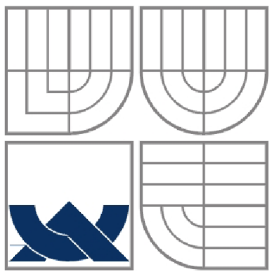
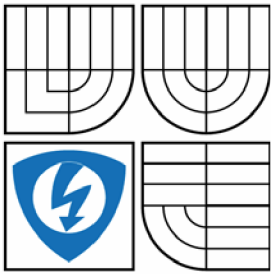


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘICÍ MODUL NAPÁJENÝ PO OPTICKÉM VLÁKNĚ

MEASUREMENT MODULE WITH POWER OVER FIBER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

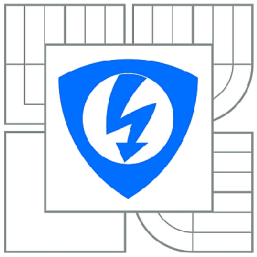
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVEL DVORSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK HAVRÁNEK, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student:	Bc. Pavel Dvorský	***ID:***	73056
Ročník:	2	***Akademický rok:***	2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Měřicí modul napájený po optickém vláknu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Podrobně se seznamte se způsobem návrhu nízkopříkonového zařízení, které by bylo napájeno světelným signálem po optickém vláknu a věnujte se sestavení vhodné koncepce takového zařízení a výběru konkrétních komponent. Jedná se zejména o výběr vhodného převodníku světlo/el. proud, DC/DC měniče, analogového předzpracování (operačního zesilovače), digitalizace analogového signálu (MCU s A/D převodníkem).
2) Prakticky ověřte vhodnost jednotlivých komponent pro stavbu zařízení s velmi nízkou spotřebou napájené po optickém vláknu, zejména konstrukci zvyšujícího DC-DC měniče.
3) Na základě předchozích zjištění navrhněte a realizujte zařízení napájené po optickém vláknu, které bude využito pro měření analogového signálu (napětí a/nebo proudu) v rozsahu 50 mV až 50 V (s přepínáním v alespoň 4 podrozsazích) a přesností měření alespoň 1% z měřené hodnoty. Přenos naměřených dat bude realizován po optickém vláknu v digitální podobě do vyhodnocovacího modulu připojeného k počítači.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Rabaey, J. Low Power Design Essentials (Integrated Circuits and Systems). First Edition, 288 s. Springer, 2009. ISBN 0387717129.
[2] Katalogové listy Analog Devices, Linear Technology, Maxim, Texas Instruments, Atmel, Renesas, Microchip.

Termín zadání:	7.2.2011	***Termín odevzdání:***	23.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.
Předseda oborové rady

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí nízkopříkonového měřicího zařízení napájeného světelným signálem po optickém vláknu. Úkolem zařízení je měřit vstupní signál v rozsahu 50 mV až 50 V a výsledné měřené hodnoty posílat skrz optické vlákno do vyhodnocovacího modulu.

Klíčová slova

DC-DC měnič, nízkopříkonový, MSP430, INA321, optické vlákno, S882Z, S8353

Abstract

The thesis deals with design and construction of low-power measurement device with power over optical fiber. This device should measure input signal in range of 50 mV to 50 V and the results of measurement sent through optical fiber into sensing module.

Keywords

DC-DC converter, low-power, MPS430, INA321, fiber, S882Z, S8353

Bibliografická citace:

DVORSKÝ, P. *Měřicí modul napájený po optickém vláknu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 57s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Měřicí modul napájený po optickém vlákně jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.
Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 23. května 2011 .....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Havránkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 23. května 2011 .....

podpis autora

Obsah

1 Úvod ... 12
2 Převodník světlo na elektrický proud ... 14
3 Konverze napětí ... 16
3.1 Princip zvyšujícího DC-DC měniče (boost) ... 16
3.2 Princip nábojové pumpy ... 17
3.3 Kombinace nábojové pumpy a DC-DC měniče ... 18
3.3.1 S-882Z ... 19
3.3.2 Kombinace S-882Z s DC-DC měničem S-8353 ... 20
3.3.3 Kombinace S882Z a DC-DC měniče TPS61201 ... 25
3.3.4 Kombinace S882Z a DC-DC měniče MCP 1623/24 ... 28
3.4 Ostatní měřené DC-DC měniče ... 31
3.5 LTC3108 ... 33
3.6 Výběr nejvhodnější napájecí varianty ... 33
4 Výběr MCU S A/D převodníkem ... 35
4.1 Způsoby minimalizace spotřeby MCU ... 35
4.1.1 Úsporné režimy MCU ... 35
4.1.2 Oscilátor ... 36
4.1.3 Periferie na čipu ... 36
4.1.4 Brown-out detektor (BOD) ... 37
4.2 Výběr konkrétního typu MCU ... 37
4.2.1 PIC ... 37
4.2.2 MSP 430 ... 39
4.2.3 STM8L ... 41
4.3 C8051F90x – 91x ... 42
4.4 Porovnání jednotlivých MCU ... 43
4.5 Externí nízkopříkonové A/D převodníky ... 44
5 Analogové předzpracování ... 46
5.1 Výběr operačního zesilovače ... 46
5.2 Porovnání vybraných operačních zesilovačů ... 46
5.3 Návrh analogového předzpracování ... 47
5.3.1 Měření parametrů rozsahu 0 - 100 mV ... 50
6 Závěr ... 54

Seznam obrázků

Obrázek 1: Blokové schéma měřicího modulu 12
Obrázek 2: Princip měření charakteristik fotodiody 14
Obrázek 3: Závislost výkonu fotodiody na zatěžovacím odporu pro různé proudy laserové diody I_d 15
Obrázek 4: Princip zvyšujícího DC-DC měniče [19] 17
Obrázek 5: Princip synchronního DC-DC měniče [19] 17
Obrázek 6: Základní schéma zapojení nábojové pumpy [19] 18
Obrázek 7: Princip funkce nábojové pumpy (vlevo spínač S1 OFF a S2 ON, vpravo S1 ON, S2 OFF) [19] 18
Obrázek 8: Princip fungování S882Z [1] 20
Obrázek 9: Princip funkce kombinace S-882Z a DC-DC měniče S-8383 [1] 21
Obrázek 10: Princip měření kombinace S882Z + S8353 22
Obrázek 11: Schéma zapojení S882Z a S8353 23
Obrázek 12: Závislost účinnosti obvodu na výstupním proudu pro různé hodnoty vstupního napětí 25
Obrázek 13: Schéma zapojení S882Z a TPS61201 26
Obrázek 14: Závislost efektivity na výstupním proudu pro hodnoty vstupního napětí 0,3 - 0,6 V 28
Obrázek 15: Schéma zapojení S882Z a MCP1624 29
Obrázek 16: Závislost účinnosti MCP1624 + S8827 na výstupním proudu pro různé hodnoty vstupního napětí 31
Obrázek 17: Schéma zapojení MAX 1424 32
Obrázek 18: Schéma zapojení LTC4329 33
Obrázek 19: Průměrná spotřeba proudu [4] 36
Obrázek 20: Systém hodin u MSP430 [11] 40
Obrázek 21: Frekvenční charakteristika INA 2321/321 47
Obrázek 22: Schéma zapojení měřicího kanálu pro rozsah 50 V – 5 V 48
Obrázek 23: Schéma zapojení pro rozsah 5 V - 500 mV 49
Obrázek 24: Schéma zapojení pro rozsah 500 mV – 100 mV 49
Obrázek 25:Schéma zapojení pro rozsah <100 mV 50

Obrázek 26: Vstupní signál (U_{pp}=20,4 V, f = 1 kHz) 51
Obrázek 27: Výstupní signál (kurzor 2,5V) 51
Obrázek 28: Detail sestupné hrany výstupního signálu t_s=7μs (kurzor 1 hodnota 3V, kurzor 2 hodnota 2,5 V) 52
Obrázek 29: Vstupní signál 52
Obrázek 30: Výstupní signál (kurzor 1- 0 V, kurzor 2 2,5V) 53

Seznam tabulek

Tabulka 1: Závislost výstupního výkonu fotodiody na proudu laserovou diodou I_d pro různé hodnoty zatěžovacích odporů 15
Tabulka 2: Účinnost obvodu pro vstupní napětí v rozsahu 0,3 V 23
Tabulka 3: Účinnost obvodu pro vstupní napětí 0,4 V 24
Tabulka 4: Účinnost obvodu pro vstupní napětí 0,5 V 24
Tabulka 5: Účinnost obvodu pro vstupní napětí 0,6 V 24
Tabulka 6:Účinnost S882Z + TPS61201 při vstupním napětí 0,3 V 26
Tabulka 7: Účinnost S882Z + TPS61201 při vstupním napětí 0,4 V 27
Tabulka 8: Účinnost S882Z + TPS61201 při vstupním napětí 0,5 V 27
Tabulka 9: Účinnost S882Z + TPS61201 při vstupním napětí 0,6 V 27
Tabulka 10: Účinnost MCP1624+S8827 pro vstupní napětí 0,3 V 29
Tabulka 11: Účinnost MCP1624+S8827 pro vstupní napětí 0,4 V 30
Tabulka 12: Účinnost MCP1624+S8827 pro vstupní napětí 0,5 V 30
Tabulka 13: Účinnost MCP1624 + S8827 pro vstupní napětí 0,6 V 30
Tabulka 14:Ukončení činnosti MAX 1424 32
Tabulka 15: Základní vlastnosti PIC [6] 38
Tabulka 16: Spotřeba v závislosti na aktivitě a frekvenci oscilátoru [8] 38
Tabulka 17: Porovnání jednotlivých rodin MSP430 [9] 40
Tabulka 18: Spotřeba v jednotlivých módech provozu [15] 42
Tabulka 19: Spotřeba v jednotlivých módech provozu 43
Tabulka 20: Srovnání jednotlivých MCU 43
Tabulka 21: Orientační porovnání chyb interních A/D převodníků 44
Tabulka 22: Porovnání nízkopříkonových externích A/D převodníků 45
Tabulka 23: Orientační porovnání nelinearit a chyb jednotlivých A/D převodníků 45
Tabulka 24: Porovnání vybraných operačních zesilovačů 47

Seznam zkratek

BOD (Brown-out detektor) – součástka, která chrání MCU před poklesem napájecího napětí pod definovanou úroveň

DMA (Direkt Memory Access) – přímý přístup periferií k paměti RAM bez nutnosti zapnutí CPU

DPS Deska plošných spojů

LFO (Low Frequency oscillator) nízkofrekvenční oscilátor

MCU Mikrokontroler

PWM (Pulse Width Modulation) pulzně šířková modulace

RTCC (Real Time Clock Calendar) funkce která v MCU udržuje aktuální čas

SAR (Successive Approximation Register) jedná se o druh A/D převodníku, kdy převod je zajišťován metodou postupné aproximace.

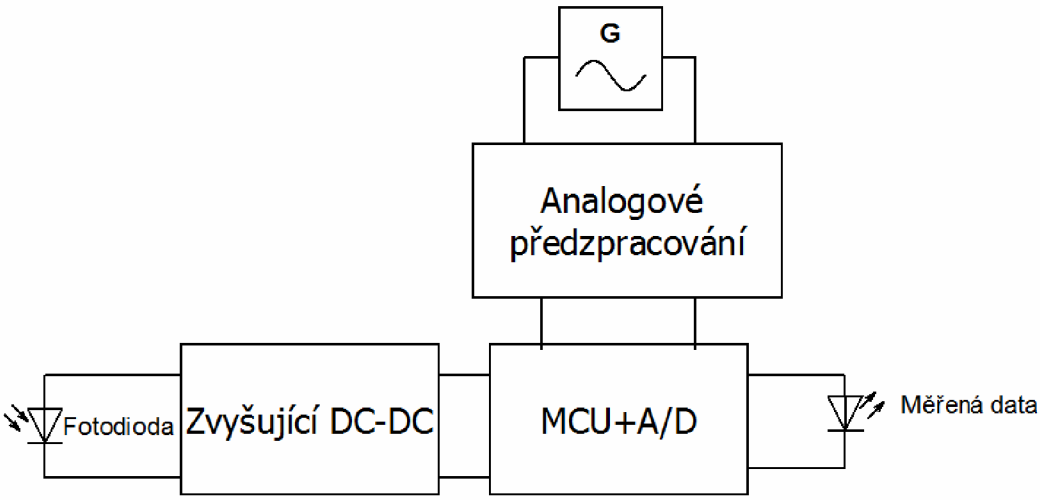
WDT (Watchdog Timer) je funkce MCU, která kontroluje, zdali nedošlo k „zaseknutí“, pokud k němu dojde, resetuje celý MCU.

1 ÚVOD

V souvislosti s dnešními ekologickými i ekonomickými trendy ve společnosti dochází k neustálému snižování energetické náročnosti elektroniky. Úspory lze docílit mnoha způsoby, patrně nejznámějším způsobem je snížení napájecího napětí, protože jak známo, výkon je dán součinem napětí a proudu. Pokud snížíme napájecí napětí, pak nám poklesne i protékající proud, čímž snížíme spotřebu celého zařízení.

Nízkonapěťová zařízení nám umožňují konstrukci zařízení, která mohou být napájena z velmi netradičních zdrojů energie, jako je například termočlánek, solární článek, fotodioda atp. Právě konstrukcí takového zařízení se zabývá i tato diplomová práce, jejíž cílem je sestrojit měřicí modul, který bude získávat energii pro svou funkci ze světelné energie přenášené optickým vláknem.

Hlavním úskalím konstrukci nízkonapěťových zařízení je, jakým způsobem z napětí pohybující se v hodnotách kolem 0,3 V získat napětí potřebné pro správnou funkčnost ostatních součástek, protože většina běžně dostupných zvyšujících DC-DC měničů má hodnotu minimálního napětí rovnu 0,7 V.



Obrázek 1: Blokové schéma měřicího modulu

Na obrázku 1 je zobrazeno principielní schéma měřicího modulu. Zdrojem pro napájení celého zařízení je elektrický proud získaný za pomoci fotodiody z optického vlákna. Pokud diodu zatížíme, pak výsledné napětí je velmi malé v řádech (0,3 V až 0,6 V) a je potřeba jej zvýšit na vhodné napětí nutné pro funkčnost mikrokontroleru a operačních zesilovačů použitých pro předzpracování signálu.

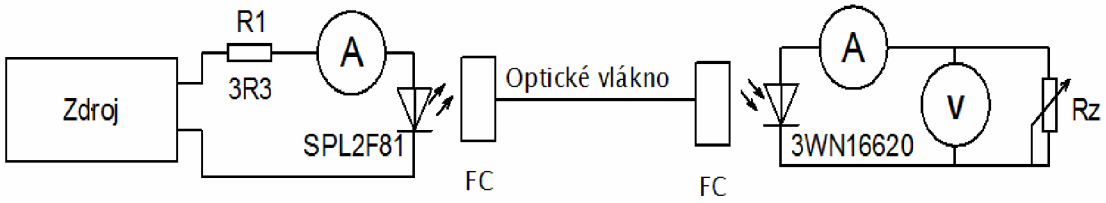
Dalším prvkem v řetězci je mikrokontroler s A/D převodníkem. Jeho úkolem je digitalizace vstupního analogového signálu a následné odesílání měřených dat do nadřazeného měřicího řetězce. Tento přenos má být prováděn po stejném optickém vlákně jako napájení. Měřeným signálem, je signál z rogowského cívky o velikosti 50 V- 50 mV, který je nutný před zpracováním v AD převodníku vhodně upravit.

V jednotlivých kapitolách jsou postupně popsány jednotlivé části měřicího modulu a výběr nejvhodnějších komponent, kdy hlavním požadavkem je jejich nízká spotřeba a vysoká efektivita.

2 PŘEVODNÍK SVĚTLO NA ELEKTRICKÝ PROUD

V této kapitole bude popsána fotodioda, která bude použita pro převod světelné energie z optického vlákna na elektrický proud.

Pro naše měřicí zařízení bude dle doporučení v literatuře [23] použita fotodioda TESLA 3 WN 16620 vzhledem k její výborné citlivosti, která je dána závislostí dopadajícího optického výkonu na proud fotodiody. Pro další úvahy bylo potřeba získat její voltampérovou charakteristiku a zjistit výkon, který je schopna dodat.



Obrázek 2: Princip měření charakteristik fotodiody

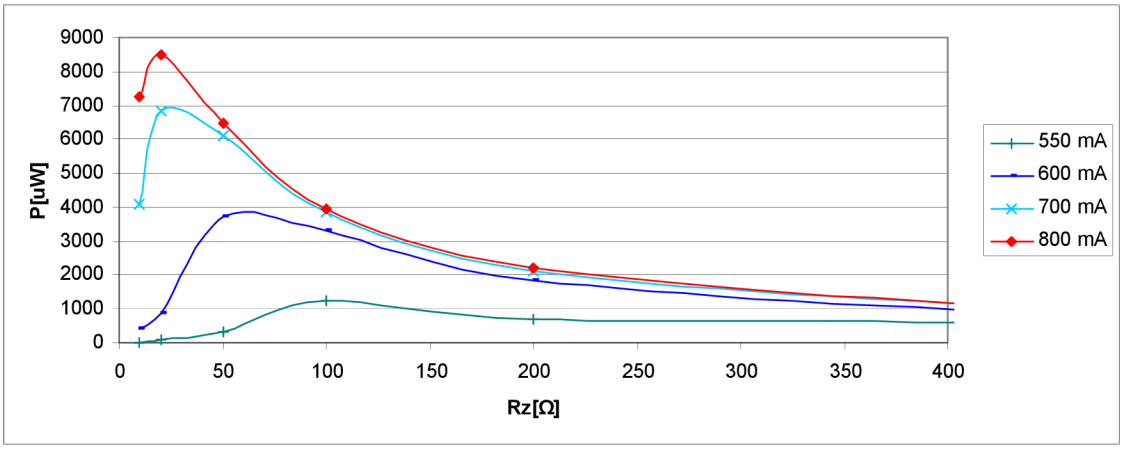
Obrázek 2 zobrazuje princip, jakým byly měřeny charakteristiky fotodiody. Za pomoci ampérmetru a zdroje byl nastavován vstupní proud do laserové diody SIEMENS SPL 2F81. Generovaný světelný paprsek procházel optický vláknem MM GI 62,5 / 125 μm a dopadal na fotodiodu Tesla 3WN16620, ke které byl připojen zatěžovací odpor R_z. Hodnoty zatěžovacího odporu byly nastavovány v rozsahu 10 Ω až 1 kΩ. Jako zdroj byl použit přístroj ZPA Kosíře AUL310. Proudy a napětí byly měřeny multimetry Agilent 34401A. Vliv měřicích přístrojů na výsledky měření byl zanedbán.

