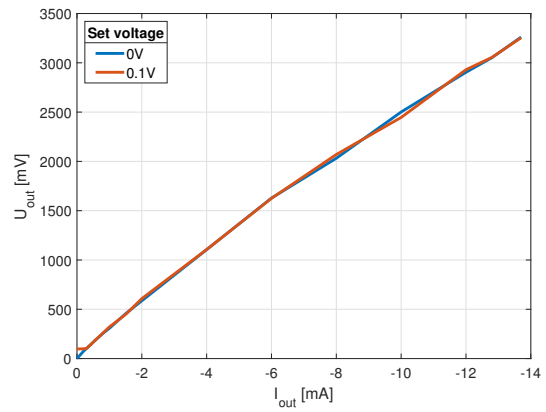
Obrázek 4.6: Obvod pro měření zatěžovací charakteristiky operačního zesilovače jako *current sink*

mít napětí 0 V i při zatížení. Tomuto požadavku vyhovují OZ MCP6002 a TS274. MCP6002 může mít na výstupu i napájecí napětí. Nejlepší je použít *rail to rail* zesilovač, jako je MCP6002, který tyto požadavky naplňuje.

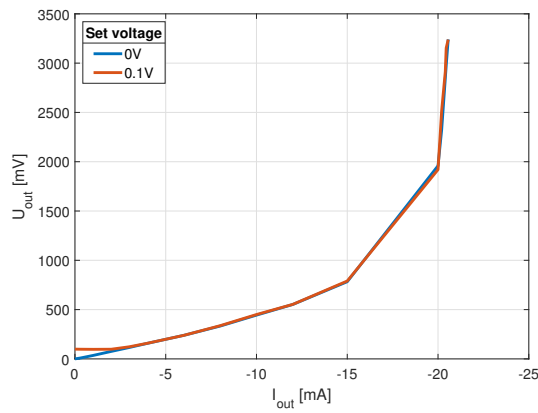
Pokud chceme používat OZ k zesilování napětí, je potřeba volit takový zesilovač, který může být napájen takovým napětím, aby byl OZ schopen dodávat potřebné napětí.



(a) LM324AN

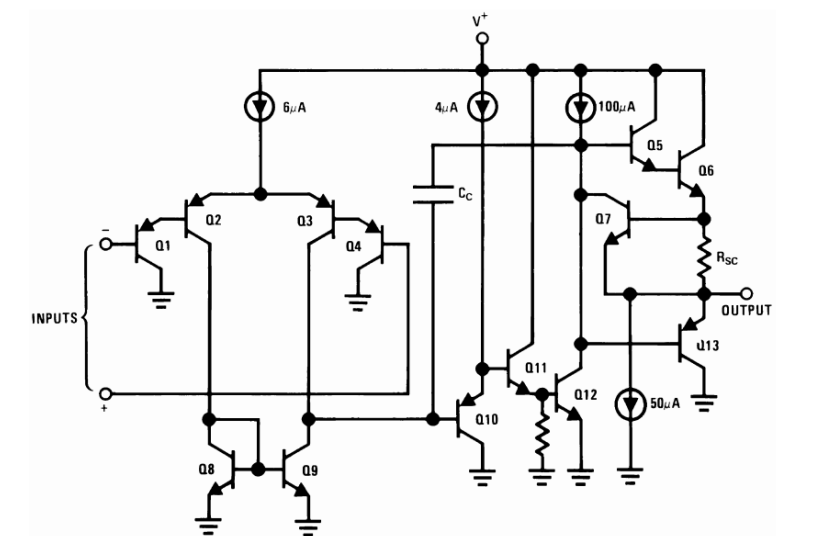


(b) TS274



(c) MCP6002

Obrázek 4.7: Zatěžovací charakteristiky operačních zesilovačů v režimu *current sink*



Obrázek 4.8: Vnitřní struktura OZ LM324

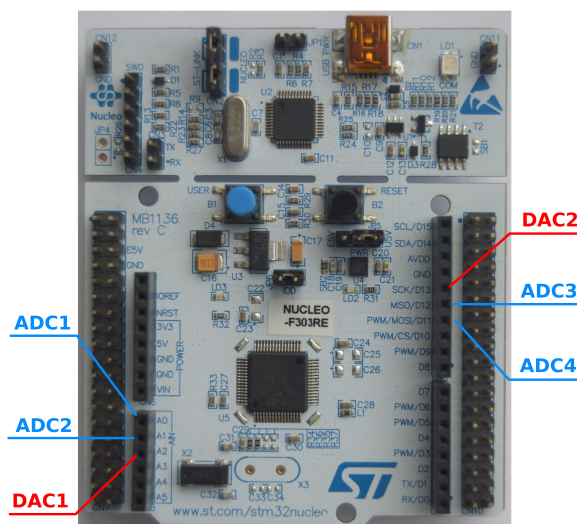
Kapitola 5

Automatické měření charakteristik

Při měření charakteristiky součástek měříme závislost jejich výstupních veličin na vstupních veličinách. Charakteristiku poté vykreslujeme jako graf této závislosti. V této kapitole se budu věnovat postupům měření, které jsem použil ve své práci. Jelikož zde budu popisovat zapojení pro jednotlivý měření, uvedu zde také přiřazení pinů jednotlivým výstupům a vstupům procesoru:

- DAC kanál 1 = pin A2 (PA4)
- DAC kanál 2 = pin D13 (PA5)
- ADC kanál 1 = pin A0 (PA0)
- ADC kanál 2 = pin A1 (PA2)
- ADC kanál 3 = pin D12 (PA6)
- ADC kanál 4 = pin D11 (PA7).

Toto přiřazení je také vyznačeno na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Přiřazení vstupů a výstupů mikrokontroléru k pinům na vývojovém kitu

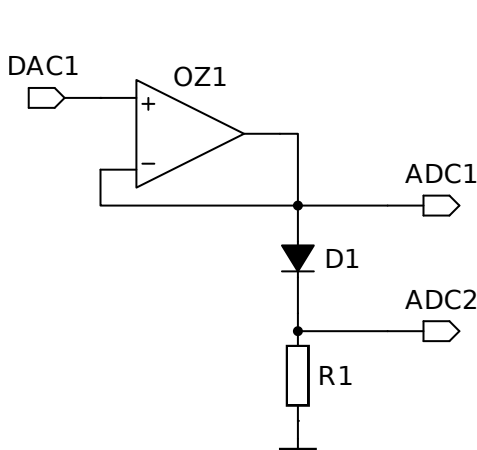
5.1 Charakteristika diody

První elektronická součástka, se kterou se student elektroniky setkává je dioda. Diodu lze charakterizovat její voltampérovou (VA) charakteristikou, tedy závislostí proudu diodou na napětí na diodě. Z VA charakteristiky diody lze určit její přední napětí, tedy napětí, které je potřeba přivést na kladně polarizovanou diodu aby jí mohl protékat proud.

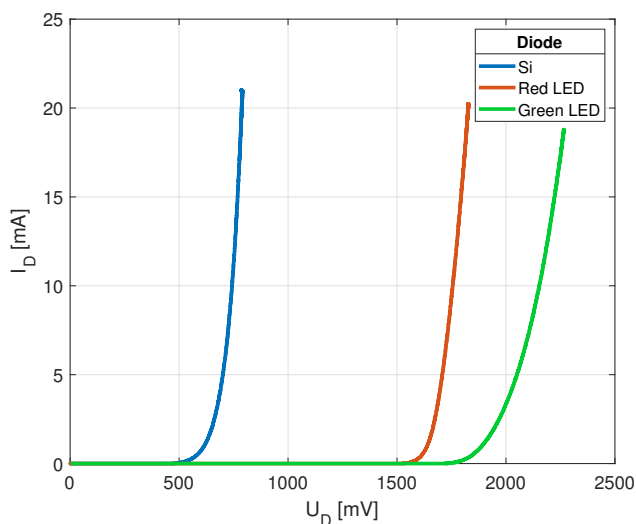
VA charakteristiku diody lze měřit dvěma způsoby. Buď můžeme diodu budit nastavitelným zdrojem proudu a sledovat změnu napětí při změně proudu, nebo naopak měnit napájecí napětí a měřit proud diodou. Vzhledem k tomu, že nastavitelný zdroj napětí mám v podobě DA převodníku a konstrukce řízeného zdroje proudu vyžaduje složité obvody, zvolil jsem druhý přístup.

Pomocí kanálu 1 DA převodníku nastavuji napětí na katodě diody. Na kanálu 1 AD převodníku měřím napětí na katodě a pomocí druhého kanálu měřím napětí na anodě diody. Napětí na anodě odpovídá napětí na rezistoru, a mohu z něj tedy jednoduše vypočítat proud procházející diodou. Schéma obvodu pro měření této charakteristiky je na obrázku 5.2.

Na obrázku 5.3 jsou srovnány VA charakteristiky křemíkové diody, červené a zelené LED změřené uvedeným způsobem. Na těchto charakteristikách je velice dobře vidět, že přední napětí světelných diod je výrazně vyšší, než u křemíkové diody. Také je patrné, že u LED toto napětí závisí také na barvě (vlnové délce) vyzařovaného světla. Vzhledem k tomu, že přední napětí modrých a bílých LED je obvykle vyšší než 3 V, je pro měření jejich charakteristik nutné použít obvodové techniky uvedené v kapitole 3.



Obrázek 5.2: Schéma obvodu pro měření VA charakteristiky



Obrázek 5.3: Srovnání VA charakteristik 3 různých diod

5.2 Bipolární tranzistory

Bipolární tranzistor je první aktivní součástka, se kterou se studenti ve výuce elektroniky setkávají. Existují dva základní typy bipolárních tranzistorů, tranzistory typu NPN a typu PNP. V této práci se zabývám hlavně na NPN tranzistory, jelikož měření

jejich charakteristik s pomocí mého systému je o poznání jednodušší než měření charakteristik PNP tranzistorů.

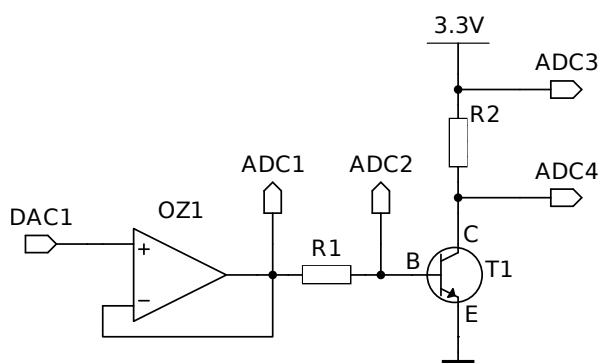
U bipolárních tranzistorů můžeme měřit několik charakteristik a odečítat z nich některé parametry.

5.2.1 Převodní charakteristika NPN tranzistoru

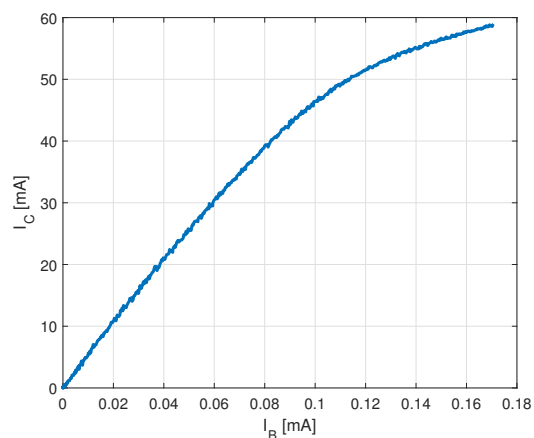
Převodní charakteristika tranzistoru vyjadřuje závislost proudu kolektorem na proudu bázi, tedy $I_C = f(I_B)$. Je tedy potřeba nastavovat proud bázi a měřit proud kolektorem.

