



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

PŘESNÝ ZDROJ PROUDU S VYSOKOU ÚČINNOSTÍ

Bakalářská práce

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Autor: **Petr Hoření**

Vedoucí práce: Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr Hoření**
Osobní číslo: **M12000359**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronické informační a řídicí systémy**
Název tématu: **Přesný proudový zdroj s vysokou účinností**
Zadávající katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku proudových zdrojů a spínaných napěťových zdrojů. Zaměřte se na konstrukci zdrojů do indukční zátěže.
2. Navrhněte schéma proudového zdroje (50 / 125 μ A) se zaměřením na přesnost (s dlouhodobou a teplotní stabilitou minimálně 0,3 %) a vysokou účinnost.
3. Realizujte funkční model proudového zdroje a ověřte základním měřením jeho funkci.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **cca 30–40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] **Krejčířík, A.: Zdroje proudu. Praha, BEN 2002**
- [2] **Kester, W. a kol.: Practical Analog Design Techniques, Analog Devices, 1995.**
- [3] **Katalogové listy obvodů firm Analog Devices, Linear Technology a Texas Intruments.**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Richard Schreiber

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2016**



prof. Ing. Václav Krápecný, CSc.
děkan



doc. Ing. Vítan Kalčík, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2015

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 16.5.2016

Podpis: 

Poděkování

Rád bych na tomto místě chtěl poděkovat všem, kteří se podíleli na vzniku této bakalářské práce, zvláště vedoucímu práce Ing. Lubomíru Slavíkovi, Ph.D. Vedle jeho trpělivosti a vstřícného přístupu, také za přínosné konzultace a asistenci při laboratorních měřeních.

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 16.5.2016

Podpis: 

Abstrakt

Hlavním úkolem bakalářské práce je návrh a realizace přesného zdroje proudu pro buzení cívky indukčního průtokoměru. Teoretická pasáž je věnována problematice proudových zdrojů, jejich základních parametrů a následného porovnání základních typů zapojení. Dále je popsán princip elektromagnetického měření průtoku indukčními průtokoměry. Další kapitola je věnována simulaci obvodů zdroje proudu s induktivní zátěží.

Praktická část je zaměřena na konkrétní návrh obvodového řešení s teplotní stabilitou a následnou realizaci vytvořeného řešení.

Výsledkem bakalářské práce je deska plošného spoje přesného zdroje proudu. V závěru díla jsou shrnuty výsledky měření a poté jsou konfrontovány s předpoklady simulace.

Klíčová slova:

proudový zdroj, teplotní stabilita, indukční průtokoměr, simulace

Abstract

The main task of the Bachelor's thesis is proposal and implementation of current source with high accuracy for excitation coil of electromagnetic flowmeter. A theoretical part is devoted to the current sources problematics, to their elementary parameters and to the subsequent comparison of the basic connection types. Then, there is described the operation of a electromagnetic flowmeter. Next chapter deals with a simulation of current source circuit.

A practical part is focused on a particular proposal of circuit design with the temperature stability and subsequent realization of the generated solution.

The result of the Bachelor's thesis is PCB of precision current source. At the end of this thesis are summarized measuring results achieved and confronted with simulation conditions.

Keywords:

Current Source, Temperature Stability, Induction Flowmeter, Simulation

OBSAH

Prohlášení.....	2
Poděkování.....	3
Abstrakt.....	4
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	10
Seznam grafů.....	10
Seznam symbolů, termínů a zkratk.....	11
Úvod.....	13
1 Proudový zdroj.....	14
1.1 Ideální zdroj proudu.....	14
1.2 Reálný zdroj proudu.....	16
1.2.1 Parametry zdroje.....	18
1.3 Rozdělení zdrojů proudu.....	20
1.3.1 Zdroj proudu s diskrétními součástkami.....	21
1.3.2 Integrovaný zdroj proudu.....	24
1.3.3 Zdroj proudu se stabilizátory napětí.....	24
1.3.4 Proudové zrcadlo.....	25
1.4 Zdroj proudu s induktivní zátěží.....	26
1.4.1 Cívka (induktor).....	26
1.4.2 Přejíhový jev.....	27
2 Elektromagnetický průtokoměr.....	29
2.1 Popis principu.....	29
2.1.1 Elektromagnetický průtokoměr s kontaktními elektrodami.....	29
2.1.2 Elektromagnetický průtokoměr s kapacitními elektrodami.....	32
2.1.3 Průběhy budících signálů magnetického pole.....	32
3 Návrh zdroje pro budící cívku indukčního průtokoměru.....	34
3.1 Zdroj proudu.....	34
3.2 Průběh budícího proudu.....	36
3.2.1 H můstek.....	36
3.2.2 Realizace budícího obvodu.....	37
3.3 Vysoká účinnost.....	40
3.3.1 Účinnost proudového zdroje.....	43