V příloze 1 jsou uvedeny tabulky naměřených hodnot a výsledné grafy voltampérových charakteristik fotodiody v závislosti na vstupním proudu do laserové diody a zatěžovacím odporu. Z těchto tabulek byl dopočítán výstupní výkon z fotodiody (viz. tabulka 1).

Obrázek 3 zobrazuje závislost výstupního výkonu fotodiody na zatěžovacím odporu pro různé hodnoty proudů do laserové diody. Zcela dle očekává s rostoucí hodnotou vstupního proudu I_d laserové diody vzrůstá i výkon. Podstatná ovšem je poloha maxima v závislosti na zatěžovacím odporu. Ta se pohybuje v rozsahu od 100 Ω – 20 Ω. Nejvyšší výkon je dosažen při vstupním proudu do laserové diody 800 mA a zatěžovacím odporu 20 Ω. Z čehož se dá usoudit, že vnitřní odpor takto sestrojeného zdroje bude 20 Ω. Hodnota proudu při maximálním výkonu je 20,62 mA a hodnota napětí 413 mV.

Tabulka 1: Závislost výstupního výkonu fotodiody na proudu laserovou diodou I_d pro různé hodnoty zatěžovacích odporů

I_d[mA]/R_z[Ω]	P[μW]						
	10 Ω	20 Ω	50 Ω	100 Ω	200 Ω	500 Ω	1000 Ω
100	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,06	0,12
200	0,01	0,02	0,07	0,14	0,24	0,61	1,31
300	0,07	0,14	0,46	0,86	1,42	3,33	7,30
400	0,36	0,72	2,67	5,15	7,32	14,52	38,03
450	0,85	1,93	5,76	12,46	16,62	36,18	93,03
500	1,97	4,37	13,46	39,63	42,83	77,54	203,40
550	5,69	84,67	324,30	1233,52	693,05	587,24	389,38
600	390,62	856,60	3727,95	3323,50	1857,15	787,50	441,56
700	4068,19	6863,40	6098,50	3846,47	2133,02	903,17	469,91
800	7236,10	8516,06	6481,40	3950,12	2194,53	924,80	475,41



Obrázek 3: Závislost výkonu fotodiody na zatěžovacím odporu pro různé proudy laserové diody I_d

Na výsledky měření mělo poměrně zásadní vliv zahřívání laserové diody, která i přes připojení k pasivnímu chladiči se velmi zahřívala. Řešením tohoto problému by mohlo být použití aktivního chladiče.

3 KONVERZE NAPĚTÍ

Protože proud z fotodiody dokáže na zátěži vytvořit úbytek napětí v rozmezí 0,3 až 0,6 V, je potřeba toto napětí zvýšit, abychom byli schopni napájet ostatní součástky, které budou použity pro zpracování a vyhodnocování měřeného signálu.

Pro zvyšování napětí lze použít tyto postupy:

- DC-DC měniče a nábojové pumpy
- Převod pomocí transformátoru

Vzhledem k nižší účinnosti převodu za pomoci transformátoru, která je mimo jiné způsobena nutností použití usměrňovače, se budeme v dalším textu zabývat takřka výhradně zvyšováním za pomoci DC-DC měničů a nábojové pumpy. Výjimku tvoří kombinace obvodu LTC 3108 a transformátoru, která je zmíněna v kapitole 3.5

3.1 Princip zvyšujícího DC-DC měniče (boost)

Obrázek 4 zobrazuje princip zvyšujícího DC-DC měniče. Celá funkce zařízení je založena na jednoduchém principu, kdy v první fázi sepneme spínač S1 (tranzistor), čímž dojde k nabití („naproudění“) cívky, přičemž dioda D je závěrně polarizována. Napětí na cívce je pak dáno vztahem:

$$V_L = V_{IN} = L \cdot \frac{di_L}{dt} \tag{3.1}$$

Ve druhé fázi je spínač S1 rozepnut, což má za následek, že dioda se stane vodivou a energie uskladněná v cívce plus energie dodávaná ze zdroje je přenášena na výstup. Napětí na cívce je pak dáno vztahem:

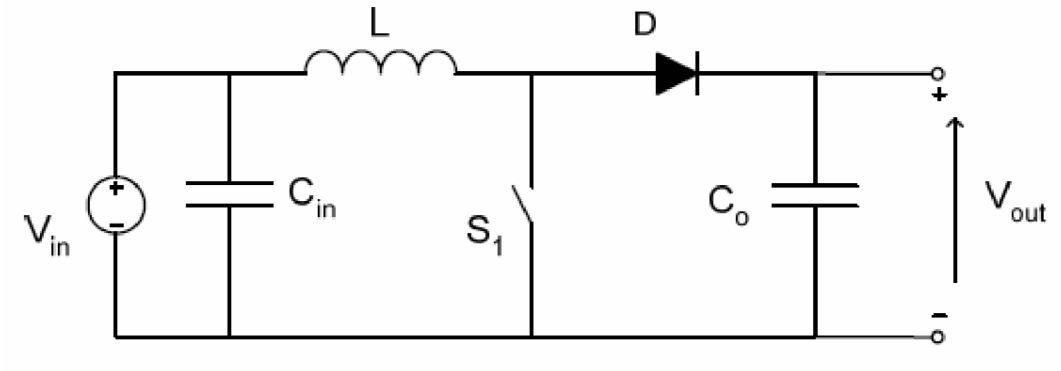
$$V_L = V_{Out} - V_{IN} = L \cdot \frac{di_L}{dt} \tag{3.2}$$

Změnou trvání doby, kdy je spínač sepnut t_{ON} (změnou střídy) je možné řídit výstupní napětí. Zvlnění výstupního napětí je potlačeno výstupním kondenzátorem C_0. Výstupní napětí je dáno:

$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot \frac{1}{1-D} \tag{3.3}$$

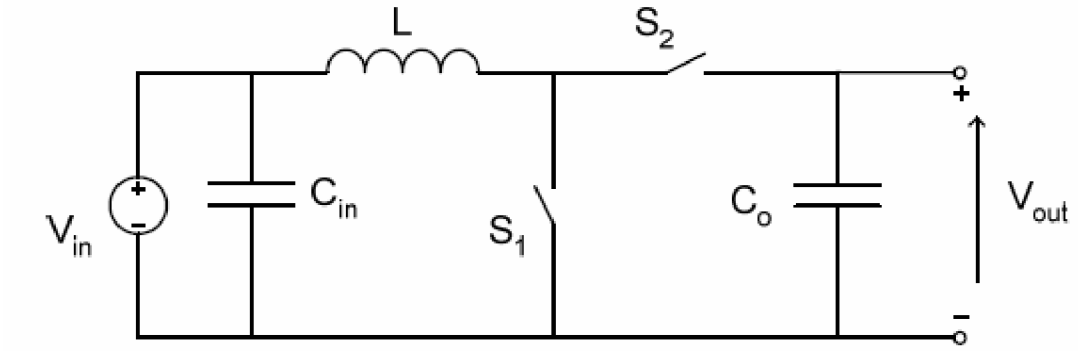
$$D = \frac{t_{ON}}{T}$$

T je perioda řídicího signálu, kterým zpravidla bývá PWM.



Obrázek 4: Princip zvyšujícího DC-DC měniče [19]

Vzhledem ke skutečnosti, že na diodě D vznikají při činnosti ztráty (dle [19] až 50% všech ztrát), je v mnoha DC-DC měničích nahrazena taktéž spínačem, přesně, jak zobrazuje obrázek 5. Takto upravené DC-DC měniče se nazývají synchronní DC-DC měniče.



Obrázek 5: Princip synchronního DC-DC měniče [19]

3.2 Princip nábojové pumpy

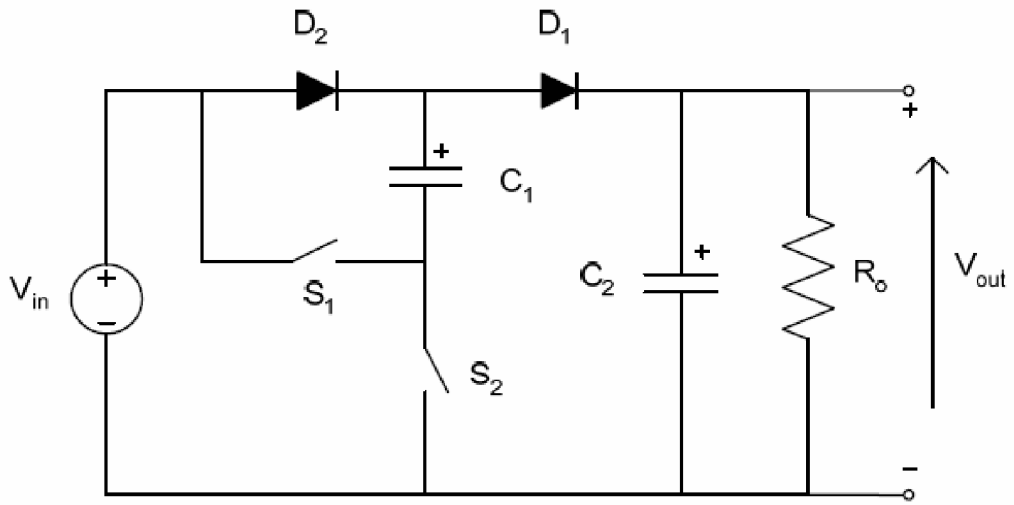
Další skupinu zvyšujících měničů tvoří nábojové pumpy. Jejich výhodou ve srovnání s DC-DC měniči je možnost konstrukce bez magnetických součástek jako jsou cívky nebo transformátory. Proto je možné vyrobit tyto pumpy ve velmi malých rozměrech a navíc není nutno řešit problémy EMI.

Obrázek 6 zobrazuje základní princip nábojové pumpy, kde výstupní napětí je dvakrát vyšší než napětí vstupní. Pokud spínač S1 je rozpojen a spínač S2 sepnut, potom přesně, jak je zobrazeno na obrázku 7 vlevo, je dioda D2 závěrné polarizována, čímž se výstup izoluje od vstupu a kondenzátor C_1 je nabit na hodnotu napětí zdroje.

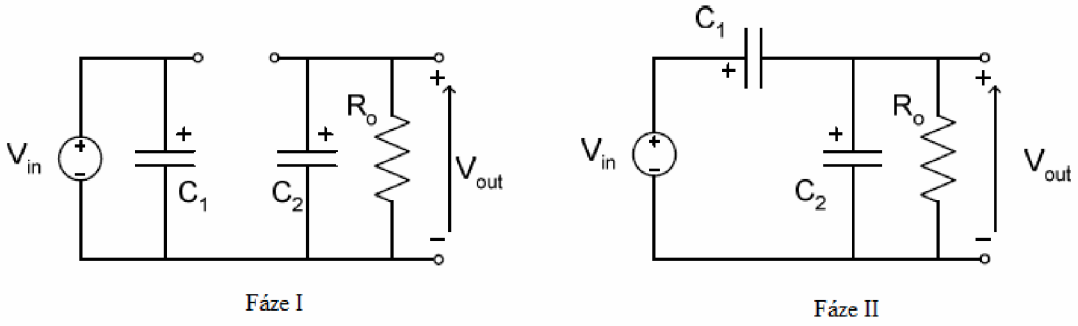
Ve druhé fázi (obrázek 7 vpravo) je spínač S1 sepnut a spínač S2 rozpojen. Zde je dioda D2 závěrně polarizována, zatímco dioda D1 je v propustném režimu. V této fázi

je kondenzátor C_2 nabit ze zdroje a kondenzátoru C_1. Jeho napětí, které je zároveň napětím na výstupu je pak dáno vztahem:

$$U_{C2} = V_{IN} + U_{C1}$$



Obrázek 6: Základní schéma zapojení nábojové pumpy [19]



Obrázek 7: Princip funkce nábojové pumpy (vlevo spínač S1 OFF a S2 ON, vpravo S1 ON, S2 OFF) [19]

3.3 Kombinace nábojové pumpy a DC-DC měniče

Hlavním problémem pro konstrukci zařízení napájeného z takto nízkého napětí je, že startovací napětí běžně dostupných DC-DC měničů se pohybuje kolem hodnot 0,7 V. Tato skutečnost je zapříčiněna tím, že slouží převážně ke zvyšování napětí z klasických 1,5 V monočlánků. Ty při postupném odebírání energie ztrácí své napětí, ale díky DC-DC měniči je umožněno konstantní výstupní napětí. Svoji činnost většinou končí při napětí 0,5 V, čímž zaručí mnohem hospodárnější využití energie.

Na trhu existuje několik DC-DC měničů, které umí pracovat se vstupním napětím o velikosti 0,3 V, ale nedokáží samy z takto nízkého napětí nastartovat svoji činnost. Proto firma Seiko přišla s nábojovou pumpou S-882Z, která je konstruována přesně za tímto účelem.

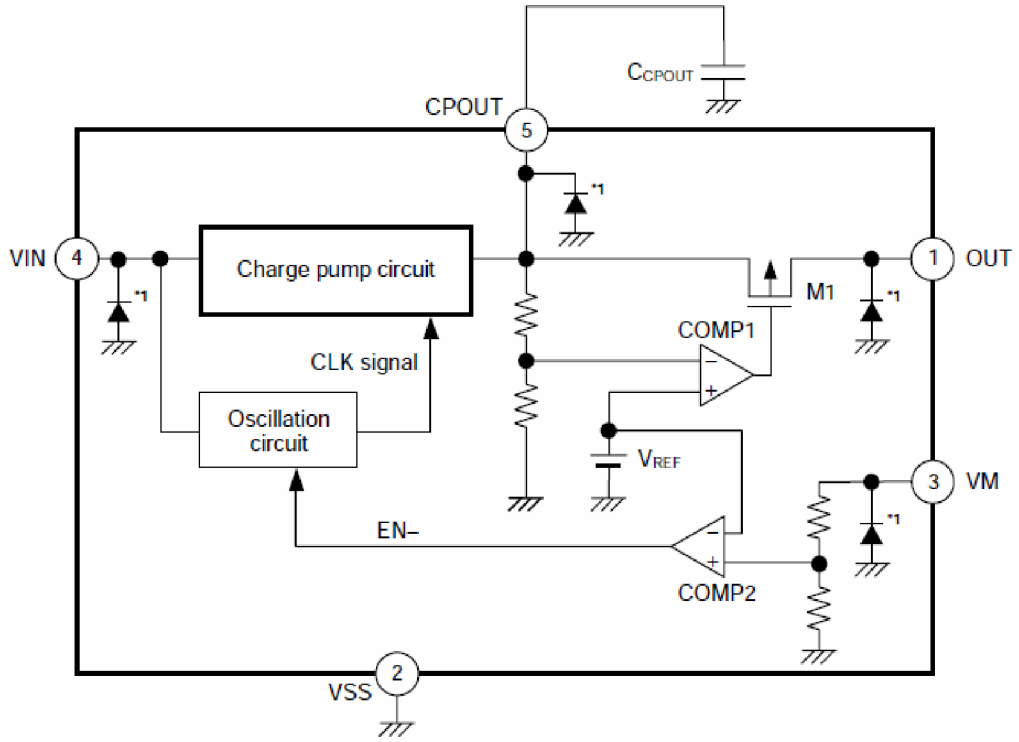
3.3.1 S-882Z

S-882Z je nízkonapěťová nábojová pumpa, která dokáže pracovat se vstupním napětím v rozsahu od 0,3 do 3 V. Na svém výstupu generuje napětí 1,8 až 2,4 V. Používá se převážně jako startovací obvod pro DC-DC měniče, které neumí s hodnotami vstupního napětí 0,3 V pracovat. [1]

Její odlišnost od konkurence je dána použitím technologie plně ochuzené SOI (Silicon on insulator), která způsobuje, že svodový proud mezi source a drain tranzistoru je extrémně nízký, proto dochází k minimalizaci prahového napětí tranzistoru na hodnoty kolem 0,3 V. Ale i přes tuto minimalizaci dosahují ztráty způsobené svodovým proudem a při přepínání tranzistorů 20 %. [20]

Princip funkce je zobrazen na obrázku 1: [1]

1. Pokud přiložíme na vstup obvodu (VIN) napětí o velikosti 0,3 V a vyšší, začne oscilační obvod generovat pulsy.
2. Pomocí těchto pulsů je řízen obvod nábojové pumpy, který vstupní napětí VIN zvýší na požadovanou hodnotu
3. Výstupní napětí z nábojové pumpy nabíjí kondenzátor C_{POUT}.
4. Pokud napětí na C_{POUT} dosáhne požadované hodnoty (V_{CPOUT} je dána výrobcem a obsažena v názvu součástky S-882Z24 (v našem případě 2,4 V), pak se komparátor COMP1 překlopí a dojde z sepnutí M1.
5. Vlivem sepnutí M1 dochází k vybíjení kondenzátoru C_{POUT} přes výstupní pin (OUT).
6. V případě, že (V_{CPOUT}) klesne na požadovanou úroveň, M1 se rozpojí a vybíjení je zastaveno.
7. Pokud napětí na pinu VM dosáhne požadované hodnoty V_{OFF}, dojde k překlopení komparátoru COMP2, oscilátor přestane generovat pulsy a celý systém přejde do úsporného režimu.
8. Jestliže napětí na pinu VM nedosahuje požadované hodnoty, dojde k opětovnému obnovení činnosti.