Jak jsem již zmínil, konstrukce proudového zdroje by byla pro potřeby těchto měření zbytečně složitá. Vzhledem k tomu, že nás zajímá charakteristika v určitém rozsahu bázevých proudů, stačí postupně zvyšovat výstupní napětí DA převodníku na kanálu 1 a měřit napětí na rezistoru R_1 pomocí kanálů 1 a 2 AD převodníku, ze kterého lze vypočítat proud bázi I_B . Kanály 3 a 4 AD převodníku je měřeno napětí na rezistoru R_2 , ze kterého lze vypočítat proud kolektorem I_C . Zapojení pro měření převodní charakteristiky NPN tranzistoru je na obrázku 5.4. Pokud potřebujeme měřit charakteristiky při vyšších napětích, než je 3.3 V, je nutné použít obvodové techniky diskutované v kapitole 3.

Příklad převodní charakteristiky NPN tranzistoru je na obrázku 5.5. Z této charakteristiky lze odvodit proudové zesílení tranzistoru h_{21E} , které je pro proud kolektorem do 40 mA přibližně 500, což odpovídá údajům z datasheetu tranzistoru [10]. Můžeme také pozorovat, že s rostoucím kolektorovým (resp. bázevým) proudem proudový zesilovací činitel klesá. Toto chování odpovídá údajům z datasheetu.



Obrázek 5.4: Schéma obvodu pro měření převodní charakteristiky NPN tranzistoru



Obrázek 5.5: Převodní charakteristika tranzistoru BC546C

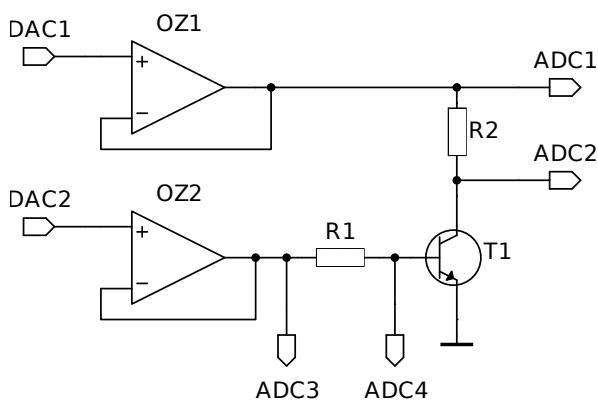
5.2.2 Výstupní charakteristika NPN tranzistoru

Výstupní charakteristikou je v tomto případě myšlena závislost proudu kolektorem I_C na napětí kolektor-emitor U_{CE} . Tato charakteristika je parametrizována proudem bázi I_B . Charakteristiku lze zapsat jako $I_C = f(U_{CE}, I_B)$, kde I_B je konstantní. Znalost výstupní charakteristiky tranzistoru je užitečná při návrhu zesilovače a hledání pracovního bodu.

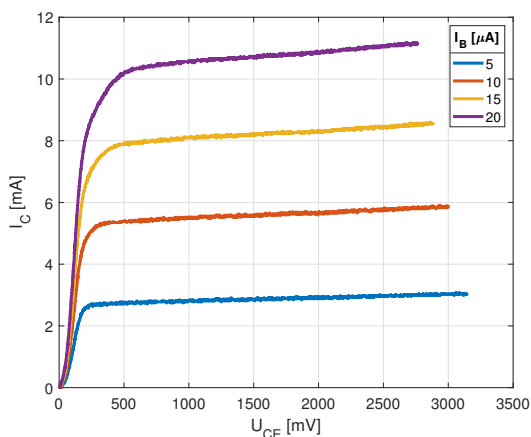
Při měření výstupní charakteristiky tedy potřebujeme zdroj proudu do báze. Jak jsem již několikrát zmínil, sestavovat zdroj proudu by bylo zbytečně složité. Místo toho, používám kanál 2 DA převodníku k nastavování napětí na rezistoru R_2 . Kanály 3 a 4 měřím napětí na tomto rezistoru a postupně zvyšuji výstupní napětí na DA převodníku, dokud proud tímto rezistorem nedosáhne požadované hodnoty.

Změnou výstupního napětí na kanálu 1 DA převodníku nastavuji proud kolektorem. Kanály 1 a 2 měřím napětí na rezistoru R_2 , ze kterého lze vypočítat proud kolektorem. Kanálem 2 zároveň měřím napětí na kolektoru. Zapojení tranzistoru pro měření výstupní charakteristiky je na obrázku 5.6. Příklad charakteristiky změřené tímto postupem je na obrázku 5.7.

Při měření výstupní charakteristiky je potřeba dodávat do kolektoru tranzistoru dostatečně velký proud. Jak jsem již uvedl v kapitole 3, výstup DA převodníku dodá pouze malý proud, než začne klesat výstupní napětí. Pokud je potřeba dodat proud do 20 mA, stačí použít operační zesilovač, jako externí buffer. Jestliže je požadován ještě větší proud, je nutné nahradit operační zesilovač OZ_1 zapojením na obrázku 3.13.



Obrázek 5.6: Schéma obvodu pro měření výstupní charakteristiky NPN tranzistoru



Obrázek 5.7: Výstupní charakteristika tranzistoru BC546C

5.2.3 Vstupní odpor báze - h_{11E}

Parametr h_{11E} určuje míru změny proudu do báze při změně vstupního napětí a chová se proto jako vstupní odpor. Tento parametr lze odečíst ze vstupní charakteristiky tranzistoru, ale pro tu jsem měřící proceduru nenavrhol. Tento parametr měřím tak, že pomocí kanálu 1 DA převodníku zvyšuji napětí na rezistoru a kanály 1 a 2 AD převodníku monitoruji proud. Napětí zvyšuji, dokud nedosáhne požadované hodnoty. Po dosažení této hodnoty uložím napětí z kanálu 2 AD převodníku. Totéž opakuji ještě pro vyšší proud. Z rozdílů napětí a proudů poté již vypočtu odpor báze:

$$h_{11E} = \frac{U_{B2} - U_{B1}}{I_{B2} - I_{B1}}. \quad (5.1)$$

Během měření také monitoruji proud kolektorem I_C , které je zapotřebí při teoretickém výpočtu. Zapojení tranzistoru pro měření je na obrázku 5.4.

Změřenou hodnotu lze ověřit následujícím výpočtem:

$$r_e = \frac{U_t}{I_C} \quad (5.2)$$

$$h_{11E} = r_e \cdot h_{21E}, \quad (5.3)$$

kde $U_t = \frac{kT}{q}$ je tepelné napětí, které je při pokojové teplotě přibližně 26 mV, h_{21E} je proudový zesilovací činitel, který můžeme odečíst z převodní charakteristiky tranzistoru a I_C je proud kolektoru. V tabulce 5.1 jsou porovnány změřené a vypočtené hodnoty h_{11E} pro různé NPN tranzistory. Z tabulky je vidět, že se naměřené hodnoty s těmi vypočtenými příliš neshodují, ale pro demonstraci a ověření principu je tato přesnost dostatečná.

Tranzistor	$h_{11E}[\Omega]$		$I_C[\text{mA}]$
	Změřeno	Vypočteno	
BC546	3984	4297	6.57
BC337	4624	4267	2.35
2N2222A	966	1039	5.28

Tabulka 5.1: Srovnání změřených a vypočtených hodnot h_{11E} pro různé tranzistory

5.3 Unipolární tranzistory

Na rozdíl od bipolárních tranzistorů, kde je proud kolektorem řízen proudem bází, u unipolárních tranzistorů je proud řízen napětím gate. V této práci se budu soustředit na tranzistory typu N-MOSFET.

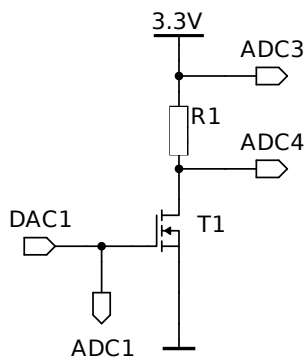
5.3.1 Převodní charakteristika N-MOS

Převodní charakteristikou je v případě N-MOS tranzistoru myšlena závislost proudu drainem tranzistoru na napětí gate. Charakteristiku měřím tak, že pomocí kanálu 1 DA převodníku postupně zvyšuji napětí gate a pomocí kanálu 1 AD převodníku jej monitoruji. Na kanálech 3 a 4 AD převodníku měřím napětí na rezistoru R_1 , ze kterého následně určuji proud drain. Zapojení tranzistoru pro měření této charakteristiky je na obrázku 5.8. Příklad charakteristiky změřené tímto způsobem je na obrázku 5.9.

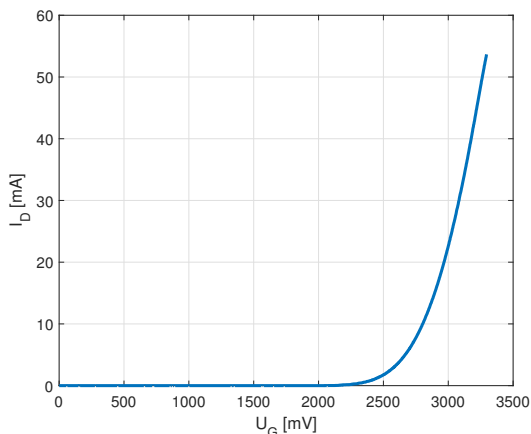
Z této charakteristiky lze vyčíst několik parametrů. Základním parametrem, který pro unipolární tranzistor určujeme, je prahové napětí U_T . Prahové napětí je napětí mezi gate a source, při kterém začíná mezi drain a source protékat proud a v případě BS170 je $U_T = 2.3 \text{ V}$, což leží v rozsahu uvedenému v datasheetu [11]. Z převodní charakteristiky lze také určit transkonduktanci:

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{U_G}.$$

Transkonduktance určuje změnu proudu drain v závislosti na změně napětí gate.



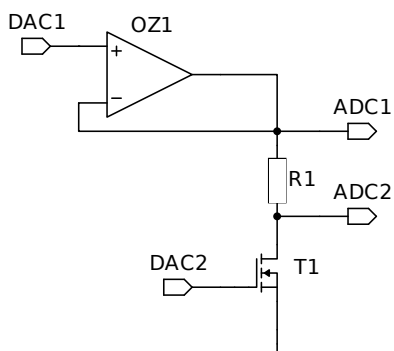
Obrázek 5.8: Schéma obvodu pro měření převodní charakteristiky N-MOS tranzistoru



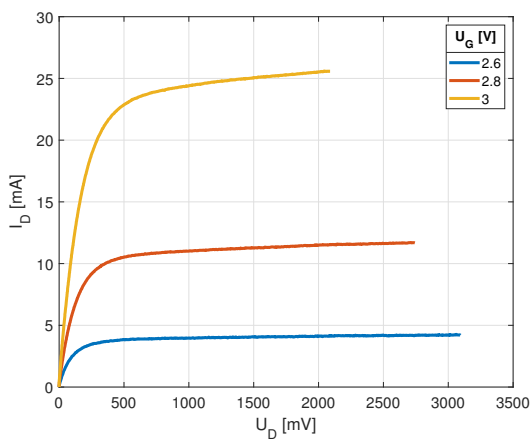
Obrázek 5.9: Převodní charakteristika N-MOS tranzistoru BS170

5.3.2 Výstupní charakteristika

Výstupní charakteristika N-MOS tranzistoru je závislost proudu drain I_D na napětí drain U_D při konstantním napětí gate. Pomocí kanálu 2 DA převodníku nastavuji požadované napětí gate. Prvním kanálem nastavuji napětí na rezistoru R_1 , které postupně zvyšuji. Kanály 1 a 2 AD převodníku monitorují napětí na rezistoru R_1 , z čehož následně určuji proud I_D . Na kanálu 2 AD převodníku také měřím napětí U_D . Zapojení tranzistoru pro měření výstupní charakteristiky je na obrázku 5.10 a na obrázku 5.11 je příklad charakteristiky změřené tímto způsobem.