3.4	Návrh desky plošného spoje	44
3.5	Měření parametrů.....	44
3.6	Teplotní závislost realizovaného zdroje proudu	49
3.6.1	Rozbor teplotních koeficientů součástek	49
3.6.2	Naměřená teplotní závislost.....	50
4	Závěr	51
	Seznam odborné literatury	52
A	Obsah přiloženého CD.....	54
B	Vybíjení cívky.....	55
C	Měřicí pracoviště	58
D	Cívky pro měření	59
E	Schéma zapojení1	60
F	Schéma zapojení 2	61
G	Osazovací schéma.....	62
I	Teplotní komora.....	63

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Schématická značka pro zdroj proudu.....	14
Obrázek 1.2: Zdroj proudu se zatěžujícím odporem R_Z	14
Obrázek 1.3: Závislost výstupního proudu I na hodnotě odporu R_Z	15
Obrázek 1.4: Zatěžovací charakteristika lineárního zdroje.....	16
Obrázek 1.5: Zatěžovací charakteristika nelineárního zdroje.....	17
Obrázek 1.6: Zatěžování reálného zdroje proudu.....	18
Obrázek 1.7: Kompenzace teplotního koeficientu obvodu.....	19
Obrázek 1.8: a) source, b) sink.....	20
Obrázek 1.9: Vstupní charakteristika tranzistoru [3].....	21
Obrázek 1.10: Zpětnovazební stabilizátor proudu s tranzistorem.....	21
Obrázek 1.11: Zdroj proudu se Zenerovou diodou.....	22
Obrázek 1.12: Zdroj proudu s OZ.....	22
Obrázek 1.13: Zmenšení vlivu proudu báze.....	23
Obrázek 1.14: Zdroj proudu se stabilizátorem napětí.....	24
Obrázek 1.15: Proudové zrcadlo.....	25
Obrázek 1.16: Přejížděcí jev RL článku.....	28
Obrázek 2.1: Měřicí čidlo průtokoměru [6].....	30
Obrázek 3.1: Zdroj proudu s napěťovým regulátorem LM117.....	34
Obrázek 3.2: Zdroj proudu s OZ.....	35
Obrázek 3.3: První realizace budicího obvodu.....	37
Obrázek 3.4: Blokové uspořádání driveru H můstku MAX5064.....	38
Obrázek 3.5: Spínaný zdroj napětí.....	41
Obrázek 3.6: Sledovač napětí.....	41
Obrázek 3.7: Blokové schéma vnitřní regulační smyčky.....	42
Obrázek 3.8: Blokové schéma vnější regulační smyčky.....	42
Obrázek 3.9: Napětí na cívce číslo jedna.....	46
Obrázek 3.10: Proud cívkou číslo jedna.....	46
Obrázek 3.11: Výstupní napětí zdroje a sledované napětí nad tranzistorem.....	47
Obrázek 3.12: Napětí na cívce číslo dva.....	47
Obrázek 3.13: Proud cívkou číslo dva.....	47
Obrázek 3.14: Napětí spínaného zdroje a napětí nad tranzistorem.....	48
Obrázek 3.15: Reakce spínaného zdroje na skokovou změnu napětí 0,8 V na vstupu VSENSE.....	48
Obrázek 3.16: Reakce proudového zdroje na skokovou změnu referenčního napětí.....	49

Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Měřicí přístroje.....	44
Tabulka 3.2: Naměřené hodnoty jmenovitého proudu.....	45
Tabulka 3.3: Parametry použitých cívek.....	46
Tabulka 3.4: Teplotní závislosti.....	49
Tabulka 3.5: Měření teplotní závislosti.....	50

Seznam grafů

Graf 3.1: Teplotní analýza návrhů pro jmenovitý proud 125 mA.....	35
Graf 3.2: Teplotní analýza pro jmenovitý proud 50 mA.....	36
Graf 3.3: Napětí U_{GS} tranzistorů bez ochranných diod.....	38
Graf 3.4: Vliv rekuperační diody.....	39
Graf 3.5: Výkony v zapojení zdroje proudu s LM117 Chyba! Záložka není definována.	
Graf 3.6: Výkony v zapojení zdroje proudu s ADA4841.....	40
Graf 3.7: Účinnost spínaného zdroje [10].....	43
Graf 3.8: Teplotní závislost výstupního proudu.....	49
Graf 3.9: Měřená teplotní závislost proudu.....	50

Seznam symbolů, termínů a zkratek

η	Účinnost	[%]
ϕ	Magnetický tok	[Wb]
τ	Časová konstanta	[s]
A_E	Emitorová plocha	[m ²]
\vec{B}	Magnetická indukce	[T]
C	Kapacita	[F]
D	Délka	[m]
DPS	Deska plošného spoje	
\vec{E}	Intenzita elektrického pole	[V/m]
f	Frekvence	[Hz]
\vec{F}	Síla	[N]
Q	Náboj	[C]
G_I	Vnitřní vodivost zdroje	[S]
h_{21E}	Proudové zesílení	[-]
I	Elektrický proud	[A]
I_{ADJ}	Proud vlastní spotřeby stabilizátoru	[A]
I_B	Proud bázi bipolárního tranzistoru	[A]
I_C	Proud kolektorem bipolárního tranzistoru	[A]
I_{REF}	Referenční proud	[A]
L	Indukčnost	[H]
NRO	Napěťový referenční obvod	
MOSFET	Tranzistor řízený elektrickým polem	
OZ	Operační zesilovač	
P_{IN}	Vstupní příkon	[W]
P_{OUT}	Výstupní výkon	[W]
R	Elektrický odpor	[Ω]
R_E	Emitorový odpor	[Ω]
R_I	Vnitřní odpor zdroje	[Ω]
R_Z	Odpor zátěže	[Ω]
R_{BUFFER}	Vstupní odpor předzesilovače	
S	Plocha	[m ²]
S	Citlivostní koeficient	[-]
TK	Teplotní koeficient	[ppm/K]
U	Elektrický napětí	[V]
U_0	Napětí naprázdno	[V]
U_{CES}	Saturační napětí koncového stupně operačního zesilovače	[V]
U_{CH}	Elektrochemické napětí	[V]
U_{REF}	Referenční napětí	[V]
U_S	Svorkové napětí	[V]

U_T	Transformační napětí	[V]
U_{IN}	Vstupní napětí	[V]
U_{BE}	Napětí báze-emitor	[V]
U_{OUT}	Výstupní napětí	[V]
r_I	Dynamický vnitřní odpor	[Ω]
T	Tranzistor	
t	Teplota	[$^{\circ}\text{C}$]
t	Čas	[s]
\vec{V}_s	Střední rychlost proudění kapaliny	[m/s]
\vec{V}	Rychlost	[m/s]
Q_v	Objemový průtok	[m ³ /s]
W	Energie	[J]

Úvod

Bakalářská práce je cílena na realizaci přesného proudového zdroje pro buzení cívek indukčního průtokoměru.

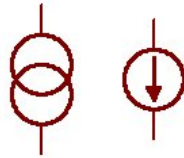
Stěžejním parametrem je 0,3% stabilita jmenovitého výstupního proudu v teplotním rozsahu od 5 °C do 80 °C. Je tedy nutné vzít na vědomí teplotní závislosti elektronických prvků. Současné trendy konstrukčního návrhu v elektronice jsou směřovány ke stále nižším spotřebám elektrické energie, a tudíž další vlastností navrženého obvodu je vysoká účinnost, která by se měla pohybovat okolo 80 %.