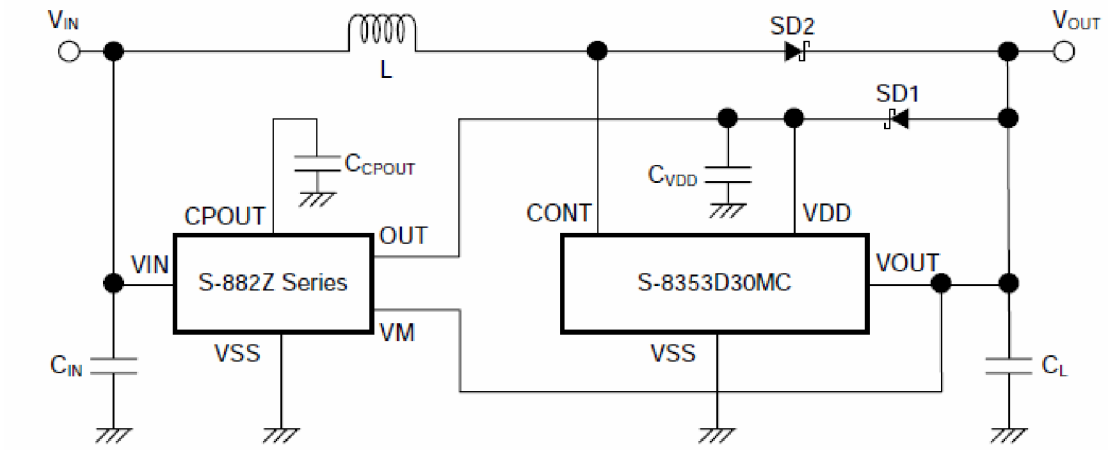
Obrázek 8: Princip fungování S882Z [1]

Spotřeba nábojové pumpy v úsporném režimu je 0,6 μA, v době rozběhu 0,5 mA (hodnoty jsou při vstupním napětí 0,3 V). [1]

3.3.2 Kombinace S-882Z s DC-DC měničem S-8353

Obrázek 9 zobrazuje konverzi napětí při použití nábojové pumpy Seiko S-882Z a DC-DC měniče Seiko S-8353. V první fázi, za pomoci nábojové pumpy, je nabit externí kondenzátor CPOUT. Pokud napětí dosáhne požadované úrovně (2,4 V), je kondenzátor CPOUT připojen na výstup (OUT) a nastartuje přes port VDD DC-DC měnič S-8353.

Pokud již jednou tento DC-DC měnič nastartujeme, dokáže sám pracovat se vstupním napětím v řádech od 0,3 V. Pokud výstupní napětí DC-DC měniče dosáhne požadované hodnoty, je nábojová pumpa S-882Z uvedena do úsporného režimu.



Obrázek 9: Princip funkce kombinace S-882Z a DC-DC měniče S-8383 [1]

Na obrázku 9 je nutné si povšimnout schottkyho diody SD1, která má za úkol udržování konstantního napětí na portu VDD při startu a kolísání napájecího napětí. Použití shottkyho diod SD1 a SD2 má za následek nepatrné snížení účinnosti celého obvodu.

Základní parametry S-8353 [3]

- Výstupní napětí v rozsahu 1,5 až 6,5 V, možnost nastavení po 0,1 V (existují varianty s fixním napětím)
- Při minimální vstupním napětí 0,9 je garantován výstupní proud 1 mA
- Spotřeba při plné funkci 18,7 µA (výstup 3,3 V)
- Spotřeba při úsporném režimu zařízení maximálně 0,5 µA
- Maximální efektivita 85 %
- Frekvence vnitřního oscilátoru je 50 kHz (střída)
- Orientační cena 49,34 Kč (Farnell)

Pro správnou a optimální funkčnost celého zapojení je potřeba dodržet následující 3 rovnice: [1]

$$\left(\frac{V_{CPOUT}\cdot C_{CPOUT}}{C_{CPOUT}+C_{VDD}}-0{,}1\cdot I_{VDD}-V_{DDL}\right)\cdot\left(C_{CPOUT}+C_{VDD}\right)>2\cdot t_s\cdot I_{VDD} \tag{3.4}$$

$$V_{CPOUT1}>V_{DDL}+0{,}2V \tag{3.5}$$

$$C_{POUT}>10C_{VDD} \tag{3.6}$$

V_{CPOUT} : Vybíjecí napětí nábojové pumpy S-882Z (jednotky V)

C_{CPOUT} : Hodnota startovacího kondenzátoru nábojové pumpy (µF)

C_{VDD} : Kapacita vyhlazovacího kondenzátoru na výstupu DC-DC měniče (μF)

I_{VDD} : Proudová spotřeba DC-DC měniče (mA)

V_{DDL} : Minimální napětí při kterém DC-DC měnič funguje (V)

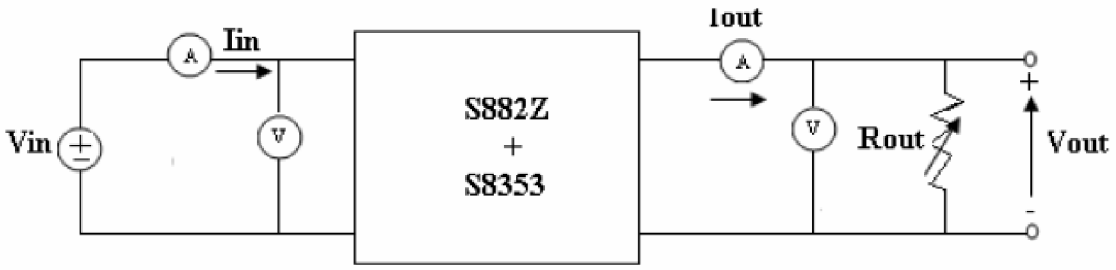
t_s : Soft start time (ms), u S8353 se tato hodnota pohybuje v rozmezí 3-12 ms

Obrázek 11 zobrazuje schéma zapojení kombinace S882Z a S8353 na kterém byly proměřeny parametry tohoto zapojení. Při konstrukci tohoto zařízení byly brány v úvahu doporučení z předchozí kapitoly, obzvláště rovnice 2.3 až 2.5.

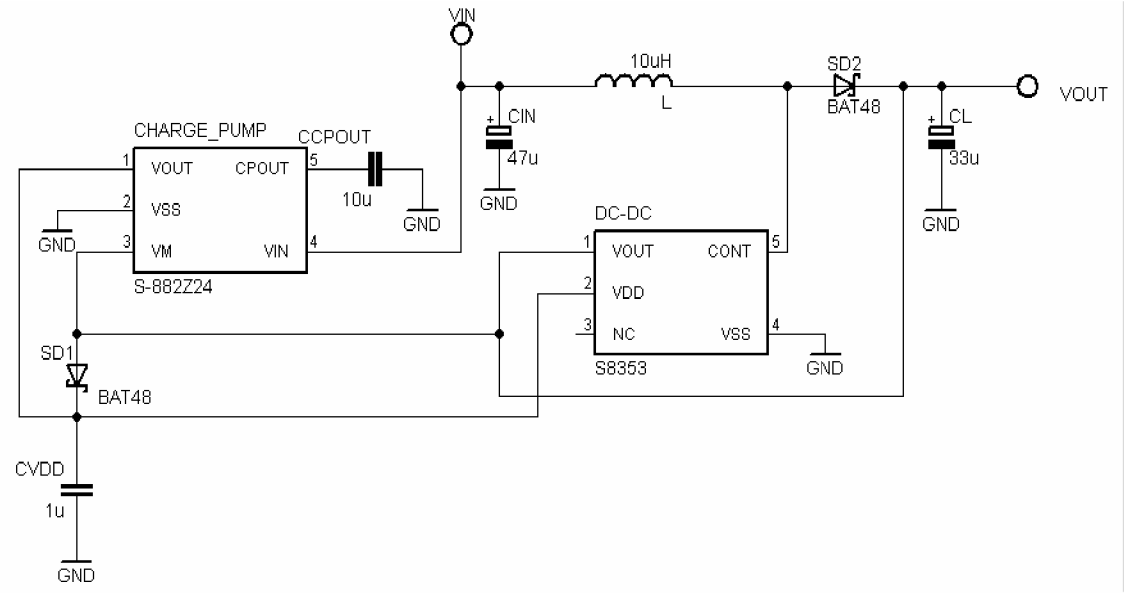
Pro realizaci byl použit DC-DC měnič S-8353D30MC, který má pevně nastavené výstupní napětí na hodnotu 3 V. Nábojová pumpa byla použita S882Z24, její vybíjecí napětí je rovno 2,4 V (nejvyšší možné). Použité kondenzátory byly s nízkým ekvivalentním sériovým odporem. Cívka byla zvolena LQH3 o indukčnosti 10 μH. Zapojení bylo realizováno na DPS.

Měření probíhalo přesně podle obrázku 10. DC-DC měnič byl připojen přímo na zdroj a ampérmetrem a voltmetrem byly měřeny příslušné hodnoty. Na výstupu byla připojena odporová dekáda a byl měřen procházející proud touto dekádou.

Jako zdroj byl použit přístroj ZPA Kosíře AUL310 a proudy a napětí byly měřeny přístroji Agilent 34401A. Zatěžovací odpor na výstupu byl nastavován odporovou dekádou L110. Vliv měřicích přístrojů na měření byl zanedbán.



Obrázek 10: Princip měření kombinace S882Z + S8353



Obrázek 11: Schéma zapojení S882Z a S8353

V následující části jsou zobrazeny tabulky s výsledky měření. Vstupní a výstupní výkon byl určen dle známého vzorce:

$$P = U \cdot I \tag{3.7}$$

Účinnost byla stanovena dle vzorce:

$$P = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \cdot 100\% \tag{3.8}$$

Tabulka 2: Účinnost S882Z+S8353 pro vstupní napětí v rozsahu 0,3 V

U_{IN} [V]	I_{IN}[mA]	U_{OUT}[V]	I_{OUT}[mA]	R_{OUT}[kΩ]	P_{IN} [mW]	P_{OUT}[mW]	η[%]
0,363	13,890	2,997	0,743	4	5,042	2,227	44,17
0,334	11,900	2,997	0,590	5	3,975	1,768	44,49
0,311	10,610	2,996	0,490	6	3,300	1,468	44,49
0,326	7,870	2,996	0,427	7	2,566	1,279	49,87
0,320	6,840	2,996	0,372	8	2,189	1,115	50,93
0,323	5,700	2,996	0,331	9	1,841	0,992	53,87
0,327	5,011	2,996	0,299	10	1,639	0,896	54,67
0,307	5,310	2,996	0,284	15	1,630	0,851	52,20

Tabulka 3: Účinnost S882Z+S8353 pro vstupní napětí 0,4 V

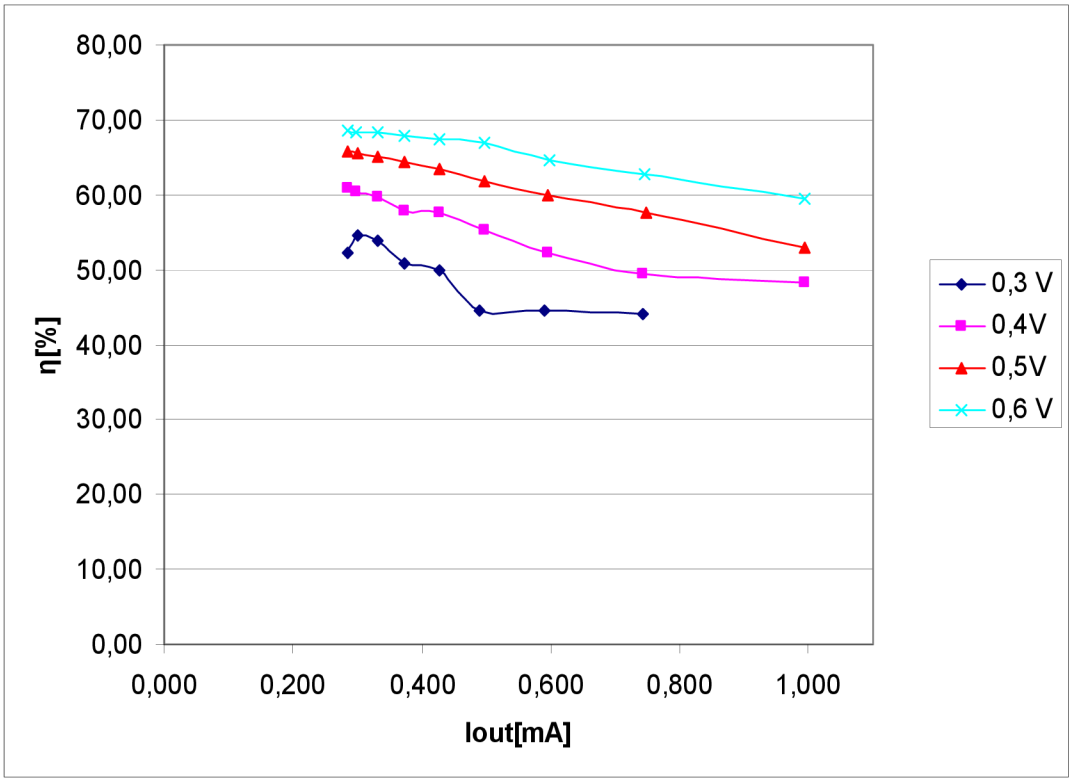
U_{IN} [V]	I_{IN}[mA]	U_{OUT}[V]	I_{OUT}[mA]	R_{OUT}[kΩ]	P_{IN} [mW]	P_{OUT}[mW]	η[%]
0,406	15,180	2,997	0,994	3	6,163	2,979	48,34
0,406	11,090	2,997	0,743	4	4,503	2,227	49,45
0,405	8,430	2,997	0,595	5	3,414	1,783	52,22
0,402	6,690	2,996	0,497	6	2,689	1,489	55,37
0,409	5,426	2,997	0,426	7	2,219	1,277	57,53
0,401	4,810	2,996	0,373	8	1,929	1,118	57,94
0,402	4,150	2,996	0,332	9	1,668	0,995	59,63
0,405	3,646	2,996	0,298	10	1,477	0,893	60,47
0,406	3,443	2,996	0,284	15	1,398	0,851	60,87

Tabulka 4: Účinnost S882Z+S8353 pro vstupní napětí 0,5 V

U_{IN} [V]	I_{IN}[mA]	U_{OUT}[V]	I_{OUT}[mA]	R_{OUT}[kΩ]	P_{IN} [mW]	P_{OUT}[mW]	η[%]
0,504	11,152	2,997	0,994	3	5,621	2,979	53,00
0,509	7,620	2,996	0,747	4	3,879	2,238	57,71
0,505	5,890	2,996	0,596	5	2,974	1,786	60,04
0,501	4,820	2,996	0,498	6	2,415	1,492	61,79
0,505	4,001	2,996	0,427	7	2,021	1,280	63,35
0,508	3,420	2,996	0,373	8	1,737	1,118	64,32
0,506	3,024	2,996	0,332	9	1,530	0,995	65,01
0,509	2,686	2,996	0,299	10	1,367	0,896	65,52
0,509	2,546	2,996	0,284	15	1,296	0,851	65,66

Tabulka 5: Účinnost S882Z+S8353 pro vstupní napětí 0,6 V

U_{IN} [V]	I_{IN}[mA]	U_{OUT}[V]	I_{OUT}[mA]	R_{OUT}[kΩ]	P_{IN} [mW]	P_{OUT}[mW]	η[%]
0,609	8,223	2,996	0,993	3	5,008	2,975	59,42
0,603	5,908	2,996	0,746	4	3,563	2,234	62,70
0,600	4,621	2,998	0,597	5	2,773	1,790	64,56
0,603	3,697	2,996	0,498	6	2,229	1,492	66,93
0,611	3,105	2,996	0,427	7	1,897	1,279	67,43
0,606	2,714	2,996	0,373	8	1,645	1,118	67,95
0,608	2,387	2,996	0,331	9	1,451	0,992	68,33
0,607	2,144	2,996	0,297	10	1,301	0,890	68,37
0,605	2,048	2,996	0,284	15	1,239	0,851	68,67



Obrázek 12: Závislost účinnosti obvodu na výstupním proudu pro různé hodnoty vstupního napětí

Z naměřených dat můžeme vyčíst, že s rostoucím vstupním napětím dochází ke zvyšování účinnosti. Naměřené účinnosti jsou v rozsahu 45 - 68 %. Přičemž pro rozsah výstupního napětí 0,4 V a výstupním proudu 0,5 mA můžeme počítat s účinností 55 %.

3.3.3 Kombinace S882Z a DC-DC měniče TPS61201

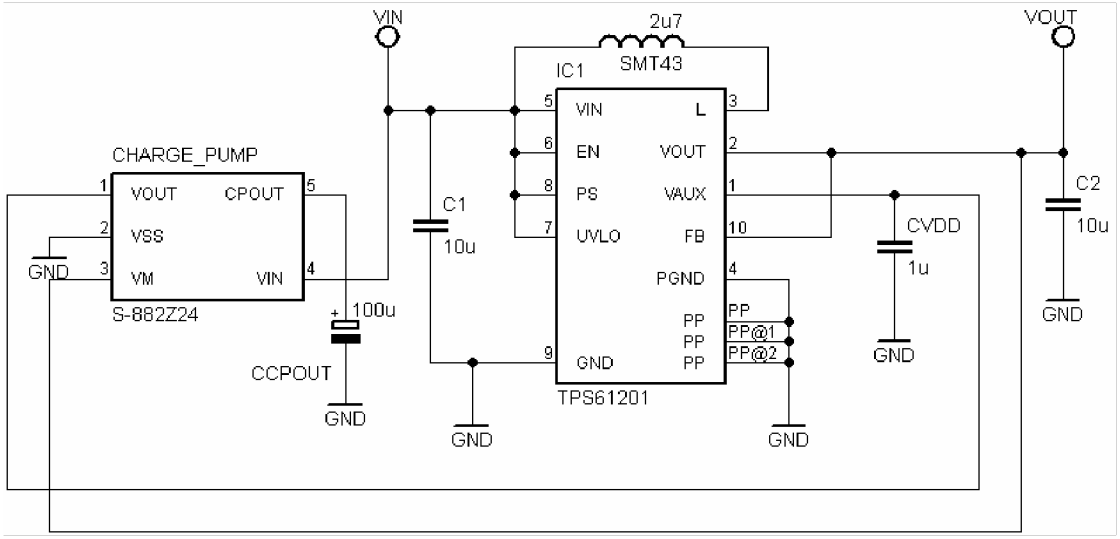
TPS 61201 je DC-DC měnič od společnosti Texas Instruments. Startovací napětí tohoto obvodu je 0,5 V. Pokud již je tento obvod nastartován, pak dokáže zvyšovat napětí od hodnot 0,3 V.