Obrázek 5.10: Schéma obvodu pro měření výstupní charakteristiky N-MOS tranzistoru



Obrázek 5.11: Výstupní charakteristika N-MOS tranzistoru BS170

Kapitola 6

Implementace softwaru

6.1 Prototyp FW v mbed

Abych si ověřil možnosti použitého mikrokontroléru, vytvořil jsem nejdříve prototyp FW v prostředí `mbed`. Tento firmware poskytuje pouze základní funkce. Komunikace je možná prostřednictvím terminálové aplikace. Uživatel má k dispozici čtyřkanálový voltmetr a dvoukanálový nastavitelný zdroj napětí.

Pro nastavování hodnot napětí na výstupech je použito rozhraní `AnalogOut`. Pro měření napětí na vstupech je použito rozhraní `AnalogIn`. Pro komunikaci s nadřazeným PC prostřednictvím USART je použito rozhraní `Serial`. Vypisované hodnoty jsou průměrovány z pěti set vzorků.

Vzhledem k tomu, že program vytvořený v `mbed` sloužil pouze jako prototyp pro ověření funkčnosti, není nutné se jím v této práci dále zabývat.

6.2 Firmware pro mikrokontrolér

Požadavky na software pro mikrokontrolér byly jednoduché. Bylo potřeba inicializovat procesor a jeho použité periferie, následně obsluhovat a zajišťovat komunikaci s uživatelem. Vzhledem k tomu, že požadavky nejsou příliš náročné, rozhodl jsem se procesor programovat bez použití knihoven, jako například Hardware Abstraction Layer (HAL).

Při programování mikrokontroléru jsem postupoval podle návodu v knize [3]. Dále jsem při programování periferií dodržoval postupy uvedené v referenčním manuálu [1] mikrokontroléru.

Abych využil možností procesoru pokud možno co nejvíce, provozuji jej na maximální dovolené frekvenci hodinového signálu 72 MHz. Pro měření charakteristik je potřeba měřit až čtyři různá napětí. Kvůli konfliktu funkcí vyvedených pinů procesoru nemohu všechna napětí měřit jedním AD převodníkem, ale musím použít dva, tedy AD převodníky ADC1 a ADC2. Vzhledem k tomu, že na každém ADC měřím jenom dvě napětí, s výhodou používám takzvané injektované kanály ADC. Při měření na těchto kanálech má každý kanál svůj vlastní datový registr, čímž odpadá nutnost použití Direct Memory Access (DMA) pro vyčítání dat z datového registru ADC při měření na normálních kanálech.

Při měření charakteristik je nutné nastavovat až dvě vstupní veličiny, obvykle napětí. K tomu je použit dvoukanálový DA převodník. Na výstupech obou kanálů DAC jsou výstupní buffery. Buffer na výstupu prvního kanálu lze softwarově deaktivovat, čehož je využito při některých měřeních.

Pro komunikaci s nadřazeným PC slouží blok pro sériovou komunikaci USART v kombinaci USART-USB převodníkem na vývojové desce. Použil jsem blok USART2, jelikož ten jediný má přiřazené piny, které jsou přímo spojené s USB-USART převodníkem. Komunikační rychlost je nastavena na 155200 Baud/s, což je maximální doporučená rychlost pro komunikaci s PC po sériové lince. Další nastavení USARTu jsou ponechána na výchozích hodnotách. Délka datové části je 8 bitů. Zpráva je zakončena jedním stop bitem a není využita parita.

Firmware může pracovat ve dvou režimech. První jsem nazval Manuální režim. V tomto režimu probíhá komunikace pouze pomocí terminálu. Uživatel prostřednictvím terminálové aplikace manuálně nastavuje požadovaná napětí výstupů DAC a odečítá hodnoty měřené AD převodníky. Druhý režim se jmenuje Automatický a je navržen tak, aby komunikoval s PC aplikací. Aplikace posílá mikrokontroléru příkazy, kterými nastavuje požadovaná napětí a žádá o zaslání měřených napětí. Tato aplikace slouží pro automatizovaná řešení. Mezi těmito režimy je možné přepínat pomocí jednoduchého příkazu. Díky tomu není nutné během měření měnit firmware procesoru.

V následujících sekcích jsou popsány jednotlivé knihovny, které obsahují funkce pro inicializaci a obsluhu periférií, společně s knihovnami obsahujícími hlavní programové smyčky jednotlivých režimů.

6.2.1 Knihovna `init.h`

Knihovna `init.h` obsahuje funkce pro inicializaci částí mikrokontroléru, které jsou nutné pro použití zbylých periférií.

Funkce `rcc_init()`

Tato funkce inicializuje Reset and Clock Control. Nastavuji v ní hodinový signál procesoru.

Po resetování je jako zdroj hodinového signálu procesoru nastaven vnitřní oscilátor. Tento oscilátor není příliš přesný a na vývojové desce je dostupný externí 8 MHz křystalový oscilátor, který používám místo interního oscilátoru. Externí oscilátor je nutné nejdříve aktivovat zápisem 1 do bitu HSEON registru `RCC_CR`.

Protože chci procesor provozovat na jeho maximální možné frekvenci, je potřeba zvýšit frekvenci hodinového signálu z oscilátoru. K tomu je použit fázový závěs (PLL), který frekvenci zvětší devětkrát. Po ustálení výstupu PLL je přepnut zdroj hodinového signálu procesoru z interního oscilátoru na výstup PLL.

Funkce `init_gpio()`

Tato funkce slouží k inicializaci GPIO. Vzhledem k výběru použitých pinů, které jsou všechny na výstupní bráně A, stačí aktivovat hodiny pouze pro tuto bránu zápisem do registru `RCC_AHBENR`.

Pro komunikaci s PC je použit UART. Součástí vývojového kitu je i USB-UART převodník. K tomuto převodníku jsou připojeny piny PA2 a PA3. Proto jsou tyto piny konfigurovány do jejich alternativního režimu. Jako alternativní režim je zvolen právě režim pro UART. Pro měření a nastavování napětí jsou použity piny PA0, PA1, PA4, PA5, PA6 a PA7, které jsou proto konfigurovány v analogovém režimu. Všechna tato nastavení jsou prováděna zápisy do registrů `GPIOA_MODER` a `GPIOA_AFRL`.

6.2.2 Knihovna `adc.h`

Tato knihovna obsahuje všechny funkce potřebné pro inicializaci a obsluhu analogově digitálních převodníků procesoru. Vzhledem k tomu, jak jsou vyvedeny vstupy AD převodníků na piny na vývojovém kitu, musel jsem použít dva AD převodníky, ADC1 a ADC2.

Funkce `adc_init()`

Jak název napovídá, tato funkce slouží k inicializaci převodníků. Aby mohly být převodníky použity, musí jim, stejně jako všem ostatním periferiím procesoru, být aktivován hodinový signál. Ten je aktivován zápisem 1 do bitu ADC12EN registru RCC_AHBENR. V registru RCC_CFGR2 lze zápisem příslušné hodnoty do bitů ADC_PRE12 nastavit děličku hodinového signálu pro převodník.

V dalším kroku je aktivován interní regulátor napětí a provedena kalibrace AD převodníku. Tato kalibrace odstraní napěťový offset převodníku, který mohl vzniknout při výrobě.

Po dokončení kalibrace je převodník aktivován a následuje konfigurace sekvencí měření. Vzhledem k tomu, že na ani jednom převodníku není využito více, než čtyři kanály, jsou s výhodou využity takzvané injektované kanály. Výhodou injektovaných kanálů je to, že každý kanál má svůj datový registr, takže pro vyčítání dat není nutné používat DMA.

Sekvence prvního AD převodníku obsahuje vstupy 1, 2 a 18, což odpovídá pinům PA0, PA2 a vnitřní napěťové referenci, která slouží pro měření napájecího napětí. Sekvence druhého převodníku obsahuje vstupy 1, 2, 3, 4, což odpovídá pinům PA4, PA5, PA6 a PA7. Tyto sekvence jsou nastavovány zápisem do registru ADCx_JSQR, kde x je číslo převodníku.

V registru ADCx_SMPR1 se nastavují doby odběru vzorku pro jednotlivé kanály. Pro všechny použité kanály obou převodníků je nastavena maximální hodnota 601.5 cyklu. Tímto je konfigurace ukončena a převodník je připraven k měření.

Funkce `set_prescaler(pres)`

Pomocí této funkce lze měnit hodnotu předděličky hodinového signálu pro AD převodníky. Tímto způsobem lze měnit vzorkovací frekvenci a dobu odběru vzorku.

Funkce `measure_voltages(voltages[])`

Tato funkce přebírá jako parametr ukazatel na pole sedmi 16 bitových bezznaménkových celých čísel. Po zavolání této funkce spustí na obou převodnících konverzi injektované frekvence a čeká na její dokončení. Po dokončení všech konverzí naplní předané pole změřenými hodnotami.

6.2.3 Knihovna `dac.h`

Funkce `dac_init()`

Tato funkce inicializuje DA převodník. K inicializaci převodníku stačí povolit hodiny zápisem 1 do bitu DAC1EN v registru RCC_APB1ENR a aktivovat DA převodník zápisem 1 do bitů EN1 a EN2 kontrolního registru DA převodníku DAC_CR.

Funkce `set_dacX(voltage)`

Funkce `set_dac1(voltage)` a `set_dac2(voltage)` slouží k nastavení požadované výstupní hodnoty DA převodníku. Výstupní napětí je nastavováno zápisem 12 bitové hodnoty do registru `DAC_DH12Rx`. Hodnotu výstupního napětí lze určit takto:

$$U_{DAC} = 3300 \frac{\text{voltage}}{4095}.$$

Po zapsání hodnoty do datového registru je aktivována konverze zapsáním 1 do bitu `SWTRIGx` registru `DAC_SWTRIG`.

Funkce `dac1_buffer_enable(buff_en)`

Výstupní buffer prvního kanálu DA převodníku lze zapínat a vypínat zápisem do bitu `BOFF1` registru `DAC_CR`. Pokud je `buff_en=1`, je buffer aktivován, pokud je `buff_en=0` je buffer deaktivován.

6.2.4 Knihovna `usart.h`

Pro komunikaci s uživatelem a nadřazeným PC je použit blok `USART` procesoru v kombinaci s `USB-USART` převodníkem na vývojovém kitu. Tato knihovna obsahuje funkce pro inicializaci bloku `USART` a jeho obsluhu.