Posledním požadavkem je možnost volby dvou ustálených hodnot jmenovitého proudu, konkrétně se jedná o velikost 50 mA a 125 mA.

Samozřejmostí je i předpoklad, že realizovaný zdroj je plně funkční a provozně spolehlivý.

1 Proudový zdroj

Pokud jsou zmíněny napájecí zdroje, poté se ve většině případů hovoří o napěťových zdrojích. Tedy takových, které na výstupních svorkách nezávisle na zatížení udržují jmenovitou velikost napětí. Druhým základním typem napájecího zdroje je zdroj proudu udržující konstantní hodnotu proudu.



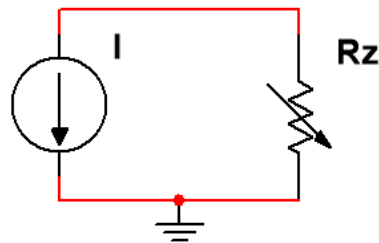
Obrázek 1.1: Schématická značka pro zdroj proudu

Schématické značky proudových zdrojů jsou na Obrázek 1.1. Jelikož není obsažen žádný vnitřní odpor, označuje tato schématická značka ideální zdroj proudu.

Dva proudové zdroje se mohou zapojit paralelně, pak se hodnoty výstupních proudů těchto zdrojů sečtou. Naopak sériové zapojení není možné, protože by nedocházelo k růstu proudu u zdroje s nižším jmenovitým proudem.

1.1 Ideální zdroj proudu

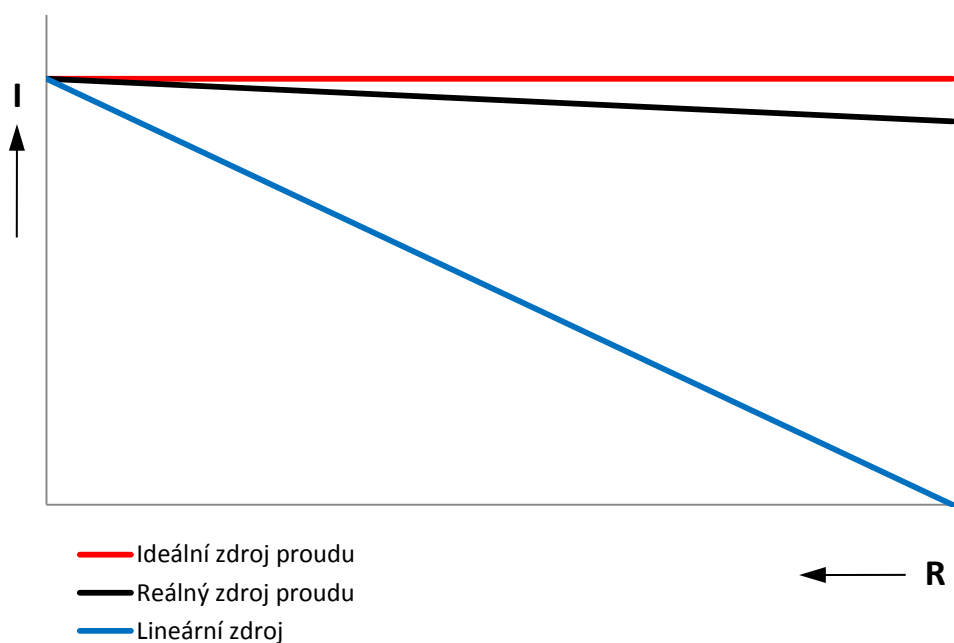
Ideální zdroj proudu má takovou vlastnost, že za jakýchkoliv podmínek (bez napěťové, teplotní a kmitočtové závislosti, stárnutí v čase, šumu a podobně) dodává proud daného směru a hodnoty. Obecný případ zdroje proudu, který je zatěžován odporem R_Z je znázorněn na Obrázek 1.2.