Základní parametry: [22]

- Výstupní napětí v závislosti na typu
  - TPS61200 nastavitelné v rozsahu 1,8 -5,5 V
  - TPS61201 fixní 3,3 V
  - TPS61202 fixní 5V
- Maximální účinnost více než 90 %
- Spotřeba 55 µA
- Frekvence vnitřního oscilátoru 1650 kHz
- Orientační cena 104 Kč (Farnell)

Obdobně, jako S8353 i TPS61201 má vyveden vlastní pin pro napájení (VAUX). Na tento pin je při standardní funkci připojen kondenzátor, který je po dosažení požadovaného vstupního napětí nabíjen. Pokud hodnota napětí na kondenzátoru překročí hodnotu 2,4 V, je obvod nastartován. Přestože katalogová hodnota výstupního napětí nábojové pumpy S882Z je 2,4 V, může být použita pro nastartování tohoto obvodu, protože reálná hodnota vybíjecího napětí byla naměřena 2,45 V.

Zapojení je obdobné jako v případě kombinace S882Z a S8353, pouze nebyly použity přídavné diody a byla zvětšena hodnota kondenzátoru CPOUT. Zapojení bylo opět realizováno na DPS.



Obrázek 13: Schéma zapojení S882Z a TPS61201

Princip měření je shodný s kombinací S882Z-S8353, který je popsán v kapitole 3.3.2. Pro měření byl použit zdroj Agilent E3631. Výstupní napětí bylo měřeno přístrojem Voltcraft VC940, ostatní proudy a napětí byly měřeny přístroji Agilent 34401A.

Tabulka 6:Účinnost S882Z + TPS61201 při vstupním napětí 0,3 V

U_{IN} [V]	I_{IN}[mA]	U_{OUT}[V]	I_{OUT}[mA]	R_{OUT}[kΩ]	P_{IN} [mW]	P_{OUT}[mW]	η[%]
0,302	25,650	3,312	0,828	4	7,746	2,742	35,40
0,308	20,510	3,313	0,661	5	6,317	2,190	34,67
0,307	17,920	3,314	0,551	6	5,501	1,826	33,19
0,302	16,340	3,314	0,473	7	4,935	1,567	31,76
0,303	14,700	3,314	0,414	8	4,454	1,372	30,80
0,301	13,658	3,314	0,368	9	4,111	1,220	29,67
0,300	12,700	3,314	0,331	10	3,810	1,097	28,79
0,301	9,450	3,315	0,221	15	2,844	0,733	25,76

Tabulka 7: Účinnost S882Z + TPS61201 při vstupním napětí 0,4 V

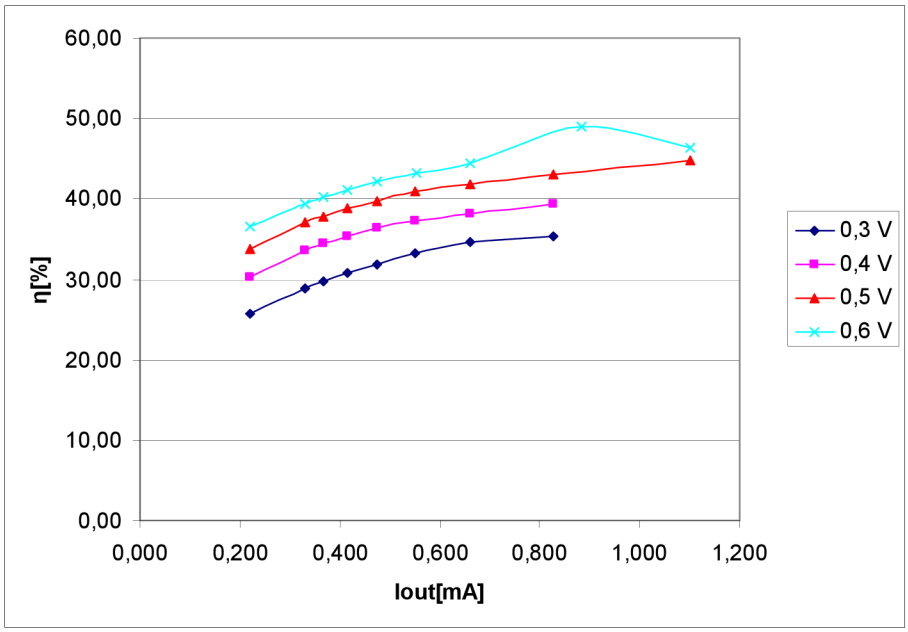
U_{IN} [V]	I_{IN}[mA]	U_{OUT}[V]	I_{OUT}[mA]	R_{OUT}[kΩ]	P_{IN} [mW]	P_{OUT}[mW]	η[%]
0,401	17,330	3,313	0,826	4	6,949	2,737	39,38
0,400	14,340	3,314	0,661	5	5,737	2,191	38,18
0,400	12,270	3,315	0,551	6	4,908	1,827	37,22
0,400	10,780	3,316	0,473	7	4,312	1,568	36,37
0,401	9,690	3,314	0,414	8	3,886	1,372	35,31
0,400	8,840	3,316	0,368	9	3,536	1,220	34,51
0,400	8,170	3,316	0,331	10	3,269	1,098	33,58
0,400	6,043	3,317	0,221	15	2,417	0,733	30,32

Tabulka 8: Účinnost S882Z + TPS61201 při vstupním napětí 0,5 V

U_{IN} [V]	I_{IN}[mA]	U_{OUT}[V]	I_{OUT}[mA]	R_{OUT}[kΩ]	P_{IN} [mW]	P_{OUT}[mW]	η[%]
0,500	16,320	3,313	1,102	3	8,160	3,651	44,75
0,500	12,720	3,313	0,826	4	6,360	2,737	43,03
0,500	10,460	3,314	0,661	5	5,230	2,191	41,89
0,500	8,930	3,315	0,551	6	4,465	1,827	40,91
0,500	7,890	3,316	0,473	7	3,945	1,568	39,75
0,500	7,073	3,317	0,414	8	3,537	1,373	38,83
0,500	6,450	3,317	0,368	9	3,225	1,221	37,85
0,500	5,920	3,316	0,331	10	2,960	1,098	37,08
0,500	4,355	3,318	0,221	15	2,178	0,733	33,68

Tabulka 9: Účinnost S882Z + TPS61201 při vstupním napětí 0,6 V

U_{IN} [V]	I_{IN}[mA]	U_{OUT}[V]	I_{OUT}[mA]	R_{OUT}[kΩ]	P_{IN} [mW]	P_{OUT}[mW]	η[%]
0,600	13,150	3,316	1,102	3	7,890	3,654	46,31
0,600	9,950	3,317	0,883	4	5,970	2,928	49,05
0,600	8,240	3,318	0,662	5	4,944	2,196	44,43
0,600	7,060	3,318	0,552	6	4,236	1,831	43,23
0,600	6,206	3,319	0,473	7	3,724	1,570	42,16
0,600	5,556	3,317	0,414	8	3,334	1,373	41,19
0,600	5,052	3,317	0,368	9	3,031	1,221	40,27
0,600	4,643	3,316	0,331	10	2,786	1,098	39,40
0,600	3,350	3,318	0,221	15	2,010	0,733	36,48



Obrázek 14: Závislost efektivity na výstupním proudu pro hodnoty vstupního napětí 0,3 - 0,6 V

Z grafu můžeme vyčíst, že efektivita roste jak v závislosti na zvyšujícím se vstupním napětí, tak v závislosti na zvyšujícím se výstupním proudu. V měřeném rozsahu vstupních proudů se efektivita pohybuje v rozmezí 25 až 50 %. Pro výstupní proud 0,5 mA a vstupní napětí 0,4 V lze očekávat účinnost kolem 35 %.

Zajímavostí, která byla na tomto obvodu změřena při měření účinnosti je, že přestože udávané startovací napětí je 0,5 V, dokáže sám bez použití nábojové pumpy S882Z nastartovat na plné napětí, při zátěži 10 kΩ od napětí 0,345 V. K čemuž ovšem potřebuje vstupní proud 60 mA. Proto je nutné pro naši aplikaci použít S882Z.

3.3.4 Kombinace S882Z a DC-DC měniče MCP 1623/24

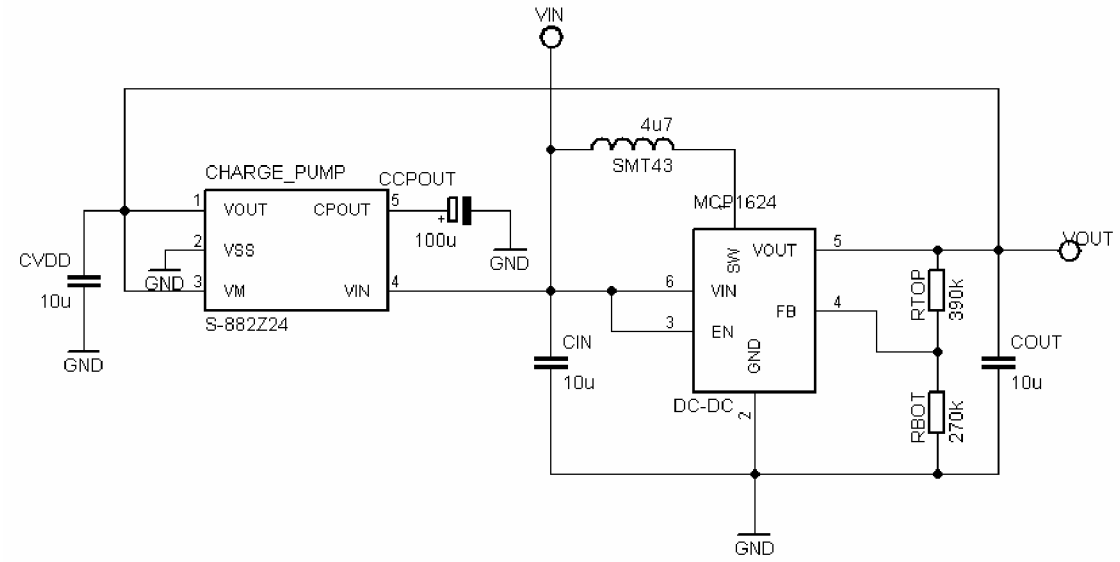
MCP1624 je synchronní DC-DC měnič od firmy Microchip, který se používá jako zvyšující regulátor pro mikrokontrolery PIC napájené z jedné alkalické baterie. Startovací napětí tohoto obvodu je 0,65 V. Jeho výhodnou vlastností v porovnání s konkurencí je garantovaná funkčnost zařízení při poklesu napájecího napětí na hodnotu 0,35 V. [21]

Základní parametry: [21]

- Nastavitelné výstupní napětí v rozsahu 2 – 5,5 V
- Spotřeba zařízení 19 μA
- Maximální účinnost převodu 96 %

- Frekvence vnitřního oscilátoru 500 kHz
- Orientační cena 20,76 Kč (Farnell)

Jedná se o DC-DC měnič, který nemá speciálně vyveden pin pro napájení a své obvody napájí přímo ze svého výstupu, který generuje. Proto je výstup z nábojové pumpy je připojen přímo na výstup z DC-DC měniče, přesně jak je vyobrazeno na obrázku 15.



Obrázek 15: Schéma zapojení S882Z a MCP1624

Princip měření je shodný s kombinací S882Z-S8353, který je popsán v kapitole 3.3.2. Pro měření byl použit zdroj Agilent E3631. Výstupní napětí bylo měřeno přístrojem Voltcraft VC940, ostatní proudy a napětí byly měřeny přístroji Agilent 34401A.

Tabulka 10: Účinnost MCP1624+S8827 pro vstupní napětí 0,3 V

U_{IN} [V]	I_{IN}[mA]	U_{OUT}[V]	I_{OUT}[mA]	R_{OUT}[kΩ]	P_{IN} [mW]	P_{OUT}[mW]	η[%]
0,300	38,100	2,626	2,616	1	11,430	6,869	60,10
0,300	27,100	2,736	1,365	2	8,130	3,735	45,94
0,300	23,100	2,774	0,922	3	6,930	2,558	36,91
0,301	21,130	2,803	0,699	4	6,360	1,959	30,80
0,300	19,870	2,811	0,561	5	5,961	1,577	26,45
0,301	19,027	2,817	0,469	6	5,727	1,321	23,07
0,302	18,560	2,851	0,406	7	5,605	1,157	20,65
0,300	17,960	2,825	0,352	8	5,388	0,994	18,45
0,301	17,693	2,844	0,368	9	5,326	1,047	19,65
0,300	17,464	2,860	0,286	10	5,239	0,818	15,61
0,301	16,490	2,839	0,189	15	4,963	0,537	10,81

Tabulka 11: Účinnost MCP1624+S8827 pro vstupní napětí 0,4 V

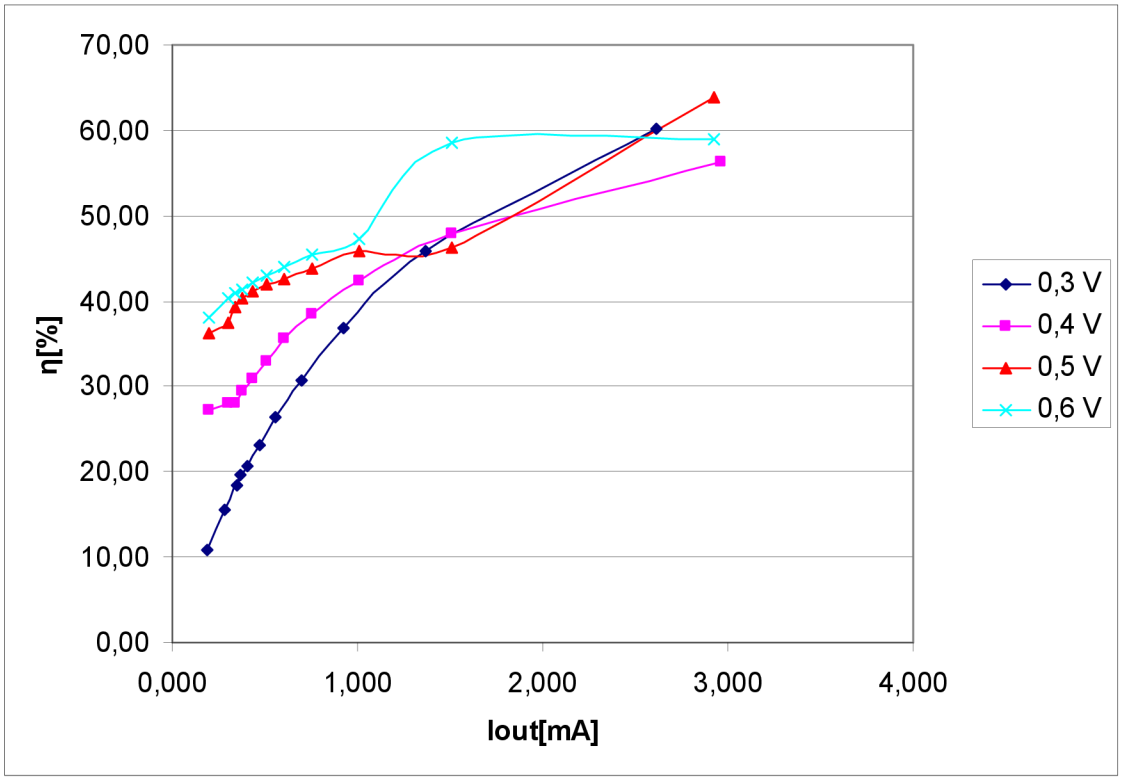
U_{IN} [V]	I_{IN}[mA]	U_{OUT}[V]	I_{OUT}[mA]	R_{OUT}[kΩ]	P_{IN} [mW]	P_{OUT}[mW]	η[%]
0,400	39,250	2,976	2,965	1	15,700	8,824	56,20
0,400	23,900	3,031	1,512	2	9,560	4,583	47,94
0,400	18,074	3,033	1,009	3	7,230	3,060	42,33
0,400	14,940	3,036	0,757	4	5,976	2,298	38,45
0,400	12,930	3,036	0,606	5	5,172	1,840	35,57
0,400	11,620	3,036	0,505	6	4,648	1,533	32,98
0,401	10,600	3,036	0,433	7	4,251	1,314	30,92
0,400	9,760	3,037	0,379	8	3,904	1,151	29,48
0,400	9,140	3,036	0,337	9	3,656	1,023	27,98
0,400	8,230	3,036	0,303	10	3,292	0,920	27,94
0,400	5,620	3,038	0,202	15	2,248	0,614	27,30

Tabulka 12: Účinnost MCP1624+S8827 pro vstupní napětí 0,5 V

U_{IN} [V]	I_{IN}[mA]	U_{OUT}[V]	I_{OUT}[mA]	R_{OUT}[kΩ]	P_{IN} [mW]	P_{OUT}[mW]	η[%]
0,500	26,907	2,937	2,926	1	13,454	8,594	63,88
0,500	19,800	3,031	1,512	2	9,900	4,583	46,30
0,500	13,330	3,033	1,009	3	6,665	3,060	45,91
0,500	10,480	3,036	0,757	4	5,240	2,298	43,85
0,500	8,630	3,036	0,606	5	4,315	1,840	42,64
0,500	7,300	3,036	0,505	6	3,650	1,533	42,00
0,501	6,370	3,036	0,433	7	3,191	1,314	41,19
0,500	5,720	3,037	0,379	8	2,860	1,151	40,25
0,500	5,210	3,036	0,337	9	2,605	1,023	39,27
0,500	4,920	3,036	0,303	10	2,460	0,920	37,39
0,500	3,390	3,038	0,202	15	1,695	0,614	36,20

Tabulka 13: Účinnost MCP1624 + S8827 pro vstupní napětí 0,6 V

U_{IN} [V]	I_{IN}[mA]	U_{OUT}[V]	I_{OUT}[mA]	R_{OUT}[kΩ]	P_{IN} [mW]	P_{OUT}[mW]	η[%]
0,600	24,330	2,937	2,926	1	14,598	8,594	58,87
0,600	13,030	3,030	1,511	2	7,818	4,578	58,56
0,600	10,800	3,033	1,009	3	6,480	3,060	47,23
0,600	8,440	3,036	0,757	4	5,064	2,298	45,38
0,600	6,970	3,036	0,606	5	4,182	1,840	44,00
0,600	5,950	3,036	0,505	6	3,570	1,533	42,94
0,600	5,188	3,036	0,433	7	3,113	1,314	42,22
0,600	4,630	3,037	0,379	8	2,778	1,151	41,43
0,600	4,170	3,036	0,337	9	2,502	1,023	40,89
0,600	3,810	3,036	0,303	10	2,286	0,920	40,23
0,600	2,685	3,038	0,202	15	1,611	0,614	38,09



Obrázek 16: Závislost účinnosti MCP1624 + S8827 na výstupním proudu pro různé hodnoty vstupního napětí

Přestože katalogová hodnota minimálního vstupního napětí je 0,35 V, je tento DC-DC měnič schopen pracovat i s napětím 0,3 V (viz. tabulka 10). Na svém výstupu sice nedokáže generovat plné napětí 3V, ale pro naše potřeby by i napětí 2,8 V bylo postačující. Při zátěži 10 kΩ lze nastartovat z napětí 0,3 V. MCP1624 má velmi silnou závislost účinnosti na výstupním proudu. Účinnost se pohybuje v rozmezí 10 – 60 %.