Funkce `usart_init()`

Pro komunikace je využit blok `USART2`, jelikož je jediný, který je propojen s převodníkem na desce. Stejně jako u všech ostatních periférií, inicializace začíná povolením hodinového signálu. Dále je potřeba nastavit hodnotu baudrate registru, která slouží k dělení frekvence hodinového signálu na požadovanou komunikační rychlost. Výpočet hodnoty je následující:

$$BRR = \frac{36 \text{ MHz}}{115200} = 312.5,$$

kde 115200 je požadovaný baudrate. Hodnotu `BRR` je potřeba zaokrouhlit na celé číslo.

Po nastavení baudrate registru stačí aktivovat blok `USART`, jeho vstup a výstup zapsáním 1 do bitů `UE`, `TE` a `RE` registru `USART2_CR1`.

Funkce `usart_sendc(char)`

Tato funkce odesílá znak přes `USART`. Funkce čeká, dokud není aktivní bit `TXE` registru `USART2_ISR`, který značí, že předchozí data byly odeslána, a následně zapíše znak `char` do registru `USART2_TDR`.

Funkce `send_voltage_raw(voltage)`

Rozloží 16 bitové číslo na dva byty a postupně je odešle. Dolní byte je odeslán jako první.

Funkce `print_string(str)`

Odešle řetězec znak po znaku a přes `USART` pomocí funkce `usart_sendc(char)`.

Funkce `read_char()`

Funkce zkontroluje, zda je aktivní bit RXNE registru USART2_ISR, který značí, zda jsou v přijímacím datovém registru data. Pokud je aktivní, přečte data z registru USART2_RDR a vrátí přečtený bit. Pokud bit RXNE aktivní není, funkce vrací NULL.

Tato funkce má další dvě varianty. Funkce `read_char_echo()` dělá to samé, ale přijatý znak odešle zpět. Funkce `read_char2()` je stejná jako `read_char()`, ale pokud je RXNE=0, vrací -1.

Funkce `read_voltage()`

Tato funkce čte znaky z USART, dokud není přijat znak konec řádku. Pokud jsou přijaté znaky čísla, funkce je interpretuje jako kladné číslo a vrátí jej.

Funkce `read_uint32()`

Funkce přečte čtyři byty z USART a složí z nich jedno 32 bitové bezznaménkové číslo, které následně vrací.

Funkce `read_voltage_raw()`

Z USARTu přečte dva byty a sestaví z nich 16 bitové bezznaménkové celé číslo, které vrací.

6.2.5 [Knihovna `manual.h`](#)

Knihovna `manual.h` obsahuje funkce, které jsou použity v manuálním režimu programu. V tomto režimu je měření řízeno manuálně uživatelem prostřednictvím terminálové aplikace (například PuTTY).

Funkce `print_voltages(voltages)`

Z napětí předaných v poli `voltages` sestaví řetězec, který následně odešle přes USART.

Funkce `print_help()`

Pomocí USART odešle řetězec s nápovědou.

Funkce `manual_mode()`

Tato funkce obsahuje hlavní programovou smyčku manuálního módu. V nekonečné smyčce čte znak z USARTu a podle toho, jaký znak je přijat program reaguje. V každém cyklu jsou také změřena všechna napětí, která jsou průběžně průměrována.

6.2.6 [Knihovna `remote.h`](#)

Tato knihovna obsahuje funkce používané, když je program v automatickém režimu.

Funkce `take_samples(voltages, avg)`

Tato funkce změří napětí na všech vstupech AD převodníků. Funkce odebere počet vzorků podle hodnoty `avg` a spočítá z nich průměrné hodnoty, kterými naplní pole `voltages`.

Funkce `remote_mode()`

Funkce `remote_mode()` obsahuje hlavní programovou smyčku automatického režimu. V nekonečné smyčce jsou čteny znaky z USART a podle přijatého znaku program reaguje. V následujícím seznamu jsou uvedeny přijaté hodnoty a reakce na ně.

- 200 až 203 - odešle ACK změří napětí a odešle jej
- 210 - přečte napětí z USART a nastaví ho na DAC1
- 211 - přečte napětí z USART a nastaví ho na DAC1
- 220 - deaktivuje výstupní buffer DAC1
- 221 - aktivuje výstupní buffer DAC1
- 230 - přečte číslo z USART a nastaví odpovídající hodnotu děliče hodin pro ADC
- 240 - přečte číslo z USARTu a nastaví počet průměrovaných vzorků
- R nebo r - resetuje mikrokontrolér do výchozího stavu

6.3 Aplikace pro PC

Součástí softwarové výbavy projektu je také aplikace pro PC. Tato aplikace je určena pro automatická měření. Aplikace komunikuje s mikrokontrolérem prostřednictvím sériové linky. Pomocí jednoduchých příkazů kontroluje měření, získává měřené hodnoty z mikrokontroléru, které zpracovává a následně prezentuje uživateli v grafické podobě.

V aplikaci jsou předdefinovány měřicí procedury pro měření vybraných charakteristik elektronických součástek. Uživatel nejdříve zvolí, jakou charakteristiku chce měřit. Následně zadá parametry obvodu, na kterém měření provádí a požadované parametry měření.

Jakmile je měření dokončeno, jsou uživateli výsledky prezentovány v podobě grafu změřené charakteristiky. V grafu lze vykreslovat několik charakteristik zároveň a lze proto porovnávat charakteristiky různých součástek, popřípadě jedné součástky za různých podmínek. Uživatel má možnost charakteristiku uložit jako obrázek, nebo může data exportovat do souboru ve formátu `.csv` pro další zpracování.

Pro implementaci PC aplikace jsem zvolili programovací jazyk Python 3.7, z důvodu jeho univerzálnosti a velkého množství dostupných knihoven pro tvorbu grafických uživatelských rozhraní. Vytvořená aplikace funguje na operačních systémech Windows a Linux.

6.3.1 Použité knihovny

Pro jazyk Python je dostupné velké množství knihoven. Pro svou aplikaci jsem potřeboval knihovny, které zajistí následující:

- komunikace po sériové lince

- vykreslování grafů změřených charakteristik
- tvorba grafického uživatelského rozhraní.

Pro komunikaci po sériové lince slouží knihovna `serial`, která poskytuje všechny potřebné funkce pro posílání a přijímání dat. Vykreslování grafů změřených charakteristik zajišťuje knihovna `matplotlib`, která je určena k vykreslování 2D grafů. Grafické uživatelské rozhraní (GUI) jsem implementoval s pomocí knihovny `tkinter`. Tato knihovna je standardní rozhraní Pythonu pro tvorbu GUI pomocí Tk GUI, které je dostupné na většině distribucí operačního systému Linux a Windows.

6.3.2 Modul `communication.py`

V tomto modulu jsou implementovány funkce, které zajišťují komunikaci s mikrokontrolérem. Jsou zde také definovány jednotlivé typy příkazů. Všechny funkce tohoto modulu přebírají otevřený sériový port, jako parametr.

Příkazy

V tomto modulu jsou definovány příkazy, které může aplikace posílat mikrokontroléru. V následujícím seznamu jsou vypsány názvy příkazů, jejich hexadecimální hodnoty a stručně popsána jejich funkce.

- `MSG_REMOTE=0xDE` - přepne firmware do automatického režimu
- `MSG_ACK=0x06` - potvrzovací zpráva od mikrokontroléru
- `MSG_READ_VOLTAGE=0xC8 + X` - žádost o hodnotu napětí na kanálu $X=(0\dots4)$
- `MSG_SET_VOLTAGE=0xD2 + X` - nastav napětí na kanálu $X=(1,2)$
- `MSG_BUFF_DIS=0xDC` - deaktivuj výstupní buffer kanálu 1 DAC
- `MSG_BUFF_EN=0xDD` - aktivuj výstupní buffer kanálu 1 DAC
- `MSG_SET_PRES=0xE6` - nastav předděličku hodin pro ADC
- `MSG_SET_AVG=0xF0` - nastav z kolika odběrů se průměruje
- `MSG_RESET='R'` - resetuje procesor do původní konfigurace
- `MSG_CHECK=0xFF` - kontrolní zpráva

Funkce `check_device(ser)`

Firmware mikrokontroléru je po resetu nastaven tak, že každý přijatý znak odesílá zpět. V této funkci je toho využito ke kontrole připravenosti a kompatibility připojeného zařízení. Funkce portem `ser` odešle zprávu `MSG_CHECK` a čeká na odpověď. Pokud přijde zpět `MSG_CHECK` je zařízení považováno za kompatibilní a funkce vrátí `True`, v opačném případě vrátí `False`.

Funkce `remote_mode(ser)`

Pošle příkaz `MSG_REMOTE`, čímž přepne zařízení do automatického režimu. Program čeká na kladné potvrzení od mikrokontroléru v podobě `MSG_ACK`.

Funkce `set_voltage(ser, voltage, channel)`

Funkce pošle mikrokontroléru příkaz `MSG_SET_VOLTAGE` pro kanál `channel`. Jelikož DA převodník je 12 bitový, musí být hodnota napětí `voltage` v milivoltech je nejdříve převedena dle vztahu

$$\text{DAC} \doteq 4095 \frac{\text{voltage}}{3300}. \quad (6.1)$$

Hodnota DAC je následně rozdělena na dva byty a odeslána do mikrokontroléru.

Funkce `read_voltage(ser, channel)`

Funkce pošle mikrokontroléru žádost o napětí `MSG_READ_VOLTAGE` na kanálu `channel`. Následně přečte dva byty z sériového portu, ze kterých složí číslo a vrátí ho. Přečtenou hodnotu lze převést na hodnotu v milivoltech dle vztahu:

$$\text{voltage} = 3300 \frac{\text{ADC}}{4095}. \quad (6.2)$$

Funkce `buffer_enable(ser)` a `buffer_disable(ser)`

Tyto funkce posílají příkazy k aktivaci/deaktivaci `MSG_BUFF_EN` a `MSG_BUFF_DIS`.

Funkce `set_prescaler(ser, pres)`

Funkce odešle příkaz `MSG_SET_PRESC`. Dále odešle číslo `pres`, kterému odpovídá požadovaná hodnota prescaleru:

- | | | | |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| • <code>pres=0</code> - 1 | • <code>pres=3</code> - 6 | • <code>pres=6</code> - 12 | • <code>pres=9</code> - 64 |
| • <code>pres=1</code> - 2 | • <code>pres=4</code> - 8 | • <code>pres=7</code> - 16 | • <code>pres=10</code> - 128 |
| • <code>pres=2</code> - 4 | • <code>pres=5</code> - 10 | • <code>pres=8</code> - 32 | • <code>pres=11</code> - 256 |

Funkce `set_average(ser, avg)`

Pošle příkaz `MSG_SET_AVG`. Po příkazu následuje jeden byte, jehož hodnota odpovídá počtu vzorků, které mají být odebrány při jednom měření.

Funkce `reset(ser)`

Pošle `MSG_RESET`, čímž resetuje mikrokontrolér do výchozího nastavení.

6.3.3 Modul `measure.py`

Modul `measure.py` obsahuje procedury pro automatické měření charakteristik. Měřicí procedury jsou popsány v kapitole [automatická měření], takže v této kapitole budou popsány stručně.