Obrázek 1.2: Zdroj proudu se zatěžujícím odporem R_Z

Pokud bude pozorována velikost proudu I na výstupu zdroje proudu (viz Obrázek 1.3) a jestliže se bude měnit hodnota zatěžovacího odporu R_Z , lze dospět k následujícím závěrům:

- 1) změna hodnoty odporu R_Z způsobí změnu hodnoty napětí U , ale hodnota proudu I se nemění – jedná se o ideální zdroj proudu
- 2) změna hodnoty odporu R_Z způsobí nepatrnou změnu hodnoty vytékajícího proudu I – takovýto zdroj se nazývá reálný zdroj proudu
- 3) změna hodnoty odporu R_Z způsobí již znatelnou změnu velikosti výstupního proudu I – tuto vlastnost má lineární zdroj

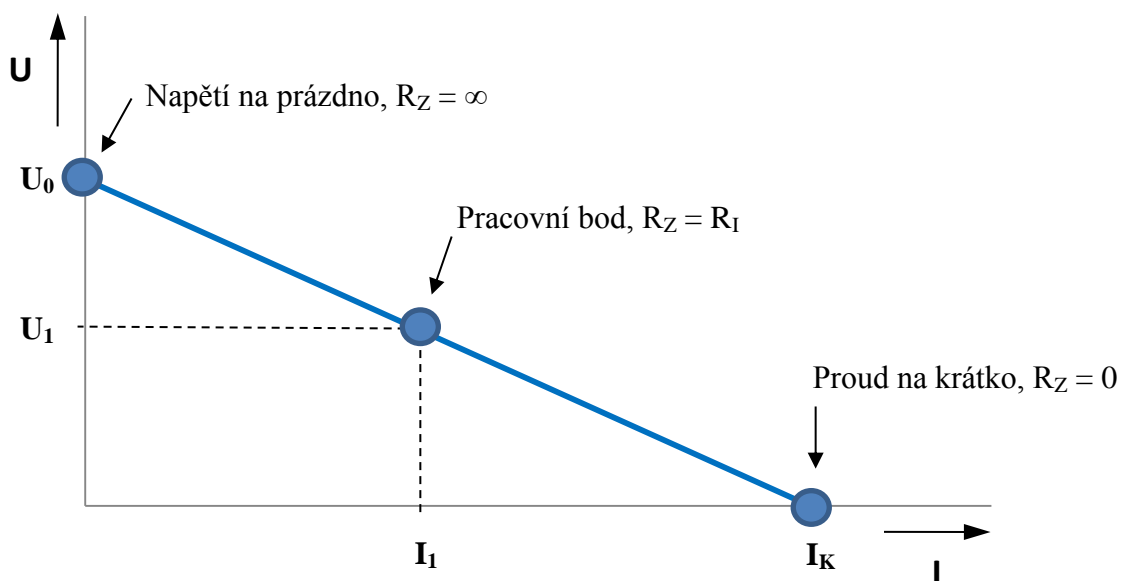


Obrázek 1.3: Závislost výstupního proudu I na hodnotě odporu R_Z

1.2 Reálný zdroj proudu

Reálný zdroj proudu se od ideálního zdroje odlišuje jednou nejpodstatnější vlastností, a tou jsou vnitřní ztráty ve zdroji. Ztráty jsou znázorněny vnitřním odporem R_I resp. vnitřní vodivostí G_I (převrácená hodnota odporu). Vnitřní odpor u reálného zdroje má konečnou hodnotu, tedy vlastní vodivost zdroje je nenulová. Maximální napětí na vývodech zdroje je omezeno právě touto vnitřní vodivostí. Pokud je vlastní vodivost

v celém rozsahu zatěžovací charakteristiky zdroje stále stejná (statická), bude pokles výstupního proudu se zatížením lineární.