3.4 Ostatní měřené DC-DC měniče

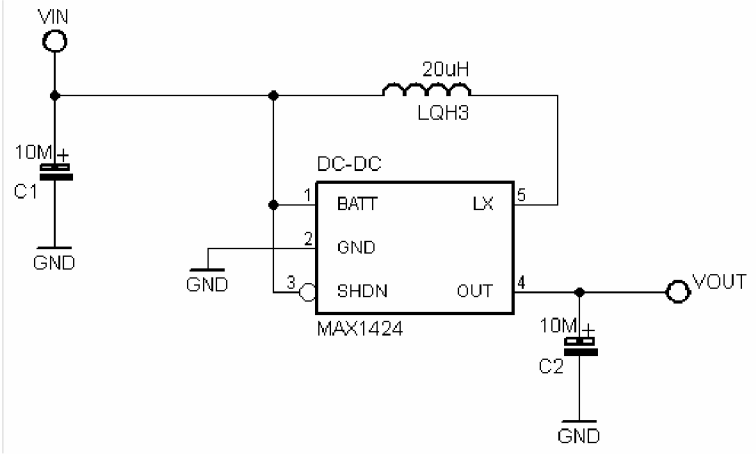
Nalezeni byli pouze 3 zástupci DC-DC měničů, které dokáží pracovat se vstupním napětím o velikosti 0,3 V. Následující uvedené mají udávaný rozsah vstupních napětí zpravidla od 0,5 V a vyšší, tudíž se nedají nastartovat ze vstupního napětí o velikosti 0,3 V, proto bylo pouze změřeno napětí, kdy ukončí svou činnost.

3.4.1.1 MAX 1724

Základní parametry: [24]

- Startovací napětí 0,83 V
- Rozsah vstupního napětí 0,8 -5,5 V
- Spotřeba 1,5 µA
- Maximální účinnost 90 %
- Orientační cena 105 Kč (Farnell)

Princip měření spočíval ve stanovení napětí, pří kterém dojde k zastavení činnosti. Proto bylo na vstup přivedeno potřebné startovací napětí, obvod byl nastartován a na výstupu připojen zátěžný odpor o velikosti 10 kΩ. Následně bylo vstupní napětí snižováno a zjišťováno při jakém napětí dojde k ukončení činnosti. Jako Zdroj byl použit přístroj Agilent E3631. Napětí a proudy byly měřeny přístroji Agilent 34401 A. Zapojení bylo realizováno na DPS. Činnost obvodu byla ukončena při napětí 0,457 V.



Obrázek 17: Schéma zapojení MAX 1424

Tabulka 14: Průběh ukončení činnosti MAX 1424

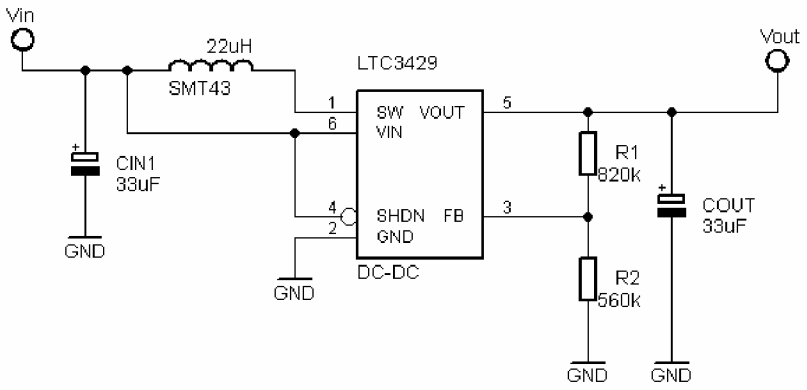
V_{IN}	I_{IN}	VOUT	IOUT
0,850	2,077	3,293	0,326
0,805	2,208	3,291	0,324
0,705	2,540	3,291	0,324
0,605	2,996	3,280	0,324
0,556	3,299	3,293	0,324
0,506	3,673	3,289	0,324
0,466	4,027	3,288	0,324
0,457	0,007	0,074	0,007

Při dané konfiguraci je obvod možné nastartovat za pomoci nábojové pumpy S882Z z napětí 0,517 V. Jedná se o stejný princip jako při kombinaci MCP1624 + S882Z, protože obvod nemá vyveden speciální napájecí pin.

3.4.1.2 LTC3429

Základní parametry LTC 3429: [25]

- Startovací napětí 0,85 V
- Rozsah vstupního napětí 0,5 – 4,4 V
- Rozsah výstupního napětí 2,5 – 4,3 V
- Spotřeba v aktivním režimu 20 μA
- Frekvence vnitřního oscilátoru 500kHz (střída 80 – 90 %)



Obrázek 18: Schéma zapojení LTC3429

Obvod byl testován shodným způsobem jako předchozí varianta s DC-DC měniče MAX 1424. Napětí při němž došlo k ukončení činnosti bylo stanoveno na hodnotu 0,45 V. Což je pro naši aplikaci nepoužitelné.

3.5 LTC3108

Poměrně zajímavým obvodem, který se v poslední době objevil na trhu je bezesporu obvod LTC3108. Jedná se o obvod, který je schopen pracovat se vstupním napětím o velikosti 20 mV. To mu umožňuje transformátor připojený na vstupu. Umožňuje tak napájení ze zdrojů, jakými můžou být termočlánky, TEGs (termoelektrické generátory) či malé solární články. Výstupní napětí může být nastavováno na hodnoty 2,35 V, 3,3V, 4,1 V nebo 5 V.

Jedná se o obvod, který je primárně určen pro aplikace u kterých je průměrná spotřeba velmi nízká. Tedy k větším odběrům energie dochází v poměrně dlouhých časových intervalech. Z tohoto důvodu není pro naši aplikaci příliš vhodný. Navíc efektivita se v našem pracovním rozsahu pohybuje kolem 20 %. Více informací o tomto obvodu je možné nalézt v [26].

3.6 Výběr nejvhodnější napájecí varianty

Bylo testováno celkem pět nejrůznějších obvodů pro napájení našeho měřicího modulu, z nichž pouze tři jsou pro naši aplikaci použitelné, jsou to kombinace nábojové pumpy seiko S882Z a DC-DC měničů S8353, TPS6101 a MCP1624.

Kombinace S882Z+S8353 dosahuje účinnosti převodu v rozmezí 45 -70%, přičemž pro rozsahy vstupního napětí 0,3 a 0,4 V je naměřená účinnost v rozmezí hodnot 45 - 60 %. Kombinace S882Z+TPS6101 dosahuje účinnosti 25% - 50 %, přičemž pro

vstupní v rozsahu 0,3 a 0,4 dosahuje účinnosti 25 – 40%. Kombinace MCP1624 dosahuje účinnosti v rozmezí 10 – 60 %, přičemž pro vstupní napětí o velikosti 0,3 V nedokáže na svém výstupu udržet požadované napětí 3 V. Z hlediska účinnosti bude nejvhodnějším kandidátem na výslednou realizaci kombinace S882Z+S8353.

4 VÝBĚR MCU S A/D PŘEVODNÍKEM

Digitalizace a zpracování naměřených dat bude probíhat v MCU s interním popřípadě externě připojeným A/D převodníkem. Z hlediska energetické bilance bude preferována varianta s interním A/D převodníkem.

Na trhu se objevuje obrovská škála nejrůznějších nízkopříkonových mikrokontrolerů. Při výběru nejvhodnějšího MCU pro naši aplikaci (s ohledem na minimalizaci spotřeby) je nutné brát v úvahu několik základních požadavků.

Obecně mezi nejvýznamnější patří: [4]

- Nízký proudový odběr v úsporných režimech (módech)
- Nízká spotřeba v aktivním režimu
- Nízká spotřeba periferií (v našem případě hlavně A/D převodníku)
- Rychlé probuzení z režimu spánku

4.1 Způsoby minimalizace spotřeby MCU

V následujících podkapitolách budou představeny jednotlivé principy, kterými lze minimalizovat spotřebu mikrokontroleru.

4.1.1 Úsporné režimy MCU

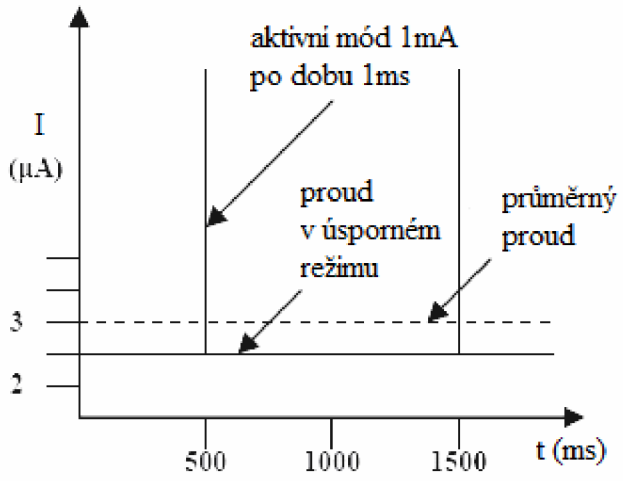
Základní myšlenou pro použití úsporných režimů je fakt, že práce mikroprocesoru neprobíhá kontinuálně. Aby tedy došlo k minimalizaci spotřeby, dochází k periodickému přepínání mezi aktivním módem, kdy jsou zapnuty veškeré periferie a některým úsporným módem.

Mezi nejběžnější úsporné módy patří: [5]

- Power down – v tomto módu dochází k celkovému uspání, tedy i zdroje hodinového signálu
- Power save – liší se od předchozího pouze tím, že je zapnutý zdroj hodinového signálu což má pochopitelně vliv na spotřebu MCU
- Idle – zde dochází k vypnutí pouze některých částí, zatímco důležité části zapnuty zůstanou

Pro výběr nejvhodnějšího kandidáta je tedy nutné brát v úvahu průměrný proud, který bude MCU v dané aplikaci spotřebovávat. Je tedy nutné zvážit, jak dlouho se bude MCU nacházet v aktivním módu a jakou spotřebu bude v tomto módů mít a samozřejmě jaký to bude mít vliv na průměrnou spotřebu.

Obrázek 19 nám udává vliv aktivního módu na celkovou průměrnou spotřebu mikrokontroleru MSP340. Dle [4] se udává, že každá aktivita procesoru trvající 1 ms, za předpokladu spotřeby procesoru 1 mA, zvyšuje průměrnou spotřebu o 1 μA.



Obrázek 19: Průměrná spotřeba proudu [4]

4.1.2 Oscilátor

Oscilátor je pro chod MCU zcela nepostradatelný a jeho spotřeba se nemalou mírou podílí na průměrné spotřebě MCU. Dle obecného předpokladu s rostoucí frekvencí hodinového signálu zcela podle očekávání roste i odebíraný proud, zde je potřeba zvolit vhodný kompromis mezi výpočetní rychlostí a spotřebou.

Vzhledem ke skutečnosti, že MCU při své činnosti bude často přecházet z některého úsporného módu do módu aktivního, je důležité, aby tento přechod byl co nejrychlejší. Dále je důležité, aby spotřeba v šetřícím módu byla co nejmenší. Z těchto předpokladů vychází dva režimy oscilátorů, jeden vysokofrekvenční s vyšší spotřebou a druhý nízkofrekvenční pro úsporné módy (tato varianta je ovšem vykoupena výrazně nižší přesností). [5]

4.1.3 Periferie na čipu

Spotřeba periferií je pro celkovou spotřebu mikroprocesoru nesmírně důležitá. Samozřejmostí se stává možnost vypnutí periferií, pokud nejsou potřeba. Spousta nízkopříkonových MCU obsahuje automatické vypínání periferií při jejich nečinnosti.

Další užitečnou funkci, kterou je vybavena většina nízkopříkonových MCU je možnost práce s periferiemi, jako například s A/D převodníkem při vypnutém CPU.

A/D převodník provádí konverzi během které je CPU vypnut, uloží výsledek konverze na zásobník nebo do paměti RAM (DMA) a poté může být CPU zapnuto a provádět další případné operace. [5]

4.1.4 Brown-out detektor (BOD)

Jedná se o součástku, která chrání MCU při poklesu napájecího napětí pod definovanou úroveň. Pokud k poklesu napětí dojde, následuje resetování MCU. Tímto se zajistí, že program nebude bloudit a na registrech nebudou nedefinované hodnoty.

Velké množství nízkopříkovových MCU má tento detektor zapnutý i v režimu spánku, čímž dochází k navýšení spotřeby. Někteří výrobci detektor v režimu spánku vypínají, přičemž k jeho opětovnému spuštění dochází před probuzením. [5]

4.2 Výběr konkrétního typu MCU

V následujících kapitolách budou stručně představeny jednotlivé, pro naši aplikaci použitelné typy MCU. Při výběru byl kladen důraz na co nejnižší spotřebu a kvalitu integrovaného A/D převodníku.

4.2.1 PIC

Jedná se o produkty firmy Microchip, které jsou vybaveny technologií nanoWatt XLP (eXtreme Low Power). Tyto mikrokontrolery se vyznačují extrémně nízkým proudovým odběrem v režimu (hlubokého) spánku a to až 20nA. Režim hlubokého spánku je novinkou firmy Microchip, není ovšem použit u všech řad. Mezi nejvýznamnější zástupce XPL technologie patří 8 bitové PIC16, PIC18 a 16 bitové PIC 24.

Technologie nanoWatt XPL používá zpravidla těchto pět úsporných módů:

- Deep Sleep (dostupný pouze pro PIC18 a PIC24)
- Sleep
- Idle
- Doze (pouze PIC 24)
- Run

Jak již název napovídá, režim deep sleep (hluboký spánek) je režim mikrokontroleru, ve kterém dochází k odpojení prakticky všech částí mikrokontroleru, tedy i jádra, napěťového regulátoru, většiny periferií a dochází i k odpojení napájení od RAM (napájeno je pouze 2 – 4 B, do kterých se uloží stav před přechodem do deep sleep režimu).

Takto nízká spotřeba v deep sleep modu je ovšem vykoupena řadou nevýhod spojených s jeho používáním. První nevýhodou je, že MCU může být probuzen pouze několika zdroji - RTCC, DSWDT (watchdog hlubokého spánku), DSBOR (deep sleeep BOR), na rozdíl od sleep módu. Ale hlavní nevýhodou je, že při probuzení zpravidla dochází k resetu celého MCU. Je to způsobeno tím, že při režimu deep sleep je odpojeno jádro mikrokontroleru. Proto se režim deep sleep doporučuje pro aplikace, ve kterých bude docházet k probouzení v intervalu delším než 1 s. Hodnota 20nA je měřena při vypnuté RAM a BOD, tudíž tato hodnota je poněkud zavádějící a je velmi obtížné ji porovnávat s konkurencí. [7]

V režimu sleep je vypnut zdroj hlavního hodinového signálu a z režimu spánku může být MCU probuzen libovolným přerušením, jakoukoli formou resetu a při přetečení WDT. Doba probuzení ze sleep módu je 1-5 ms.

Idle a doze jsou dynamické módy, které povolují větší funkčnost periferií, než sleep módy, ale přitom stále nemají spotřebu jako aktivní mód. Idle mód se zpravidla používá při čekání na nějakou událost (externí přerušení nebo čekání na přerušení od periferií). Doze mód se používá pro práci s periferiemi jako například A/D převodník, které vyžadují malé zatížení CPU. Literatura [7] udává, že spotřeba v Idle módu je 25 % ze spotřeby v aktivním módu a spotřeba v doze módu je 35 – 75 % ze spotřeby v aktivním módu.

Tabulka 13 zobrazuje základní vlastnosti a spotřebu jednotlivých rodin MCU PIC. Tabulka 16 zachycuje závislost spotřeby PIC24F16KA102 na aktivitě a frekvenci oscilátoru při periodickém vykonávání 12 kB souboru. MCU střídavě přechází ze sleep módu do aktivního módu.