Funkce `va_char`(`ser`, `start`, `stop`, `step`, `res`, `res_first`)

Na kanálu 1 DA převodníku nastavuje napětí v rozsahu `start` až `stop` s krokem `step`. Pokud `res_first=True` znamená to, že topologie měřeného obvodu odpovídá schématu na obrázku 6.1b. V tomto případě je z rozdílu napětí na kanálech 1 a 2 AD převodníku vypočítáván proud rezistorem a napětí kanálu 2 odpovídá napětí obvodu. Pokud `res_first=False` odpovídá topologie obvodu schématu 6.1a. Z rozdílu napětí na kanálech 1 a 2 je určováno napětí obvodu a z napětí na kanálu 2 se vypočítává proud obvodem.

Funkce vrací pole napětí napětí obvodu a pole proudů obvodem.



Obrázek 6.1: Možnosti měření VA charakteristiky

Funkce `npn_beta`(`ser`, `base_i`, `base_R`, `collector_R`)

Tato funkce je určena pro měření proudového zesilovacího činitele NPN tranzistoru. Měřicí procedura je navržena pro měření obvodů zapojených dle schématu na obrázku 6.2. Parametr `base_i` určuje, při jakém bázovém proudu má být zesilovací činitel měřen. Na kanálech 1 a 2 AD převodníku je měřeno napětí na rezistoru $R_1 = \text{base_R}$, ze kterého je určován proud bází I_B . Proud bází je nastavován tak, že se postupně zvyšuje napětí na kanálu 1 DA převodníku, dokud měřený proud nedosáhne požadované hodnoty. Po dosažení této hodnoty je na kanálech 3 a 4 změřeno napětí na rezistoru $R_2 = \text{collector_R}$, ze kterého je vypočten proud kolektorem I_C . Vydělením proudu I_C proudem I_B je vypočten proudový zesilovací činitel β . Funkce vrací β , I_B a I_C .

Funkce `npn_h11`(`ser`, `base_R`, `base_i1`, `base_i2`, `collector_R`)

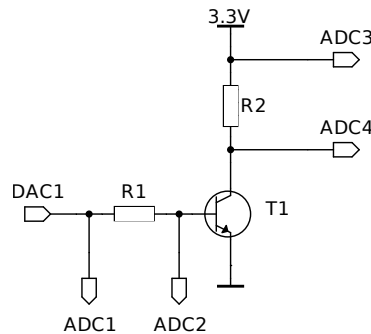
Funkce slouží k měření vstupního odporu báze, neboli parametru h_{11E} . Procedura je navržena pro měření na zapojení na schématu na obrázku 6.2. Kanály 1 a 2 je měřeno napětí na rezistoru $R_1 = \text{base_R}$, ze kterého je vypočten proud bází I_B a kanály 3 a 4 je měřeno napětí na rezistoru $R_2 = \text{collector_R}$, ze kterého je určen proud kolektorem I_C . Kanálem 1 DA převodníku je postupně zvyšováno napětí na rezistoru R_1 , dokud proud I_B nedosáhne hodnoty $I_{B1} = \text{base_i1}$. Po dosažení této hodnoty je kanálem 2 ADC změřeno napětí báze U_{B1} . Stejný postup se opakuje pro hodnotu $I_{B2} = \text{base_i2}$, kdy je změřeno napětí U_{B2} . Parametr h_{11E} je z těchto hodnot vypočten takto:

$$h_{11E} = \frac{U_{B2} - U_{B1}}{I_{B2} - I_{B1}}. \quad (6.3)$$

Funkce vrací parametr h_{11E} a proud kolektorem I_C při proudu bází I_{B2} .

Funkce `npn_transfer`(ser, base_R, start, stop, step, collector_R)

Funkce pro měření převodní charakteristiky NPN tranzistoru. Měření probíhá dle procedury uvedené v sekci 5.2. Funkce vrací pole proudů bázi a pole proudů kolektorem.



Obrázek 6.2: Schéma pro měření β , h_{11E} a převodní charakteristiky NPN tranzistoru

Funkce `npn_output`(ser, base_R, base_i, start, stop, step, collector_R)

Funkce pro měření převodní charakteristiky NPN tranzistoru. Měření probíhá podle procedury uvedené v části 5.2. Funkce vrací pole napětí kolektoru a pole proudů kolektorem.

Funkce `nmos_transf`(ser, start, stop, step, drain_R)

Funkce pro měření převodní charakteristiky unipolárních tranzistorů s N kanálem. Měření probíhá dle procedury uvedené v sekci 5.3. Funkce vrací pole napětí gate a proudů drain.

Funkce `nmos_output`(ser, gate_V, start, stop, step, drain_R)

Funkce pro měření výstupní charakteristiky unipolárního tranzistoru s N kanálem. Měření probíhá dle procedury uvedené v sekci 5.3. Funkce vrací pole proudů a napětí drain a napětí gate.

6.3.4 Modul `gui.py`

Tento modul obsahuje hlavní část programu. Jsou v něm definována všechna okna uživatelského rozhraní. Hlavní okno programu je tvořeno třídou `CharacteriserGUI`, která rozšiřuje třídu `Tk` knihovny `tkinter`. Program je spuštěn zavoláním metody `mainloop`.

Jednotlivé obrazovky jsou tvořeny jako rozšíření třídy `Frame` knihovny `tkinter` a přidáním potřebných objektů, jako jsou tlačítka, textová pole a podobně. Po spuštění aplikace je zobrazena obrazovka `Start`, na které uživatel volí, jakou charakteristiku chce měřit. Snímek této obrazovky je na obrázku 6.3.

Obrazovky měření

Všechny obrazovky měření obsahují následující prvky:

- Popisky - instance třídy `Label`

- Vstupní textová pole - instance třídy `Entry`
- Textový výstup - instance třídy `Text`
- Zaškrťovací pole - instance třídy `Checkbutton`
- Výběrové menu - instance třídy `ttk.Combobox`.

Prostřednictvím vstupních textových polí uživatel zadává hodnoty rezistorů a požadované hodnoty výstupních napětí. Tlačítka jsou používána pro spouštění měření, navigaci v programu a export dat. Prostřednictvím textového výstupu je uživatel informován o průběhu a výsledcích měření. Zaškrťovací pole a výběrová menu slouží ke změně nastavení mikrokontroléru.

Pokud má měřená charakteristika i grafický výstup, obsahuje ještě následující prvky:

- Plátno - instance třídy `FigureCanvasTkAgg`
- Graf - instance třídy `Figure`
- Toolbar - instance třídy `NavigationToolbar2Tk`

Plátno slouží k vykreslení grafu. Toolbar je ovládací panel pro prostředí grafu. Příklad obrazovky pro měření charakteristiky s grafickým výstupem je na obrázku 6.4.

Modul obsahuje následující obrazovky měření:

- `VAChar` - měření voltampérové charakteristiky
- `NPNBeta` - měření proudového zesilovacího činitele NPN tranzistoru
- `NPNH11` - měření vstupního odporu báze NPN tranzistoru
- `NPNTrans` - měření převodní charakteristiky NPN tranzistoru
- `NPNOut` - měření výstupní charakteristiky NPN tranzistoru
- `NMOSTrans` - měření převodní charakteristiky N-MOS tranzistoru
- `NMOSOut` - měření výstupní charakteristiky N-MOS tranzistoru
- `Custom` - uživatel volí, která napětí vykreslit do grafu

Spuštění měření

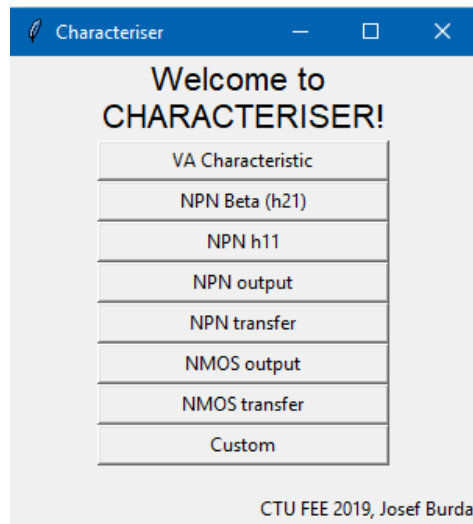
Jakmile uživatel vyplní všechna vstupní pole, stiskem tlačítka 'Measure' spustí měření. Každá měřicí obrazovka má metodu `measure_characteristic()`, která vyčte hodnoty vstupních polí a změří požadovanou charakteristiku.

Po přečtení hodnot vstupních polí a ověření jejich platnosti je otevřen sériový port. Pokud port nelze otevřít, je do textového výstupu vypsána varovná zpráva. Pokud je port otevřen úspěšně, je ověřena kompatibilita připojeného zařízení. Pokud zařízení není kompatibilní, je opět vypsána chybová hláška.

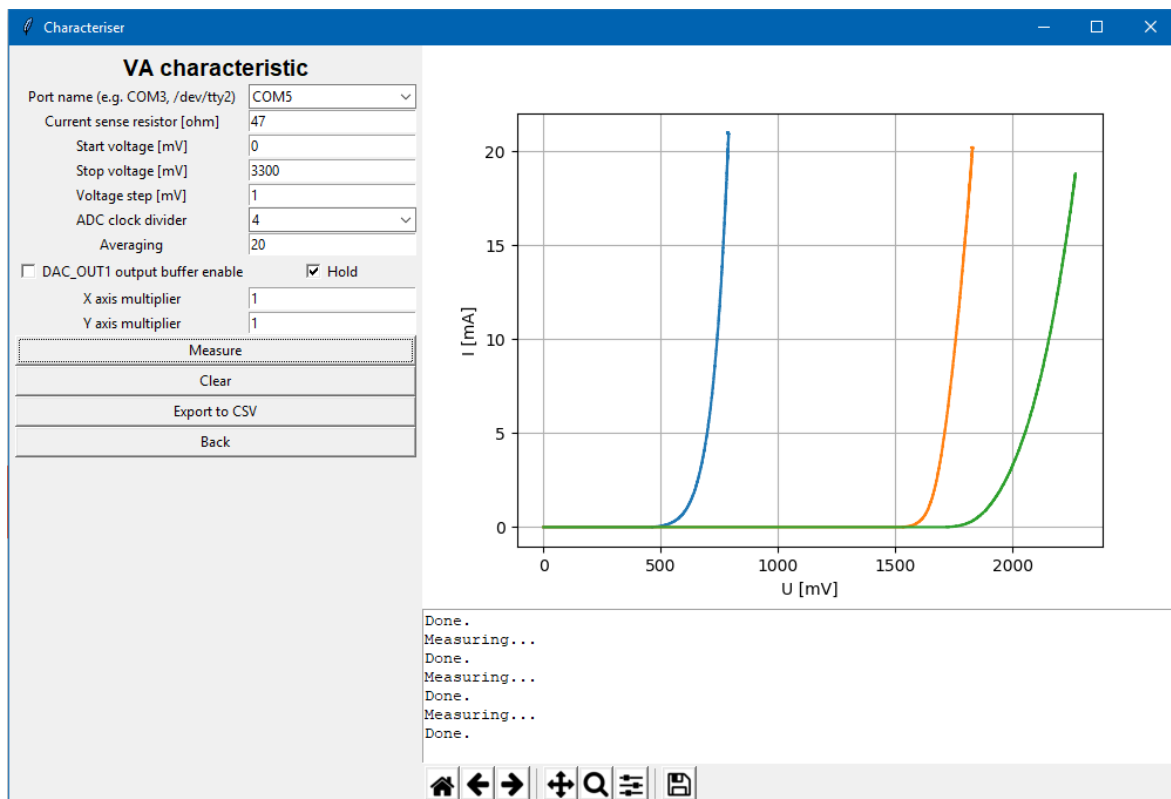
Jeli úspěšně navázáno spojení se zařízením, je pomocí funkce modulu `measure.py` změřená příslušná charakteristika. Pokud dojde při měření k chybě, je vypsána chybová hláška. Po úspěšném změření charakteristiky je buď vypsána číselná hodnota do textového pole, nebo je vykreslen graf změřené charakteristiky.