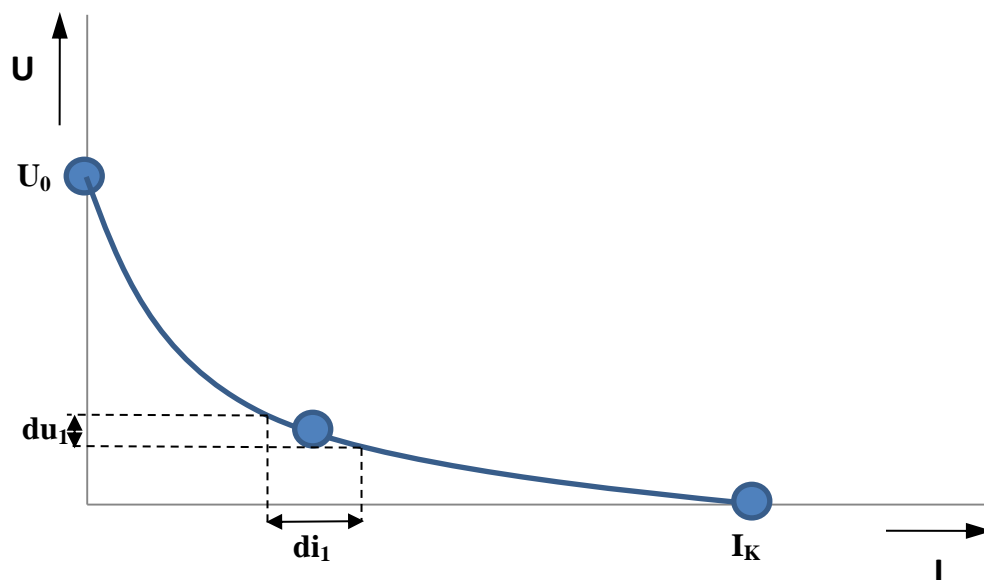


Obrázek 1.4: Zatěžovací charakteristika lineárního zdroje

Po této přímce (spojující body napětí naprázdno a proudu nakrátko) se pohybuje pracovní bod při změně zátěže. Z hodnot napětí naprázdno U_0 a napětí pracovního bodu U_1 lze získat vnitřní odpor (resp. vodivost):

$$R_I = \frac{1}{G_I} = \frac{U_0 - U_1}{I_1}. \quad (1.1)$$

Pokud zatěžující charakteristika má křivkový průběh (Obrázek 1.5), potom se pracuje s nelineárním zdrojem. Hodnota vnitřního odporu se mění, a proto je nutné ho spočítat pro každý pracovní bod.



Obrázek 1.5: Zatěžovací charakteristika nelineárního zdroje

Velikost dynamického vnitřního odporu lze zjistit ze vztahu:

$$r_I = \frac{1}{g_I} = \frac{du_1}{di_1}. \quad (1.2)$$

Za použití prvního Kirchhoffův zákonu při výpočtu náhradního schématu reálného zdroje proudu se ztrátovou vnitřní vodivostí G_I vychází vztah:

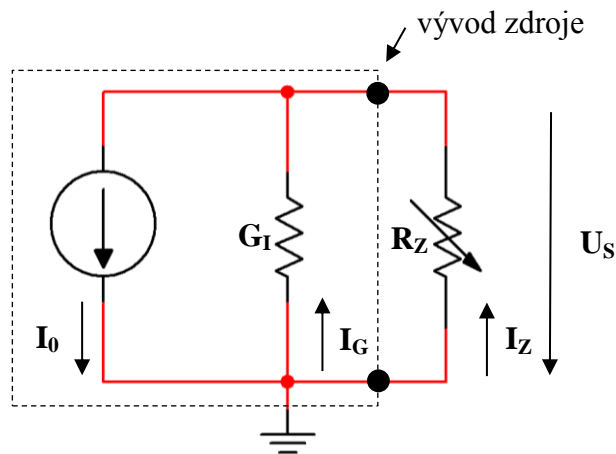
$$I_0 = I_G + I_Z, \quad (1.3)$$

kde:

I_0 je hodnota proudu ideálního proudového zdroje,

I_G je proud vtékající do vlastní vnitřní vodivosti G_I ,

I_Z je proud vytékající do vnějšího obvodu.



Obrázek 1.6: Zatěžování reálného zdroje proudu

Z Ohmova zákona vyplývá vztah pro svorkové napětí U_S , které závisí na hodnotě proudu zátěži I_Z a velikosti odporu zátěže R_Z :

$$U_S = R_Z + I_Z. \quad (1.4)$$

Protože svorkové napětí zdroje je shodné jako napětí na vnitřní vodivosti G_I , platí i zde podle Ohmova zákona:

$$I_G = U_S + G_I. \quad (1.5)$$

1.2.1 Parametry zdroje

Výstupní výkon

Celkový výkon zdroje P_{OUT} [W] je dán součtem výkonů jednotlivých větví zdroje. Tzn. součet násobků napětí a proudu v každé větvi.