Tabulka 15: Základní vlastnosti PIC [6]

Typ MCU	flash [kB]	Počet pinů	Deep sleep	Sleep + BOR	Sleep+ WDT	Sleep+ RTC	Aktivní mód
	kB	-	[nA]	[nA]	[nA]	[µA]	[µA/MHz
PIC16F1827	3,5-14	8-20	20	-	500	600	75
PIC18F14K22	8-16	20	34	-	460	650	131
PIC18F46J50	16-64	28/44	15	57	795	845	280
PIC24F16KA	8-16	20/28	20	25	370	510	182

Tabulka 16: Spotřeba v závislosti na aktivitě a frekvenci oscilátoru [8]

Parametr/ frekvence	32 kHz	1MHz	2MHz	32MHz
Proud v aktivním módu [µA]	55	540	1100	18000
Proud v sleep módu [nA]	540	540	540	540
Doba strávená v aktivním módu [ms]	375	12	6	0,375

Dobra strávená v sleep módu [%]	62,5	98,8	99,4	99,96
Průměrný příkon [μW]	22	10,9	13,9	98

Vlastnosti A/D převodníku:

- SAR
- 10 bit
- Rychlost konverze až 500 ksps
- 9 kanálů
- Spotřeba 500 μA

4.2.2 MSP 430

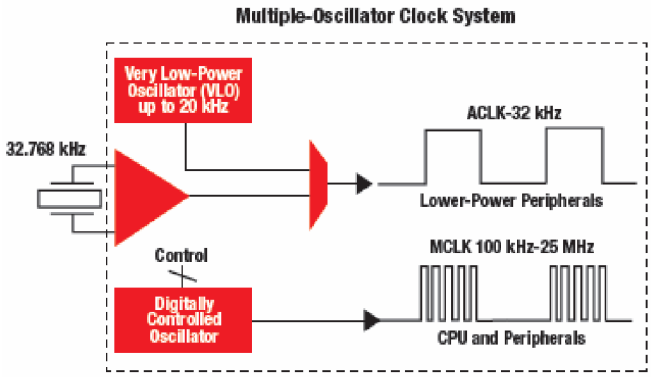
Jedná se o 16-ti bitový smíšený signálový mikrokontroler od firmy Texas Instruments. Zařízení může volitelně obsahovat watchdog, USART, SPI, I^2C, IrDA, LCD, USB a 10/12/14/16-bit A/D převodníky.

Další parametry:

- CPU 8 – 25 MHz
- Flash 0,5 – 256 KB
- RAM 128B – 16KB
- Napájecí napětí 1,8 – 3V

Za účelem šetření energie je MSP 430 vybaven propracovaným systémem hodinových systémů (viz. obrázek 20)

- ACLK (Auxiliary clock) – vnější (pomocné) hodiny, slouží jako hodinový signál pro periferie (časovače), jeho frekvence je odvozena z interního nízkopříkonového oscilátoru (VLO), popřípadě může získávat signál z externího krystalu.
- MCLK (Main clock) - hlavní hodiny, slouží jako hlavní hodiny pro CPU a pro A/D převodníky. Jeho frekvence je odvozena od digitálně řízeného oscilátoru (DCO) s frekvencí až 25 MHz nebo externím krystalem
- SMCLK (Sub-main clock) –vedlejší hodiny, slouží jako hodiny pro rychlejší periferie



Obrázek 20: Systém hodin u MSP430 [11]

Systém hodinových signálů je základem pro pět základních úsporných režimů MSP430: módy:

- Aktivní mód – všechny hodinové signály a periferie jsou aktivní
- LPM0 – zde dochází k vypnutí CPU, ACLK i SMCLK zůstávají aktivní, MCLK je vypnut
- LPM1 – CPU vypnuto, MCLK, SMCLK, přičemž aktivní zůstává pouze ACLK
- LPM 2 a LPM3 – čekací módy, ACLK zapnuto, typická spotřeba 1 µA
- LPM4 – CPU i veškeré hodinové signály jsou uspány, zůstává pouze napájení RAM a BOR.

Tyto módy provozu se pochopitelně pro jednotlivé varianty MCU mohou nepatrně lišit. Další důležitou vlastností je velmi rychlé probuzení z jednotlivých úsporných módů za 1 µs. Jako zajímavost bych uvedl, že MSP430 obsahuje v sobě i nízkopříkonové operační zesilovače.

Tabulka 17 zobrazuje porovnání jednotlivých rodin MCU MSP430 v závislosti na spotřebě .

Tabulka 17: Porovnání jednotlivých rodin MSP430 [9]

	RAM	RTCC	Standby	active	A/D	MIPS/freq
	[µA]	[µA]	[µA]	[µA/MIPS]	-	[MHz]
MSP430x1xx	0,1	0,7	0,7	200	10,12bit SAR	8
MSP430F2xx	0,1	0,7	0,3	220	10,12bit SAR, 16 sigma delta	16
MSP430G2xx	0,1	0,7	0,4	220	10bit	16
MSP430F5xx	0,1	2,5	1,7	165	10, 12bit SAR	25

AD převodník [11]

MSP430 obsahuje dva různé typy AD převodníků s postupnou aproximací a se sigma delta převodem. První jmenovaný pracuje rychlostí 200 ksps, přičemž rozlišení je 10 nebo 12 bitové. Volitelně může MCU obsahovat 5, 8, 12 nebo 16 vstupních kanálů pro AD převodník.

Spotřeba A/D převodníku se skládá se spotřeby samotného převodníku 180 μA a spotřeby pro napěťovou referenci 220 μA.

Sigma delta A/D převodník umožňuje až 16 bitové rozlišení, ale vzhledem k rychlosti vzorkování není pro naši aplikaci vhodný.

4.2.3 STM8L

Firma STM Microelectronics nabízí 8-bitové nízkopříkonové mikroprocesory, které nabízí spotřebu v aktivním módu 150 μA/MHz. Dále jsou tyto mikrokontrolery vybaveny šetřícím režimem, ve kterém spotřeba mikroprocesoru klesá k 350 nA. Tyto MCU jsou vyráběny ve dvou řadách STM8L101xx a STML15x, které se od sebe liší množstvím úsporných režimů.

Základní vlastnosti [13]:

- CPU – 16 MHz
- Napájecí napětí 1,8 – 3,6 V (v power down módu může poklesnout i k 1,65 V)
- Flash 4 – 32 KB

Šetřící módy STML15x

- Wait mode – dochází k zastavení CPU, periferie běží
- Low power run mode – vybrané periferie zůstávají aktivní, program je vykonáván z RAM při použití nízkorychlostního oscilátoru
- Low power wait mode – hodiny pro CPU zastaveny, vybrané periferie zůstávají aktivní
- Active-halt mode – CPU vypnuto, můžeme nechat povoleno Auto-wake-up a watchdog
- Halt mode – vše vypnuto

Řada STM8L101xx obsahuje pouze wait mode, active-halt-mode a halt mode.

Tabulka 18: Spotřeba v jednotlivých módech provozu [15]

Nízkopříkonové módy	I[μA]
low power run	5,4
low power wait	3,3
active-halt	1
Halt	0,4

Tabulka 18 zobrazuje spotřebu v režimech active-halt a halt v případě, že je vypnut BOR detektor. Firma vyrábí i 32 – bitovou verzi STM32L. Tato varianta je pro naši aplikaci ovšem zbytečná.

AD převodník[12]

STM8L obsahuje AD převodník s 25 externími kanály a dvěma interními kanály (teplotní čidlo a kalibrační), přičemž lze nastavit rozlišení 6, 8, 10 nebo 12 bitů. Hodiny pro AD převodník jsou odvozeny vydělením, jejich maximální frekvence může být 16 MHz, minimální 320 kHz. Nejkratší konverze pro 12 bitové rozlišení trvá 1 μs (při frekvenci 16 MHz). Převodník používá metodu postupné aproximace.

Spotřeba převodníku dle [13] je 1450 μA pro A/D a 700 μA pro napěťovou referenci. Rychlost může dosahovat hodnoty až 1Msps.

4.3 C8051F90x – 91x

Firma Silicon Labs vyrábí 8 bitové nízkopříkonové MCU, které se vyznačují spotřebou v aktivním módu 160 μA/MHz a 10 nA v sleep módu. Zvláštností tohoto mikrokontroleru je rozsah napájecího napětí 0,9 – 3,6 V, hodnota 0,9 V je ze všech v této práci popsaných MCU nejnižší a je způsobena integrovaným DC/DC měničem.

Základní vlastnosti [16]:

- RAM 768 – 4352 B
- Flash 8 – 64 kB
- Napájecí napětí 0,9 – 3,6 V
- CPU 25 MHz
- I^2C, 2 SPI, UART
- Doba probuzení 2 μs

Tabulka 19: Spotřeba v jednotlivých módech provozu

Mód provodu	I[nA]
Sleep mode	10
Sleep mode s BOD	50
Sleep mode s LFO	300
Sleep mode s externím krystalem	600

A/D převodník [17]

- 10 bitový s rychlostí konverze maximálně 300 ksps
- 12 bitový s rychlostí konverze maximálně 75 ksps
- SAR
- Spotřeba 720 μA

4.4 Porovnání jednotlivých MCU

V této kapitole budou srovnány jednotlivé modely nízkopříkonových MCU. Objektivní porovnání na základě údajů z katalogových listů je velmi obtížné, protože každá firma používá mírně odlišné způsoby šetřících módů a údaje uvedené v katalogových listech zpravidla nejsou za stejných podmínek. Ideálním řešením by bylo odzkoušení a proměření všech modelů.

Tabulka 20: Srovnání jednotlivých MCU

	Šířka slova	CPU	Aktivní mód	Sleep	A/D	A/D rychlost	A/D spotřeba	Rychlost probuzení
	bit	[MHz]	[μA/MHz]	[nA]	bit	[kSPS]	[μA]	[μs]
MSP430F5xx	16	25	165	100	12	200	400	1
PIC24F16KA	16	16	182	20	10	500	500	1000
STM8L	8	16	150	400	12	1000	2150	5
C8051F90X-91X	8	25	160	50	12	75	720	2
H8/300H	8	10	550	100	10	80	2000	-
ATxmega A1	8/16	35	365	100	12	2000	3600	320

V tabulce je nutno zdůraznit, že první dva a případně poslední MCU jsou 16 bitové, tudíž efektivita jejich výpočtu bude mnohem vyšší, než u ostatních a budou v aktivním režimu setrvávat kratší dobu. Poslední sloupec rychlost probuzení obsahuje informace, za jak dlouhou dobu se MCU probudí z úsporného sleep režimu. V případě PIC24F16KA je zde uvedeno číslo probuzení z režimu deep sleep.

Přestože podle tabulky PIC24F16KA vykazuje nejlepší vlastnosti, co se týče spotřeby v režimu deep sleep, není tento režim pro naši aplikaci použitelný vzhledem k dlouhé době probuzení (viz. 4.2.1). Další nevýhodou ve srovnání s konkurencí je jeho pouze 10 bitový A/D převodník.

Pro výslednou realizaci byl vybrán MSP430. V porovnání s konkurencí má nejnižší spotřebu A/D převodníku a jednu z nejnižších spotřeb v aktivním módu. Další jeho výhodou je dostupnost programátorů na VUT. Poměrně zajímavým řešením by mohlo být použití MCU C8051F90X-91X, který dokáže pracovat se vstupním napětím 0,9 V, protože v sobě má integrovaný DC-DC měnič.

Tabulka 21 obsahuje orientační porovnání chyb jednotlivých interních A/D převodníků obsažených v MCU. Všechny zkoumané A/D jsou SAR.

Tabulka 21: Orientační porovnání chyb interních A/D převodníků

Nelinearity	integrální	diferenciální	Chyba nuly	chyba zesílení	celková chyba	
MSP430F5xx	±2	±1	±3,5	±2	±5	LSB
PIC24F16KA	±2	±1,5	±2	±3	-	LSB
STM8L	±2	±1,6	±2	1,5	±3	LSB
C8051F90X-91X	±1,5	±1	±2	-	-	LSB
H8/300H	-	-	-	-	±4	LSB
ATxmega A1	±5	±0,75	±2 mV	±10 mV	-	LSB

4.5 Externí nízkopříkonové A/D převodníky

V případě konstrukce s externím A/D převodníkem je potřeba brát v úvahu i spotřebu A/D převodníku, která se nám projeví do celkové spotřeby zařízení. Komunikace mezi A/D převodníkem a MCU bude zvyšovat jak náročnost programu, tak s tím související spotřebu nadřazeného MCU. Proto je důležité, pokud již se rozhodneme pro externí A/D převodník, aby nám přinesl nějaké výhody oproti integrovaným A/D v MCU. Minimálním požadavkem je tedy alespoň 14 nebo 16 bitové rozlišení. Při vyšším rozlišení ale zcela dle očekávání roste i spotřeba.

Tabulka 22 uvádí běžně dostupné (Farnell) nízkopříkonové A/D převodníky. Vzhledem k požadavku na co nejnižší spotřebu je nejvhodnějším kandidátem pro výslednou realizaci LTC1864L, popřípadě AD7685. Oba tyto AD převodníky by nám přinesly 16 bitové rozlišení a nízkou spotřebu.

Tabulka 22: Porovnání nízkopříkonových externích A/D převodníků

	Rozlišení	Rychlost	Typ převodníku	Spotřeba při 3 V	Napájecí napětí	Rozhraní	Cena
	bit	[kSPS]	-	[μA]	[V]	-	[Kč]
ADS8320/8321	16	100	SAR	700	2,7 - 5	SSI/SPI	371
AD7685	16	250	SAR	550	2,3 - 5,5	SPI/SPI	409
AD7980	16	1000	SAR	1000	2,5 -5,5	SPI/SPI	738
LTC 1864L	16	150	SAR	450	2,7 - 3,6	SSI/SPI	409

Tabulka 23: Orientační porovnání nelinearit a chyb jednotlivých A/D převodníků

Nelinearity	Integrální	Diferenciální	Offset	Chyba zesílení
	LSB	-	LSB	LSB
ADS8320/8321	±0,018	14 (15)	±2	±0,05
AD7685	0,7	15 (16)	±1,6	±30
AD7980	2,5	16	±1	±2
LTC 1864/1865	-	14 (15)	±20 mV	±20

5 ANALOGOVÉ PŘEDZPRACOVÁNÍ

V této části bude popsán způsob úpravy analogového signálu pro A/D převodník. Zdrojem signálu bude rogowského cívka o vnitřním odporu 476 Ω. Úkolem rogowského cívky bude měřit proud v rozsahu desítek až tisíců ampér, přičemž na svém výstupu bude generovat napětí o velikosti 50 mV až 50 V, které je potřeba upravit na úrovně zpracovatelné A/D převodníkem.

Protože reference A/D převodníku má hodnotu 2,5 V a minimální vstupní napětí, které je potřeba měřit 50 mV, je nutné, kromě pasivních prvků použít i operační zesilovač.

5.1 Výběr operačního zesilovače

Základními požadavky pro výběr operačního zesilovače jsou:

- Vysoká přesnost
  - Malý vstupní offset
  - Malý drift
  - Malý šum
  - Vstupy a výstupy typu Rail-to-Rail
- Nízký proudový odběr
- Vysoká vstupní impedance
- Velká šířka pásma
- Co nejmenší spotřeba
- Velká hodnotu rychlosti přeběhu
- Možnost napájení z 3 V a nižší

5.2 Porovnání vybraných operačních zesilovačů

Tabulka 24 uvádí běžně dostupné operační zesilovače. Všechny uvedené jsou typu rail-to-rail a jejich spotřeba je nejnižší na trhu.

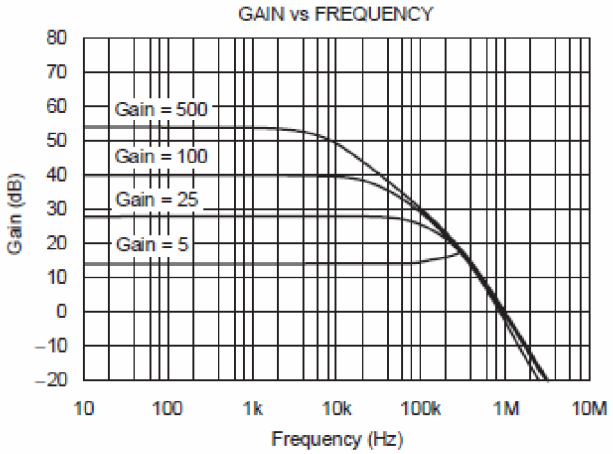
Jako nejvhodnější kandidát pro výslednou realizaci byl zvolen operační zesilovač INA 321/ INA 2321. Tento operační zesilovač má největší šířku pásma o velikosti 500 kHz, malý offset a přijatelnou dobu přeběhu. Nevýhodou v porovnání s operačními zesilovači OPA je jeho vyšší spotřeba 40 μA, která je ovšem vykompenzována nesrovnatelně vetší šířkou pásma. Tento operační zesilovač je vybaven úsporným režimem, ve kterém spotřeba klesá k 1 μA. Obrázek 21 zobrazuje jeho frekvenční charakteristiku.

Tabulka 24: Porovnání vybraných operačních zesilovačů

	Šířka pásma	Proudový odběr	Offset	Rychlost přeběhu	Napájení
	[kHz]	[µA]	[µV]	[V/µs]	[V]
INA 321/ 2321*	500	40	200	0,04	2,7 - 5,5
OPA 379/2379*	90	5,5	400	0,4	1,8 - 5,5
ISL28270/28273/28470	240	60	150	0,5	2,4 – 5,0
AD 627	80	85	125	0,05	2,2 - 18
LT1789	60	95	100	0.062	2,2 - 36
OPA 369/2369*	12	0,8	250	0,005	1,8 - 5,5
MAX 954 (MAX 953)	125(20)	5	100	0,066	2,4 - 7

* alternativy s číslem 2 na začátku obsahují dva operační zesilovače (dva kanály)

**údaje byly získány z katalogových listů jednotlivých součástek



Obrázek 21: Frekvenční charakteristika INA 2321/321

5.3 Návrh analogového předzpracování

Dle požadavků zadání byl celý měřicí rozsah (50 mV – 50 V) rozdělen na 4 podrozsahy. Pro každý podrozsah bylo navrženo vlastní obvodové řešení pro úpravu a omezení vstupního signálu. Samotné měření bude probíhat současně na všech kanálech, přičemž ze získaných dat se vybere jen ta nejpřesnější a smysluplná.