Výstup měření

Výsledky měření lze uložit dvěma způsoby. Tím prvním je uložení změřených dat do souboru ve formátu `.csv`. Tím druhým je uložení grafu jako obrázku. Graf lze ukládat jako bitmapu i jako vektorový obrázek.



Obrázek 6.3: Úvodní menu PC aplikace



Obrázek 6.4: Obrazovka pro měření VA charakteristiky s grafickým výstupem

Kapitola 7

Uživatelský návod

Tento projekt je určen k použití s vývojovým kitem NUCLEO STM32F303RE. Softwarové vybavení se skládá ze dvou částí. První je firmware pro mikrokontrolér na NUCLEO kitu a tím druhým je PC aplikace, která slouží k řízení automatických měření. V tomto uživatelském návodu se dozvíte jak systém Charakteriser používat.

Systém je možné používat ve dvou režimech. V manuálním režimu slouží mikrokontrolér jako čtyřkanálový voltmetr a dvoukanálový zdroj napětí, který je ovládán pomocí libovolné terminálové aplikace (například PuTTY). V automatickém režimu je měření řízeno PC aplikací, která je ovládána prostřednictvím grafického uživatelského rozhraní.

7.1 Než začnete měřit

Díky tomu, že součástí NUCLEO kitu je i zařízení ST-Link je nahrání firmwaru do mikrokontroléru jednoduché. Stačí zařízení připojit pomocí USB kabelu k PC. NUCLEO kit by se měl objevit jako datové úložiště. Firmware v podobě souboru typu `.bin` jednoduše zkopírujte do tohoto úložiště.

Aby bylo možné s mikrokontrolérem komunikovat je ve Windows nainstalovat Virtual COM port driver. Ve verzi Windows 10 probíhá tato instalace obvykle automaticky, ale někdy je nutné ovladač instalovat ručně. Všechny ovladače jsou dostupné na stránkách výrobce www.st.com.

7.2 Bezpečnost

Mikrokontrolér osazený na vývojovém kitu je citlivé elektronické zařízení. Proto musí být dodrženy základní bezpečnostní opatření. Jedním z možných nebezpečí je elektrostatický výboj. Před zahájením práce se proto uzemněte například dotykem radiátoru, zemního kolíku zásuvky nebo šasi počítače.

Rozsah vstupního napětí procesoru je 0 V až 3.3 V. Připojení napětí, mimo tento rozsah může vést k poškození procesoru. Proto při měření vždy mezi měření obvod a vstup procesoru zapojte rezistor (například 470 Ω).

7.3 Manuální režim

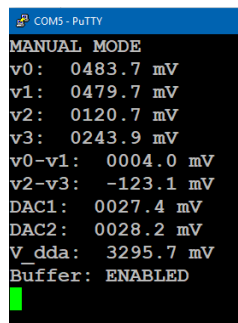
K použití manuálního režimu připojte vývojový kit k počítači pomocí USB kabelu. Určete, jaký port byl zařízení přiřazen (COMx, /dev/ttyXXX). Spusťte libovolný ter-

minálový program, ve kterém zadejte jméno portu, na kterém je připojen mikrokontrolér a komunikační rychlost nastavte na 115200 Baud/s. Po otevření sériového portu budete přivítáni úvodní obrazovkou, na které zvolíte manuální režim stiskem klávesy 'M'. Pokud se tato obrazovka nezobrazí, resetujte mikrokontrolér stiskem černého tlačítka na desce.

Na následující obrazovce uvidíte základní uživatelský návod. Samotné měření spustíte stiskem klávesy 'S'. Aplikace se ovládá takto:

- 'U' + napětí v mV - nastaví napětí DAC1
- 'V' + napětí v mV - nastaví napětí DAC2
- 'B' - přepne výstupní buffer DAC1
- 'H' - zobrazí nápovědu
- 'S' - zastaví/spustí měření (freeze)
- 'R' - návrat na úvodní obrazovku
- 'D' + x - přepne DAC1 do režimu digitálního výstupu s logickou hodnotou x
- 'E' + x - přepne DAC2 do režimu digitálního výstupu s logickou hodnotou x

Při nastavování logické hodnoty digitálního výstupu je na výstupu napětí 0V pokud $x=0$, pokud $x=1$ je na výstupu napětí 3.3V, pokud je hodnota x jiná, je pin přepnut zpět do analogového režimu. Na obrázku 7.1 je snímek manuálního měření.



```

COM5 - PuTTY
MANUAL MODE
v0: 0483.7 mV
v1: 0479.7 mV
v2: 0120.7 mV
v3: 0243.9 mV
v0-v1: 0004.0 mV
v2-v3: -123.1 mV
DAC1: 0027.4 mV
DAC2: 0028.2 mV
V_dda: 3295.7 mV
Buffer: ENABLED

```

Obrázek 7.1: Manuální režim v terminálovém okně

7.4 Automatická měření

Pro automatická měření charakteristik je k dispozici PC aplikace Characteriser. Tato aplikace funguje na OS Windows i na Linux. Na Linuxu je nutné, aby měl uživatel přístup k sériovému portu (upravte přístupová práva k `/dev/ttyXXX`).

Po spuštění se zobrazí obrazovka s výběrem charakteristik, tato obrazovka je na obrázku 6.3. Vyberte charakteristiku, kterou chcete měřit. Na obrazovce měření charakteristiky, jejíž příklad je na obrázku 6.4 vyberte vývojový kit z dostupných zařízení, vyplňte hodnoty rezistorů, napětí a proudů do vstupních polí. Zvolte hodnotu ADC clock divider, zmenšením hodnoty zkrátíte dobu měření, ale snížíte jeho přesnost. Hodnota Averaging určuje z kolika vzorků je průměrována výsledná hodnota. Zvýšením této hodnoty může být měření zpřesněno, ale také výrazně prodlouženo.

Zaškrtačím políčkem DAC_OUT1 output buffer enable vybíráte, zda má být výstupní buffer zapnut či ne. Zaškrtačím polem Hold volíte, zda mají být grafy změřených charakteristik ponechávány, nebo zda mají být překreslovány.

Do polí X axis multiplier a Y axis multiplier můžete zadat číslo, kterým mají být vynásobeny hodnoty vykreslované na osu X, respektive Y. Toto využijete při měření napětí mimo rozsah systému s pomocí děličů napětí.

Tlačítkem Measure spustíte měření. Tlačítkem Clear smažete již změřené charakteristiky. Tlačítkem Export to CSV uložíte změřená data do souboru `.csv`. Tlačítkem Back se vrátíte na úvodní obrazovku.

Pokud má charakteristika grafický výstup, je po jejím změření vykreslen její graf. Pod grafem je také textové pole, do kterého jsou vypisovány informace o měření. Pod tímto polem jsou ovládací prvky prostředí grafu. S jejich pomocí lze graf zvětšovat, posouvat a uložit jako obrázek.

Příklady použití systému Characteriser pro měření charakteristik jsou v kapitole 8.

Kapitola 8

Laboratorní úlohy

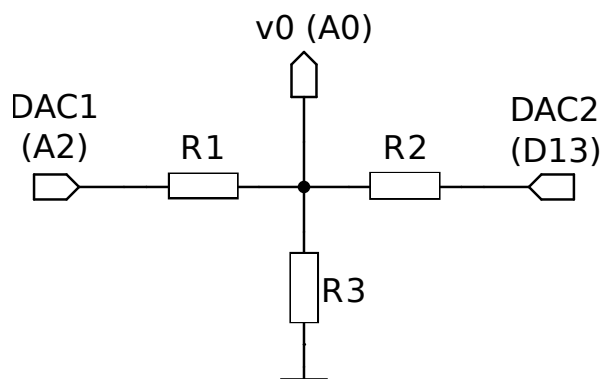
Tato kapitola obsahuje sbírku úloh, při jejichž řešení má být využit mnou vytvořený měřicí systém. Tyto úlohy slouží k ověření základních principů elektroniky.

8.1 Ověření principu superpozice

Princip superpozice je metoda analýzy obvodů s více zdroji napětí a proudu. V obvodu je vždy ponechán jeden zdroj a ostatní jsou nahrazeny jejich vnitřním odporem. Vnitřní odpor ideálního zdroje napětí je nulový, kdežto vnitřní odpor ideálního zdroje proudu je nekonečný. U reálných zdrojů se k těmto hodnotám snažíme s různou mírou úspěšnosti přiblížit. Následně jsou vypočteny požadované obvodové veličiny. Toto je provedeno pro každý zdroj. Z jednotlivých vypočtených hodnot lze výsledné hodnoty určit sečtením dílčích hodnot.

Zapojte obvod na obrázku 8.1 a zapněte *Characteriser* v manuálním režimu. Rezistory v obvodu volte alespoň jednotky $k\Omega$. Pokud byste zvolili rezistory s menším odporem mohla by se projevit nedokonalost výstupů DAC, jako zdrojů napětí a dolšo by k ovlivnění měření. Nastavte na kanálech 1 ('U' + napětí v mV) a 2 ('V' + napětí v mV) DA převodníku libovolná napětí. Zaznamenejte si napětí v_0 .

Přepněte výstup DAC1 (A2) do digitálního režimu s výstupem 0 (zadejte 'D' + '0') a zaznamenejte napětí v_0 . Přepněte výstup DAC2 zpět do analogového módu ('D' + libovolný znak). Přepněte výstup DAC2 ('E' + '0'), zaznamenejte v_0 . Ověřte, že první změřené napětí je opravdu součtem zbylých dvou. Celé měření početně ověřte.



Obrázek 8.1: Zapojení úlohy pro ověření principu superpozice

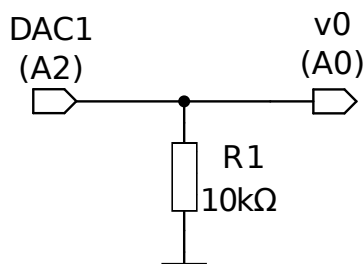
8.2 Ověření Théveninova teorému

Podle Théveninova teorému, lze každý libovolně složitý lineární obvod nahradit ideálním zdrojem napětí a sériovým rezistorem. Tento princip lze ověřit změřením výstupního odporu DA převodníku s deaktivovaným výstupním bufferem.

Zapněte *Characteriser* v manuálním režimu. Nastavte na DAC1 libovolné napětí (například 1 V) a deaktivujte výstupní buffer (stiskem 'B'). Poznamenejte si výstupní napětí $U_{01} = v0$. Výstup DAC1 připojte rezistorem $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ na zem, jak je naznačeno na obrázku 8.2 a opět si poznamenejte napětí $U_{02} = v0$. Vnitřní odpor DA převodníku R_{DAC} z těchto hodnot vypočtete následujícím způsobem:

$$R_{DAC} = R_1 \left(\frac{U_{01}}{U_{02}} - 1 \right) \quad (8.1)$$

Stejným způsobem lze změřit vnitřní odpor digitálního výstupu v logické 1. Výstup má v tomto režimu malý vnitřní odpor, proto je doporučeno volit rezistor $R_1 = 200 \dots 500\ \Omega$ aby nedošlo k poškození procesoru v důsledku velkých výstupních proudů. Maximální proud pinem v digitálním režimu je 25 mA [2].