Obrázek 22 zobrazuje schéma zapojení pro rozsah 50 V až 5 V. Signál z rogowského cívky je upraven napěťovým děličem R1 a R2, jehož hodnoty byly voleny s ohledem na toleranci součástek a s ohledem na překrývání jednotlivých podrozsahů. Pro výstupní napětí tohoto děliče platí:

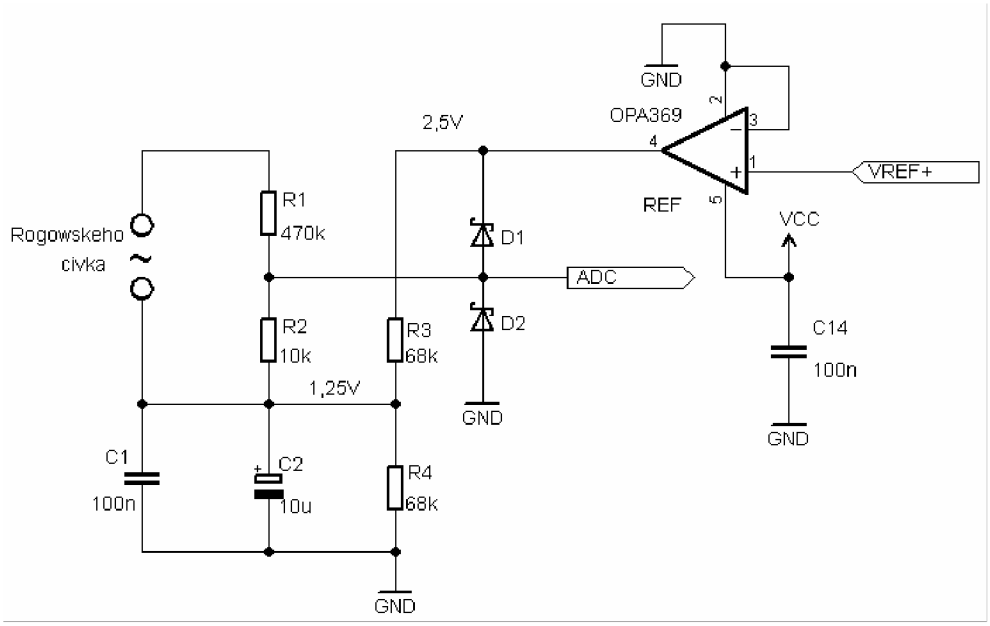
$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \tag{4.1}$$

Celý vstup je posunut vůči zemi napěťovým děličem R3 a R4 o 1,25 V. Ochrana před přepětím je zde řešena schottkyho diodami BAT 48. Referenční napětí 2,5 V je získáno za pomoci operačního zesilovače OPA369 z pinu VREF+ mikrokontroleru. Tento operační zesilovač zde slouží jako ochrana před zatěžováním reference v MSP430 a je volen s ohledem na minimalizaci spotřeby. Jeho spotřeba je 0,5 μA a je připojen přímo na napájecí napětí z DC-DC měniče 3 V.

Pro převod na skutečné napětí rogowského cívky v MCU je třeba použít vzorec:

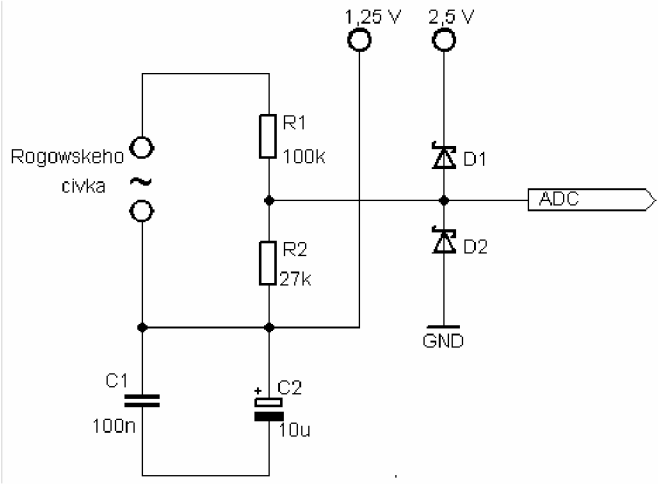
$$U_{ROG} = (U_{IN} - 1{,}25) \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \tag{4.2}$$

Kde U_{IN} je vstupní napětí na A/D převodníku MSP430 a U_{ROG} je měřené napětí na rogowského cívce. Je nutné brát v úvahu, že je zde aplikována ochrana přepětí, tudíž pokud výstupní napětí z děliče R1 a R2 bude větší než 2,5 V, tak tato rovnice nebude platit. Toto platí obzvláště pro nižší rozsahy.



Obrázek 22: Schéma zapojení měřicího kanálu pro rozsah 50 V – 5 V

Obrázek 23 zobrazuje měřicí kanál pro vstupní napětí v rozsahu 5 V – 500 mV. Zapojení je totožné, tudíž pro výpočet napětí se použijí stejné vztahy jako pro rozsah 50 V – 5V.



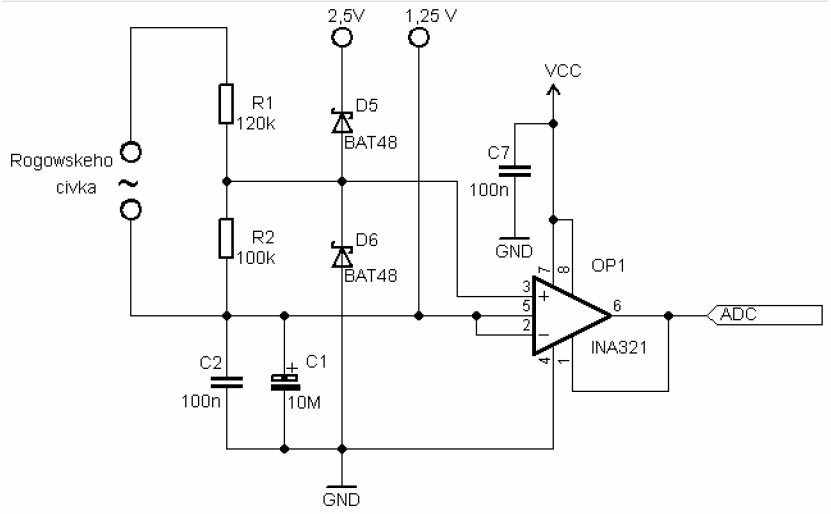
Obrázek 23: Schéma zapojení pro rozsah 5 V - 500 mV

Pro nižší rozsahy je již použit operační zesilovač INA 321. Minimální zesílení nastavitelné tímto operačním zesilovačem je 5. Proto pro rozsah 500 mV – 100 mV je zesílení rovno právě 5.

Pro převod na skutečné napětí rogowského cívky v MCU je třeba použít vzorec:

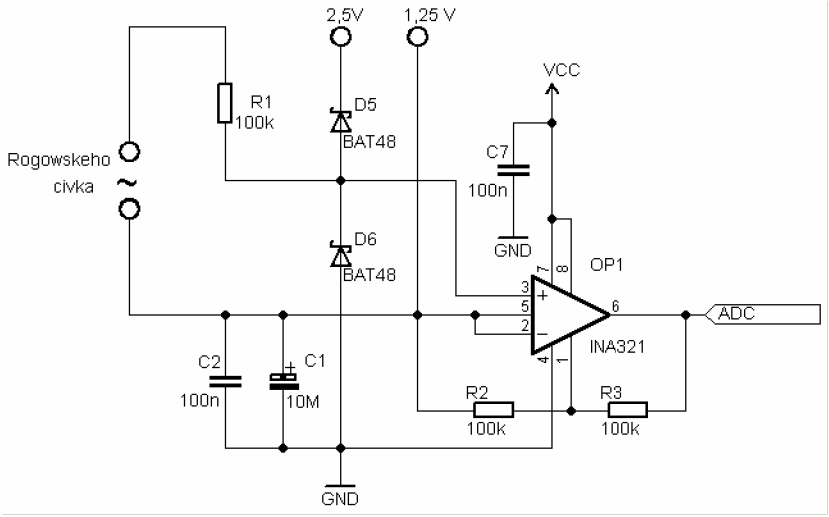
$$U_{ROG} = (U_{IN} - 1{,}25) \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot \frac{1}{G} \tag{4.3}$$

Kde G je zesílení operačního zesilovače.



Obrázek 24: Schéma zapojení pro rozsah 500 mV – 100 mV

Pro rozsah od 100 mV níže byl již vstupní dělič naprosto vynechán. Zůstal pouze 100 kΩ odpor, který má na starosti omezení případného proudu přes ochranné diody. Zesílení bylo nastaveno odpory R_2 a R_3 na hodnotu 10.



Obrázek 25: Schéma zapojení pro rozsah <100 mV

Pro přepočet lze použít následující vzorec, kdy zesílení G = 10. Vzorec stejně jako v předchozích případech platí pouze za předpokladu, že se neuplatňuje ochrana diodami.

$$U_{ROG} = (U_{IN} - 1{,}25) \cdot \frac{1}{G} \tag{4.4}$$

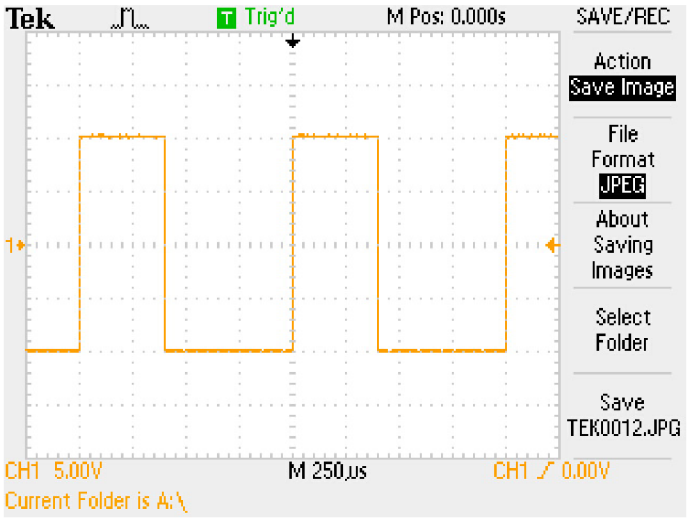
Celé zapojení bylo simulováno v programu multisim a výsledné hodnoty se shodovaly s teoretickými předpoklady. Pro výslednou implementaci do MSP430 je nutné k hodnotám přepočteným pomocí uvedených vztahů připočíst ještě kalibrační konstanty které budou korigovat tolerance součástek.

5.3.1 Měření parametrů rozsahu 0 - 100 mV

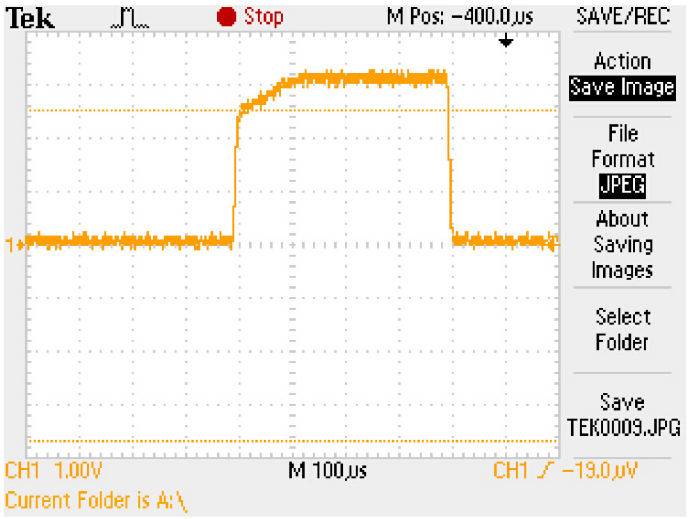
Problémem, který se může vyskytnou je, že na vstupu každého z měřených rozsahů se bude objevovat plné napětí z měřeného rozsahu 50 V – 50 mV. Diody sice zajistí omezení, ale není zaručeno, že se operační zesilovač nedostane do saturace. Ta by mohla způsobit nepřesnosti při měření v případech, když je měřeno například napětí z nejvyššího rozsahu a náhle nastane rychlý pokles (ostrá sestupná hrana), který je potřeba měřit nejnižším rozsahem. Z těchto důvodů bylo provedeno následující měření.

Na nepájivém kontaktním poli byl realizován měřicí kanál pro rozsah 0 – 100 mV přesně podle obrázku 25. Napájení operačního zesilovače o hodnotě 3 V bylo získáno společně s referenčním napětím 2,5 V ze zdroje Agilent E3631. Jako generátor vstupního signálu byl použit přístroj Picotest G510A. Vstupní a výstupní signály byly měřeny osciloskopem Tektronix 2014B.

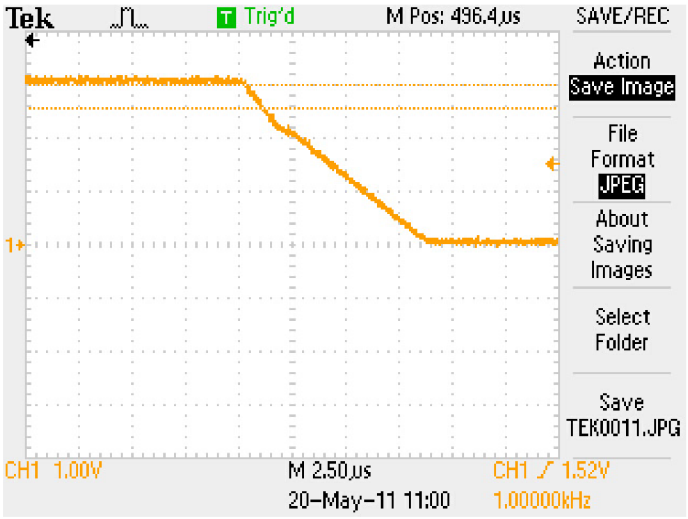
Generátorem byl vytvořen vstupní signál o velikosti U_{p-p}= 20,4 V, frekvenci 1 kHz a šířce pulsu 500 µs (obrázek 26). Výstupní signál z měřicího řetězce je zobrazen na obrázku 27 a obrázku 28. Můžeme si zde povšimnout, že sestupná hrana je ostrá, tudíž k problémům se saturací nedochází. Doba trvání sestupné hrany je 7 µs. Na výstupním signálu si můžeme povšimnout rušení, které je způsobeno realizací celého zapojení na nepájivém kontaktním poli.



Obrázek 26: Vstupní signál (U_{pp}=20,4 V, f = 1 kHz)

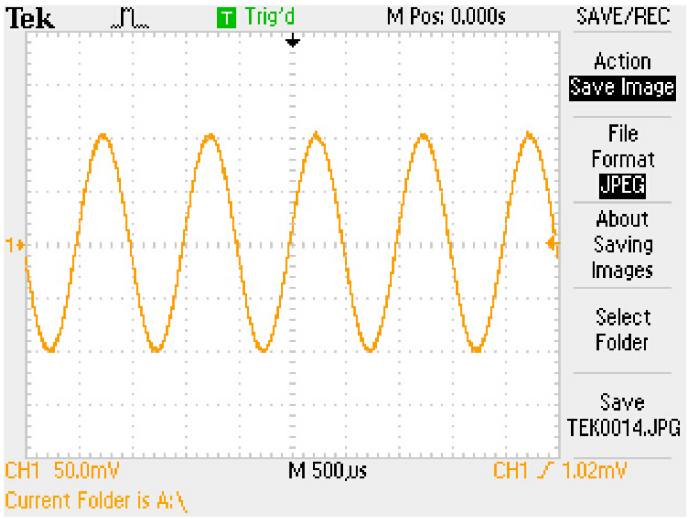


Obrázek 27: Výstupní signál (kurzor 2,5V)

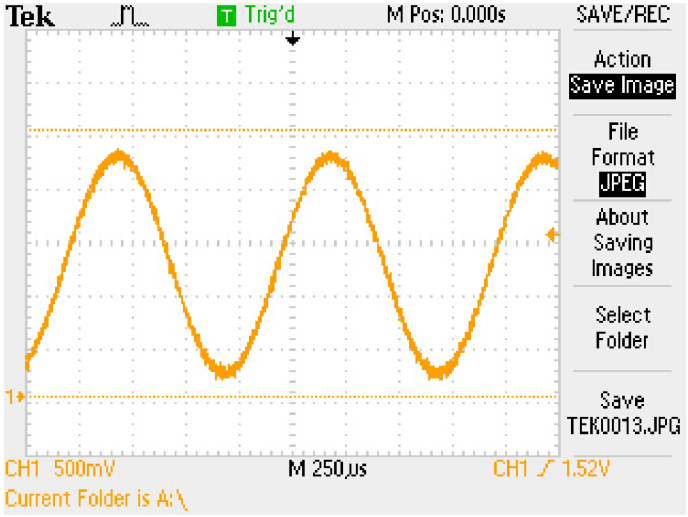


Obrázek 28: Detail sestupné hrany výstupního signálu t_s=7µs (kurzor 1 hodnota 3V, kurzor 2 hodnota 2,5 V)

Se stejným zapojením bylo provedeno ověření správné činnosti obvodu. Na vstup měřicího kanálu byl přiveden sinusový průběh o amplitudě 100 mV a frekvenci 1kHz (obrázek 29) a na výstupu byl sledován výsledný signál o amplitudě 2,1 V.



Obrázek 29: Vstupní signál



Obrázek 30: Výstupní signál (kurzor 1- 0 V, kurzor 2 2,5V)

6 ZÁVĚR

V příloze 2 je zobrazeno schéma pro konstrukci měřicího modulu napájeného po optickém vlákně. Jako převodník světla na elektrický proud je zde použita fotodioda Tesla 3WN16620, která napájí kombinaci nábojové pumpy S882Z a DC-DC měniče S8353. Tato kombinace dosahuje účinnosti v rozmezí 45 % až 70%. Byla vybrána vzhledem k její schopnosti startu z nízkého napětí a z měřených variant vykazuje nejvyšší účinnost.

Srdcem celého zapojení je mikrokontroler MSP430, který byl vybrán s ohledem na jeho nízkou průměrnou spotřebu a nízkou spotřebu jeho A/D převodníku. Jeho úkolem bude digitalizovat vstupní signál z rogowského cívky, který bude v rozsahu 50 mV až 50 V. Tento vstupní rozsah byl rozdělen do 4 podrozsahů (50 V až 5 V), (5 V až 100 mV) a (100 mV – 0 V). Přičemž k měření bude docházet na všech kanálech současně a z naměřených hodnot bude vybrána jenom nejpřesnější.