Obrázek 8.2: Schéma obvodu pro měření vnitřního odporu DA převodníku

8.3 Přední napětí diod

Pomocí systému *Characteriser* změřte voltampérovou charakteristiku křemíkové diody, červené a zelené LED. Diody zapojte dle schématu 8.3. Porovnejte přední napětí U_F jednotlivých diod.

8.4 Ověření závislosti předního napětí diody na teplotě

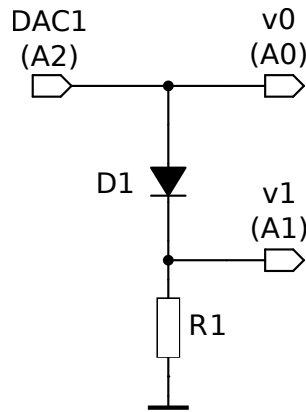
Pro proud diodou platí tzv. Shockleyho rovnice

$$I = I_0(e^{U_D/(nU_T)} - 1) \quad (8.2)$$

$$U_T = \frac{kT}{q}. \quad (8.3)$$

Dosazením vztahu 8.3 do rovnice 8.2 vidíme, že proud diodou závisí na přiloženém napětí a teplotě diody.

Pomocí programu *Characteriser* změřte voltampérovou charakteristiku křemíkové diody zapojené podle schématu na obrázku 8.3. Po změření charakteristiky diodu zahřejte, například uchopením prsty, a změřte charakteristiku znovu. Ujistěte se, že je zaškrtnuto políčko *Hold*, což umožní porovnat charakteristiky v jednom grafu. Měli byste pozorovat posun charakteristiky doleva o přibližně -2 mV/K .



Obrázek 8.3: Měření voltampérové charakteristiky

8.5 Ověření diodového modelu bipolárního tranzistoru

Bipolární tranzistory obsahují přechody PN a NP. Tyto přechody lze modelovat jako dvě diody, jak je naznačeno na obrázku 8.4.

Ověřte platnost tohoto modelu změřením následujících VA charakteristik:

Pro NPN

- báze-kolektor
- báze-emitor

Pro PNP

- kolektor-báze
- emitor-báze

Měření provádějte na zapojení na obrázku 8.3, kde je dioda nahrazena přechodem tranzistoru. Srovnáním změřených charakteristik s charakteristikou Si diody, kterou jste změřili v některé z předchozích úloh, zjistíte, že jsou si velmi podobné.

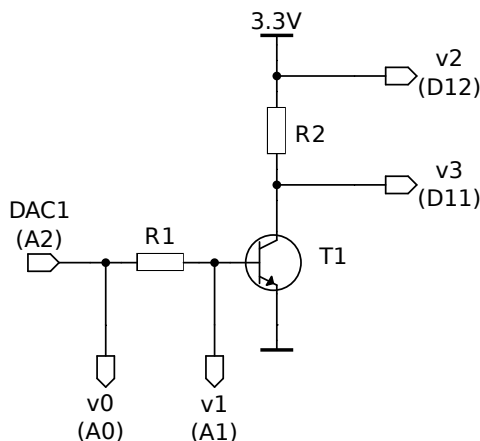


Obrázek 8.4: Diodové modely bipolárních tranzistorů

8.6 Převodní charakteristika NPN tranzistoru

Proud kolektorem bipolárního tranzistoru je řízen proudem do jeho báze. Závislost kolektorového proudu I_C na bázovém I_B nazýváme převodní charakteristika a lze ji vyjádřit takto $I_C = f(I_B)$. Pomocí nástroje 'NPN Transfer' aplikace *Characteriser* změřte převodní charakteristiku libovolného NPN tranzistoru zapojeného dle schématu na obrázku 8.5. Volba hodnot R_1 a R_2 závisí na požadovaném rozsahu vstupních a výstupních proudů. Pro tranzistor BC546C volte například $R_1 = 47 \text{ k}\Omega$ a $R_2 = 470 \Omega$.

Z charakteristiky odečtete proudový zesilovací činitel β a porovnejte ho s údajem v datasheetu.



Obrázek 8.5: Zapojení pro měření převodní charakteristiky NPN tranzistoru

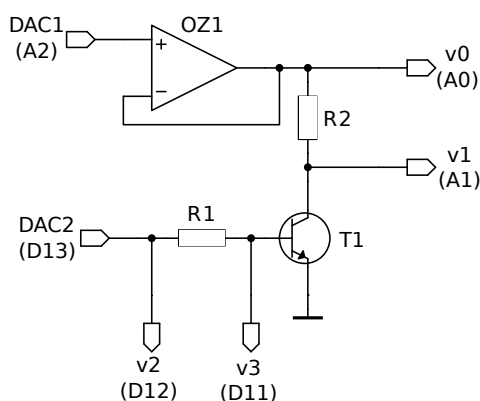
8.7 Výstupní charakteristika NPN tranzistoru

Při návrhu zesilovačů musíme zvolit pracovní bod. Při jeho volbě se nám hodí znát výstupní charakteristiku tranzistoru, tedy závislost proudu kolektorem I_C na napětí U_C ($I_C = f(U_C)$) při konstantním proudu bázi I_B .

Zapojte NPN tranzistor dle schématu na obrázku 8.6 a pomocí nástroje 'NPN Output' změřte výstupní charakteristiku zvoleného tranzistoru při daném bázevém proudu. Hodnotu R_1 volte dle požadovaného bázevého proudu. Z předchozí úlohy znáte proudový zesilovací činitel tranzistoru, nebo jej můžete změřit pomocí nástroje 'NPN Beta', ze kterého můžete určit jaký bude saturační proud kolektoru. Podle této hodnoty volte vhodný rezistor R_2 .

8.8 Vstupní odpor báze NPN tranzistoru - h_{11E}

Parametr h_{11E} udává, jak se změní napětí báze při změně proudu. Tento parametr je potřeba znát při návrhu zesilovačů střídavých signálů. Pro daný proud kolektorem



Obrázek 8.6: Zapojení pro měření výstupní charakteristiky NPN tranzistoru

lze tuto hodnotu určit takto:

$$r_e = \frac{U_t}{I_C} \quad (8.4)$$

$$h_{11E} = r_e \cdot \beta, \quad (8.5)$$

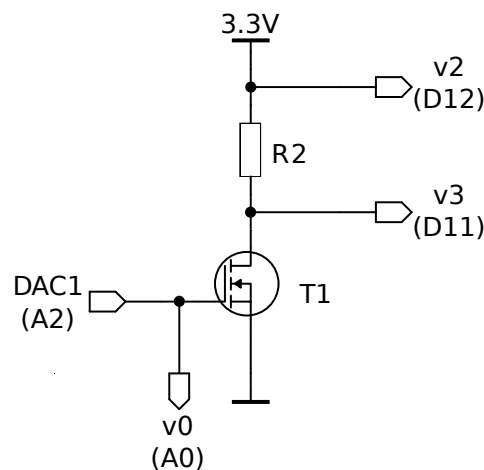
kde U_t je termoneapětí, které je při pokojové teplotě přibližně 26 mV, I_C je proud kolektorem a $\beta = h_{21E}$ je proudový zesilovací činitel tranzistoru.

Pomocí nástroje 'NPN h11' změřte tento parametr pro zvolený tranzistor zapojení dle schématu na obrázku 8.6. Porovnejte změřenou hodnotu s hodnotou vypočtenou dle uvedeného vztahu.

8.9 Převodní charakteristika N-MOSFET

Převodní charakteristika N-MOS tranzistoru vyjadřuje závislost proudu drain I_D na napětí gate U_D . Z této charakteristiky lze určit prahové napětí tranzistoru U_T . Prahové napětí je napětí mezi gate a source, při kterém vzniká vodivý kanál mezi drain a source.

Nástrojem 'NMOS Transfer' změřte převodní charakteristiku N-MOS tranzistoru zapojeného podle schématu na obrázku 8.7. Ze změřené charakteristiky určete prahové napětí U_t a porovnejte změřenou hodnotu s údaji v datasheetu.



Obrázek 8.7: Zapojení pro měření převodní charakteristiky N-MOS tranzistoru

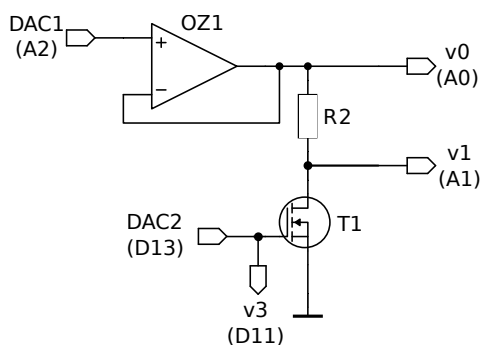
8.10 Výstupní charakteristika N-MOSFET

Výstupní charakteristika N-MOS tranzistoru vyjadřuje závislost proudu drain I_D na napětí drain U_D při konstantním napětí gate U_G .

Změřte převodní charakteristiku tranzistoru zapojeného dle schématu 8.8 pomocí nástroje 'NMOS Output'. Změřenou charakteristiku porovnejte s charakteristikou uvedenou v datasheetu.

8.11 Vstupní napěťový offset operačního zesilovače

Při některých použitích operačních zesilovačů potřebujeme znát vstupní napěťový offset U_{off} . Je to napětí, které musí být přivedeno na vstup zesilovače, aby na výstupu

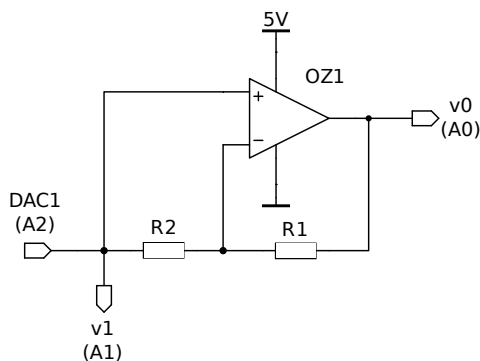


Obrázek 8.8: Zapojení N-MOS tranzistoru pro měření výstupní charakteristiky

bylo napětí 0 V.

Protože U_{off} může být jak kladné, tak záporné a použitý zesilovač je napájen pouze z kladného napětí, musíme OZ posunout nulu, proto není neinvertující vstup připojen na nulu, ale na výstup DA převodníku. Zapojte operační zesilovač dle schématu na obrázku 8.9 s rezistory $R_2 \leq 100 \cdot R_1$. V manuálním režimu *Characteriser* nastavte napětí DAC1 například 1 V. Mezi rozdílem napětí $U_{out} = v_0 - v_1$ a napětovým offsetem U_{off} platí vztah:

$$U_{off} = \frac{U_{out}}{\frac{R_2}{R_1} + 1} \quad (8.6)$$

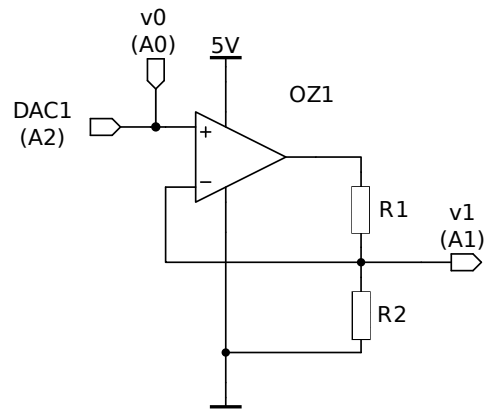


Obrázek 8.9: Měření výstupního napětového offsetu operačního zesilovače

8.12 Rozsah výstupního napětí operačního zesilovače

Při použití operačních zesilovačů potřebujeme znát rozsah výstupních napětí. Tento rozsah je často v datasheetech udáván jen pro jedno napájecí napětí. Proto je výhodné si změřit převodní charakteristiku tranzistoru.

Zapojte operační zesilovač dle schématu na obrázku 8.10. Pomocí nástroje 'Custom' systému *Characteriser* změřte charakteristiku. Konečné výstupní napětí nastavte na 2.5 V a X axis scaler a Y axis scaler nastavte na 2. Na osu X vykreslete napětí v_0 a na osu Y napětí v_1 . Ze změřené charakteristiky určete rozsah výstupního napětí.



Obrázek 8.10: Zapojení OZ pro měření rozsahu výstupního napětí

Kapitola 9

Závěr

V rámci této bakalářské práce jsem splnil všechny body jejího zadání. Hlavním cílem bylo vytvořit systém pro měření statických charakteristik pomocí mikrokontroléru. Byl zvolen mikrokontrolér STM303RE osazený na vývojové desce NUCLEO. Pro tento systém bylo potřeba vytvořit firmware pro mikrokontrolér a aplikaci pro nadřazené PC, které měření kontroluje a prezentuje výsledky.

Použití mikrokontroléru místo laboratorních přístrojů zavedlo do systému jistá omezení. Hlavním omezením tohoto systému je omezení rozsahu výstupních a měřených napětí na 0 V až 3.3 V, což je důsledkem toho, že mikrokontrolér je z tohoto napětí napájen. Dalším nedostatkem je omezený proud, který lze odebírat z výstupu DA převodníku. Po podrobné analýze těchto omezení jsem navrhl externí obvody, kterými lze tato omezení obejít.

Pro mikrokontrolér jsem vytvořil firmware, který zajišťuje inicializaci a obsluhu všech použitých periférií procesoru. Primárním úkolem firmwaru je vykonávání příkazů z nadřazeného PC a odesílání naměřených hodnot zpět. Firmware také nabízí manuální mód, ve kterém s uživatelem komunikuje prostřednictvím terminálové aplikace. Firmware jsem implementoval v jazyce C bez použití knihoven jako například HAL.

Aplikaci pro nadřazené PC jsem implementoval v jazyce Python s využitím grafické knihovny `tkinter`. Vzhledem k tomu, že Python je multiplatformní, je možné mou aplikaci používat na OS Windows i Linux. Verzi pro MacOS jsem bohužel nevytvořil, jelikož nemám přístup k počítači s tímto operačním systémem. Aplikace nabízí možnost automatického měření charakteristik základních elektronických součástek. Změřené charakteristiky jsou uživateli prezentovány v podobě grafu. Graf může být uložen jako obrázek a data exportována pro další zpracování.

Vzhledem k tomu, že systém má být využit ve výuce, navrhl jsem několik laboratorních úloh. Při řešení těchto úloh si studenti osvojí práci se systémem a ověří základní vlastnosti vybraných elektronických součástek. Tyto úlohy jsou navrženy tak, aby k jejich řešení bylo zapotřebí minimum součástek.

Vytvořil jsem tedy komplexní systém pro měření statických charakteristik vybraných polovodičových součástek. Softwarová výbava systému obsahuje jisté chyby, které v budoucnosti hodlám opravit. Díky tomu, jakým způsobem byla implementována PC aplikace je poměrně jednoduché přidat další měřicí procedury dle požadavků uživatelů. Rád bych také upravil firmware mikrokontroléru pro použití na jiných modelech procesorů STM32.

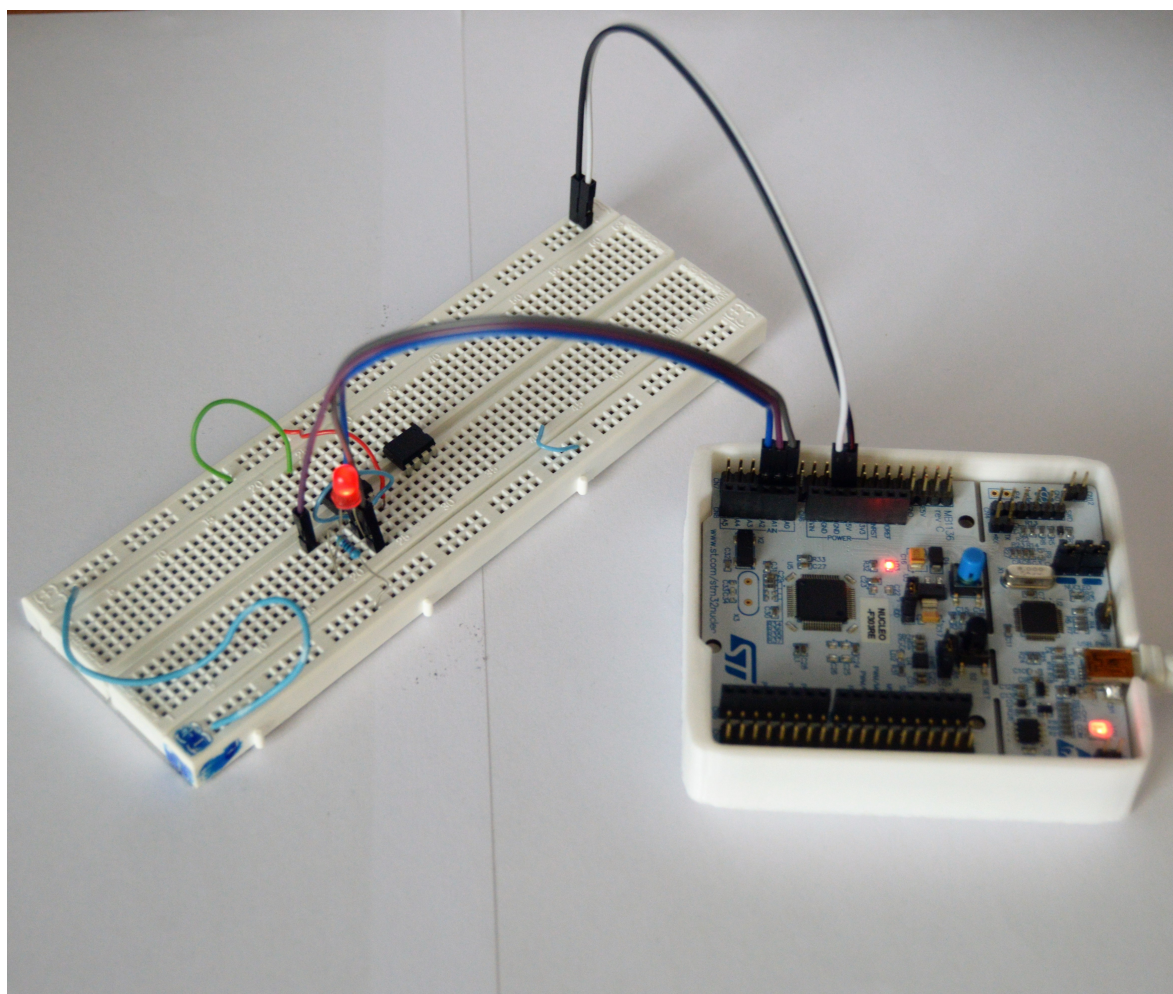
Bibliografie

- [1] *STM32F3 Reference manual*. RM0316. Rev 8. STMicroelectronics. Led. 2017. URL: www.st.com.
- [2] *STM32F303 Datasheet*. DS10362. Rev 5. STMicroelectronics. Říj. 2016. URL: www.st.com.
- [3] Yiu, Joseph. *The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors*. 2. vyd. Oxford: Newnes, 2010. ISBN: 978-0-12-382091-4.
- [4] Nastase, Adrian S. *Design a Bipolar to Unipolar Converter to Drive an ADC*. URL: <https://masteringelectronicsdesign.com/design-a-bipolar-to-unipolar-converter/>. (cit. 25.5.2019).
- [5] Nastase, Adrian S. *Design a Unipolar to Bipolar Converter for a Unipolar Voltage Output DAC*. URL: <https://masteringelectronicsdesign.com/design-a-unipolar-to-bipolar-converter-for-a-unipolar-voltage-output-dac/>. (cit. 2019-04-25).
- [6] Trump, Bruce. *Handy Gadgets and Resistor Divider Calculations*. URL: https://e2e.ti.com/blogs_/archives/b/thesignal/archive/2013/05/13/handy-gadgets. (cit. 2019-04-27).
- [7] *LM124/LM224/LM324/LM2902, Low Power Quad Operational Amplifiers data-sheet*. SNOSC16D. Rev D. Texas Instruments. Led. 2015. URL: www.ti.com.
- [8] *High performance CMOS quad operational amplifier*. TS274. Rev 3. STMicroelectronics. Ún. 2018. URL: www.st.com.
- [9] *MCP6001/1R/1U/2/4, 1 MHz, Low-Power Op Amp*. DS21733J. Microchip. 2009. URL: www.microchip.com.
- [10] *BC546 - NPN Amplifier Transistors*. BC546/D. Rev 7. ON Semiconductor. Červ. 2012. URL: www.onsemi.com.
- [11] *BS170 - Small Signal MOSFET*. BS170/D. Rev 7. ON Semiconductor. Lis. 2017. URL: www.onsemi.com.
- [12] *Single-supply Op Amp Design Techniques*. SLOA030A. Texas Instruments. URL: https://embedded.fel.cvut.cz/sites/default/files/kurzy/ETC/Literatura/sloa030a___single_Supply_Op_Amp_Techniques_.pdf. (cit. 2019-04-14).
- [13] Vít, Vítězslav. *Úvod do Tkinter*. 2006. URL: <http://tkinter.programujte.com/>. (cit. 2019-04-10).
- [14] *Python 3.7.3 documentation*. Python Software Foundation. 2001-2019. URL: <https://docs.python.org/3.7/>. (cit. 2019-04-11).

- [15] *Matplotlib*. The Matplotlib development team. URL: <https://matplotlib.org/index.html>. (cit. 2019-04-11).

Příloha A

Fotodokumentace použitého hardware



Obrázek A.1: Příklad zapojení úlohy měření VA charakteristiky diody

Příloha B

Obsah přiloženého CD

/	
├── Firmware	FW pro vývojový kit
│ ├── sources	Zdrojové kódy
│ ├── characteriser.bin	Binární soubor pro kit
│ └── README.txt	Návod k FW
├── Firmware mbed	Prototyp FW v mbed
│ ├── characteriser_prot.cpp	Zdrojový kód
│ ├── characteriser_prot.bin	Binární soubor pro kit
│ └── README.txt	Návod k FW
├── Application	Aplikace pro PC
│ ├── sources	Zdrojové kódy
│ ├── characteriser_desktop.exe	Spustitelný soubor pro Windows
│ └── characteriser_ubuntu	Spustitelný soubor pro Ubuntu
├── Data	Data změřených charakteristik
│ ├── DAC	Charakteristiky DAC
│ ├── OpAmp	Charakteristiky OZ
│ └── other	Další (diody, tranzistory)
├── Thesis	Text práce
│ ├── sources	Soubory L ^A T _E Xa obrázky
│ └── BP_Burda_Josef_2019.pdf	Práce ve formátu PDF