Výsledné zařízení se bohužel nepodařilo realizovat, ale dá se předpokládat, že výsledné zařízení je realizovatelné, avšak za předpokladu volby kompromisní hodnoty rychlosti A/D převodníku, která bude mít zásadní vliv na spotřebu celého zařízení.

Literatura

[1] ULTRA-LOW VOLTAGE OPERATION CHARGE PUMP IC FOR STEP-UP DC-DC CONVERTER STARTUP : S-882Z Series [online]. Rev.1.2_00. [s.l.] : [s.n.], 2000 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: <http://datasheet.sii-ic.com/en/charge_pump_ic/S882Z_E.pdf>.

[2] Seiko Instruments. Start-up IC for DC/DC-Converter starts from 0.3V Input Voltage : Press release [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: <http://www.seiko-instruments.de/files/swr_e-19-03-09_startup_ic_for_dc-dc_converter.pdf>.

[3] Seiko. S-8353/8354 Series : STEP-UP, PWM CONTROL or PWM / PFM SWITCHABLE BUILT-IN TRANSISTOR SWITCHING REGULATOR [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: <http://datasheet.sii-ic.com/en/switching_regulator/S8353_8354_E.pdf>.

[4] Texas instruments. Choosing An Ultralow-Power MCU [online]. [s.l.] : [s.n.], 2004 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: <http://focus.ti.com/lit/an/slaa207/slaa207.pdf>.

[5] ROBENEK, Jan . HW [online]. 2008 [cit. 2010-06-03]. Topit nebo netopit, to je oč tu běží“. Dostupné z WWW: <http://hw.cz/teorie-a-praxe/art2611-topit-nebo-netopit-je-oc-tu-bezi.html>.

[6] Microchip. Microchip : 1.8v/2.0v Featured Product Specifications [online]. 2010 [cit. 2010-06-03]. Extreme Low Power. Dostupné z WWW: <http://www.microchip.com/en_us/technology/xlp/>.

[7] IVEY, Brant. NanoWatt and nanoWatt XLP™ Technologies: An Introduction to Microchip’s Low-Power Devices : AN1267 [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01267a.pdf>.

[8] HOFMANN, Mark. Practical Applications of Low-Power Design with nanoWatt XLP™ [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Future%20XLP%20Article.pdf>.

[9] Texas Instruments. Texas Instruments : MSP430™16-bit Ultra-Low Power MCUs [online]. 2010 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: <http://focus.ti.com/paramsearch/docs/parametricsearch.tsp?sectionId=95&tabId=1200&familyId=342&family=mcu>.

[10] Texas Instruments. MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/msp430bt5190.pdf>.

[11] Texas Instruments. MSP430 Ultra-low-power microcontrollers [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: <http://focus.ti.com/lit/sg/slab034r/slab034r.pdf>.

[12] STM Microelectronics . AN3137 : A/D converter on STM8L devices [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: <http://www.st.com/stonline/products/literature/an/16983.pdf>.

[13] STM microelectronics . STM8L151x4, STM8L151x6, STM8L152x4, STM8L152x6 [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: <http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/15962.pdf>.

[14] STMicroelectronics. STMicroelectronics : STM8L - 8-bit ultra-low-power MCUs [online]. 2010 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: <http://www.st.com/mcu/inchtml-pages-stm8l.html>.

[15] STMicroelectronics. STM8L family power management [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: <http://www.st.com/stonline/products/literature/an/17035.pdf>.

[16] Silicon Labs. Low-Power Solutions [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: <https://www.silabs.com/Marcom%20Documents/Resources/LowPowerSolutions.pdf>.

[17] Silicon Labs. C8051F91x-C8051F90x [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: <https://www.silabs.com/pages/DownloadDoc.aspx?FILEURL=Support%20Documents/TechnicalDocs/C8051F91x-90x.pdf&src=ProductMatrix>.

[18] RODRIGUES, João Pedro Lamas. Conversores de Elevação de Tensão em Microssistemas Termoeléctricos de Geração de Energia para Sensores sem Fios. Guimarães, 2009. 100 s. Dizertační práce. UNIVERSIDADE DO MINHO.

[19] SALATA, Alberto . Miniaturisation of solar energy harvesters: efficiency analysis of converters and ultra-low voltage start up techniques. [s.l.], 2007. 111 s. Diplomová práce. Universitat Politcnica de Catalunya . Dostupné z WWW: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4141/1/Microsoft%20Word%20-%20Report.pdf>.

[20] MOTONOBU, Kawai . IC for Single-Cell Solar/Fuel Cells Can Step Up from +0.3V. Nikkei Electronics Asia [online]. 2005, 8, [cit. 2011-04-20]. Dostupný z WWW: <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/HONSHI/20061124/124388/>.

[21] Microchip. MCP1623/23 [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010 [cit. 2011-04-20]. Dostupné z WWW: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41420A.pdf>.

[22] Texas Instruments. TPS 61200, TPS61201, TPS61202 [online]. [s.l.] : [s.n.], 2007 [cit. 2011-02-21]. Dostupné z WWW: <http://focus.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=tps61200&fileType=pdf>.

[23] BAURA, T. Současný obousměrný přenos dat a napájecího signálu jedním optickým vláknem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 88 s, 2 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

[24] Maxim. MAX1722/MAX1723/MAX1724 [online]. [s.l.] : [s.n.], 2007 [cit. 2011-03-22]. Dostupné z WWW: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX1722-MAX1724.pdf>.

[25] Linear Technology. LTC3429, LTC3429B [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2011-03-22]. Dostupné z WWW: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/3429fa.pdf>.

[26] Linear Technology. LTC3108 [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2011-03-22]. Dostupné z WWW: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/3108fa.pdf>.

Seznam příloh

Příloha 1. Charakteristiky fotodiody
Příloha 2. Schéma navrženého měřicího modulu napájeného po optickém vlákně

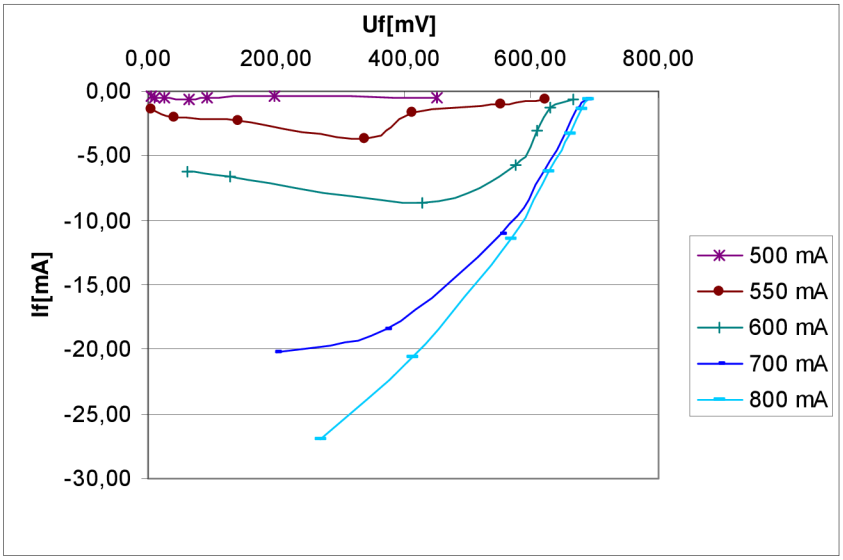
Příloha 1: Charakteristiky fotodiody

Tabulka 1: Závislost napětí U_f na fotodiodě TESLA 3 WN 16620 v závislosti na proudu I_d laserovou diodou SIEMENS SPL 2F81 a zatěžovacím odporu Rz

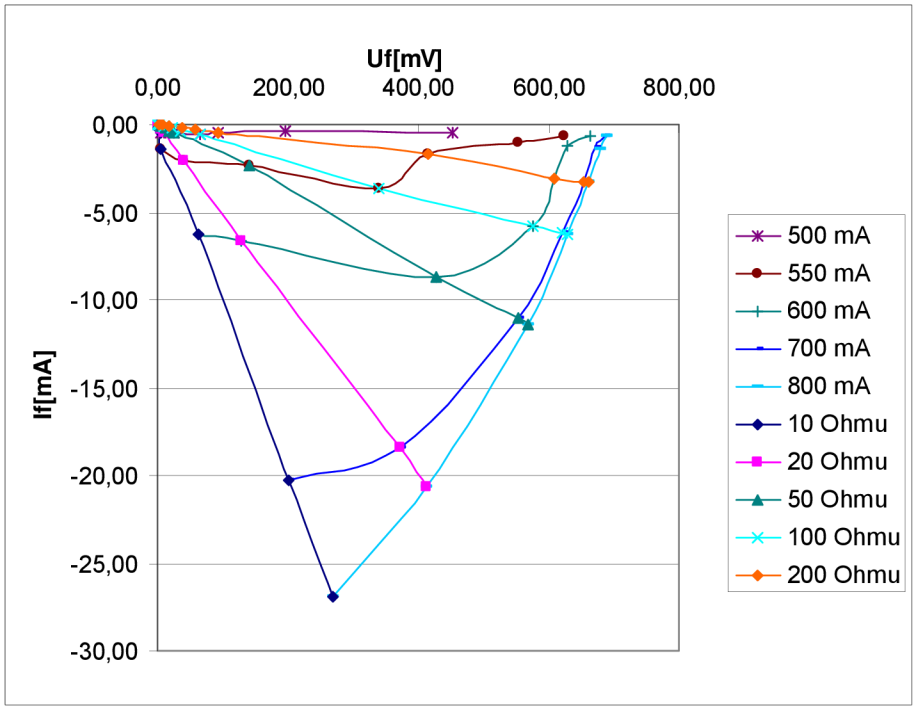
I_d[mA]/R_z[Ω]	U_f[mV]						
	10 Ω	20 Ω	50 Ω	100 Ω	200 Ω	500 Ω	1000 Ω
100	0,11	0,22	0,56	1,15	2,20	5,74	10,95
200	0,35	0,69	1,93	3,70	6,97	17,51	36,49
300	0,82	1,70	4,81	9,50	16,96	41,05	85,90
400	1,90	3,83	11,60	22,90	38,30	85,40	195,00
450	2,92	6,22	17,20	35,10	57,70	134,00	305,00
500	4,45	9,40	26,40	65,40	92,70	196,80	452,00
550	3,95	41,30	141,00	340,00	415,00	554,00	623,00
600	62,70	129,20	428,50	575,00	608,90	630,00	665,00
700	200,70	372,00	552,40	621,00	654,30	672,00	686,00
800	269,00	413,00	567,30	628,00	662,00	680,00	690,00

Tabulka 2: Závislost proudu I_f fotodiodou v závislosti na proudu I_d laserovou diodou SIEMENS SPL 2F81 a zatěžovacím odporu Rz

I_d[mA]/R_z[Ω]	I_f[mA]						
	10 Ω	20 Ω	50 Ω	100 Ω	200 Ω	500 Ω	1000 Ω
100	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
200	-0,03	-0,03	-0,04	-0,04	-0,03	-0,04	-0,04
300	-0,08	-0,08	-0,10	-0,09	-0,08	-0,08	-0,09
400	-0,19	-0,19	-0,23	-0,23	-0,19	-0,17	-0,20
450	-0,29	-0,31	-0,34	-0,36	-0,29	-0,27	-0,31
500	-0,44	-0,47	-0,51	-0,61	-0,46	-0,39	-0,45
550	-1,44	-2,05	-2,30	-3,63	-1,67	-1,06	-0,63
600	-6,23	-6,63	-8,70	-5,78	-3,05	-1,25	-0,66
700	-20,27	-18,45	-11,04	-6,19	-3,26	-1,34	-0,69
800	-26,90	-20,62	-11,43	-6,29	-3,32	-1,36	-0,69

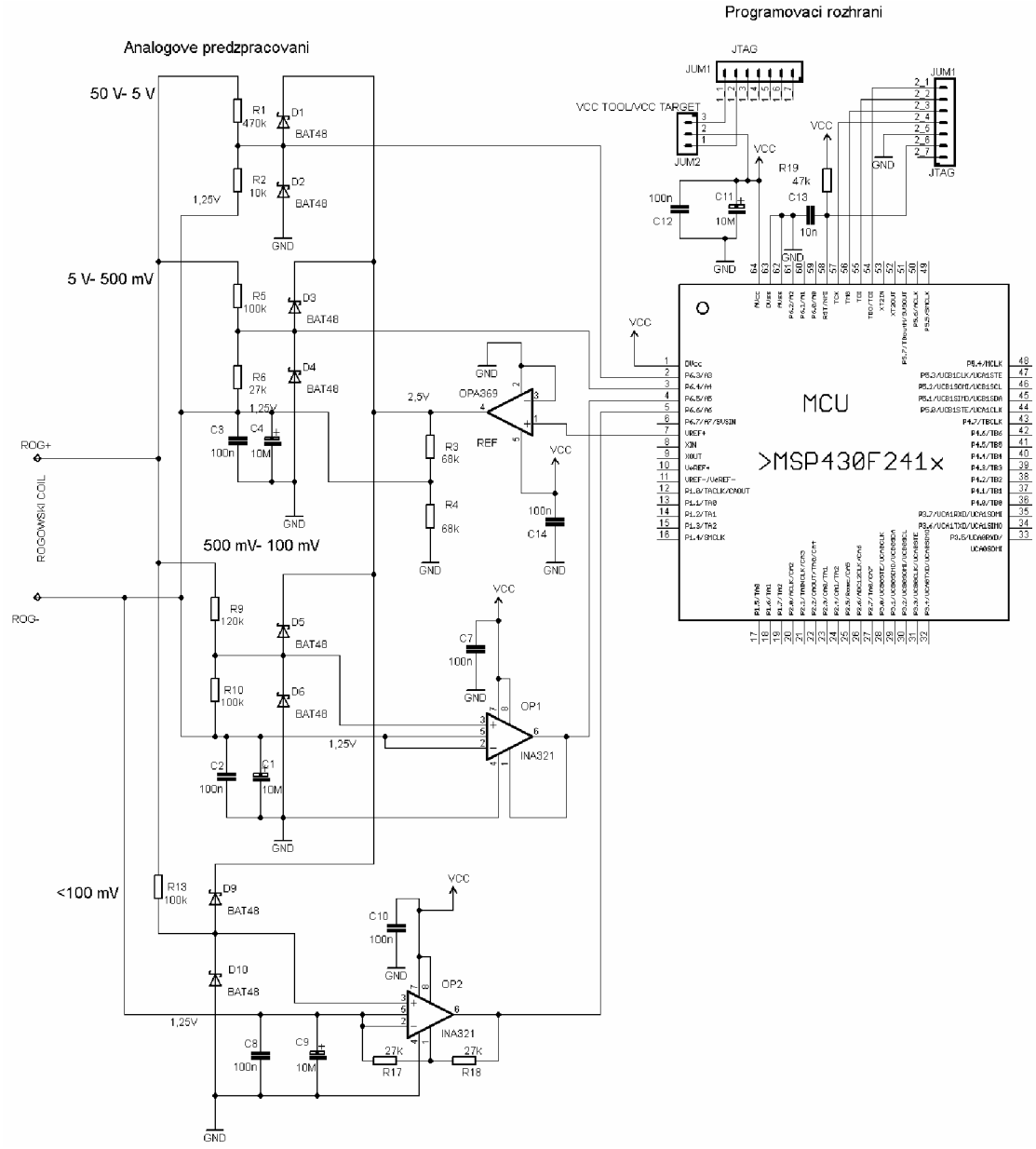


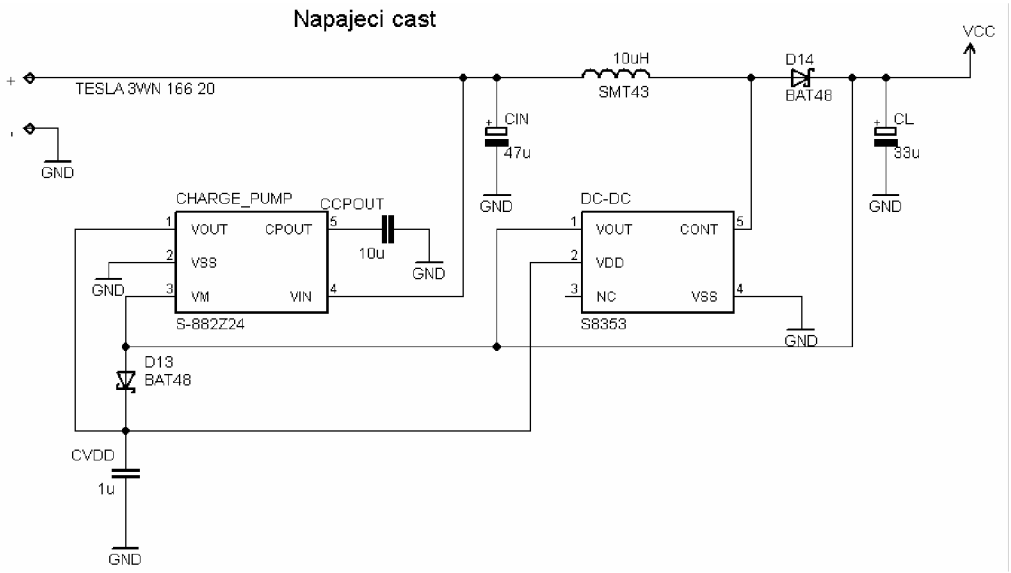
Obrázek 2: Voltampérová charakteristika fotodiody Tesla 3WN16620 v závislosti na vstupním proudu I_d do laserové diody SIEMENS SPL 2F81



Obrázek 2: Voltampérová charakteristika fotodiody Tesla 3WN16620 v závislosti na vstupním proudu I_d do laserové diody SIEMENS SPL 2F81 a zatěžovacím odporu R_z

Příloha 2: Schéma navrženého měřicího modulu




Napajeci cast
VCC
+
TESLA 3WN 166 20
-
GND
10uH
SMT43
D14
BAT48
CIN
47u
GND
CL
33u
GND
CHARGE_PUMP
CCPOUT
1
VOUT
CPOUT
5
2
VSS
3
VM
VIN
4
10u
GND
GND
S-882Z24
DC-DC
1
VOUT
CONT
5
2
VDD
3
NC
VSS
4
S8353
GND
D13
BAT48
CVDD
1u
GND