Účinnost

Jedná se o poměr výstupního výkonu P_{OUT} a vstupního příkonu P_{IN} :

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \cdot 100 [\%]. \quad (1.6)$$

Jmenovitá hodnota proudu

Nebo-li výstupní stabilizovaná hodnota proudu zdroje. S pravidla nabývá hodnot několika μA až A. Podle způsobu nastavení tohoto proudu lze zdroje proudu rozdělit:

- zdroj konstantního proudu
- regulovatelný proudový zdroj
- zdroj s možností volit mezi několika stabilizovanými hodnotami

Odezva na změnu

Je doba, kdy se výstupní proud stabilizuje na jmenovitou hodnotu s definovanou přesností po změně zatížení zdroje.

Stabilita výstupního proudu

Vyjadřuje se v procentuální odchylce od jmenovité hodnoty. Stabilita proudu zdroje může být ovlivněna:

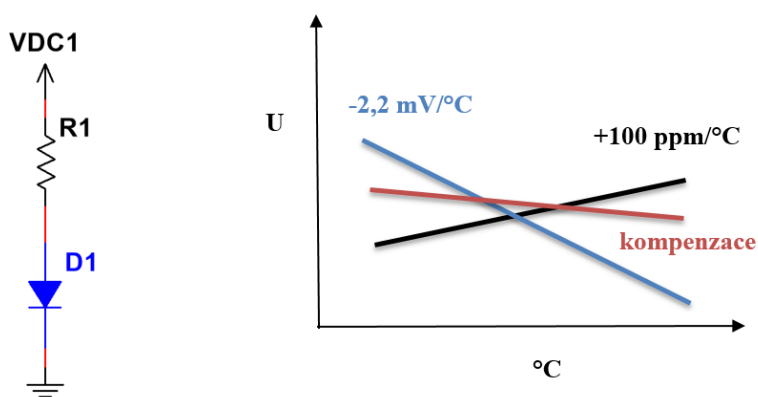
- teplotou okolí i součástek zdroje
- stárnutím součástek
- velikostí zátěže

Při chodu naprázdno (stand-by režim) je odchylka nejmenší, naopak při zatížení je odchylka vyšší.

Teplotní koeficient (TK)

Charakterizuje změnu výstupního proudu (napětí) se změnou teploty v provozním rozsahu zdroje. Udává se nejčastěji v ppm/K (1 ppm = 0,0001 %). Teplotní změnu výstupního proudu zdroje může způsobit okolní teplota. Také může být změna ovlivněna vyšším zatížením zdroje, což má za následek zvýšení ztrátových výkonů součástek.

Vysoké teplotní stability zdroje lze docílit kompenzací teplotního koeficientu při jeho návrhu. Na Obrázek 1.7: Kompenzace teplotního koeficientu obvodu je příklad takové kompenzace rezistoru R_1 (kladný TK) diodou D_1 se zápornou hodnotou TK.



Obrázek 1.7: Kompenzace teplotního koeficientu obvodu

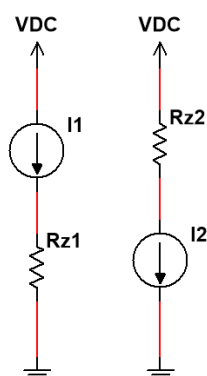
Vstupní napětový rozsah

Definuje minimální a maximální hodnotu vstupního napětí, kdy ještě měnič pracuje v provozních podmínkách podle katalogového listu daného výrobce. Při nižších hodnotách napětí dochází k proudovému přetížení jeho součástek. K napětovému poškození součástek dochází i při vyšších hodnotách vstupního napětí.

1.3 Rozdělení zdrojů proudu

Veškeré moderní zdroje proudu jsou založeny na tranzistorech. Zdroje proudu s bipolárními nebo unipolárními tranzistory a zpětnovazební zdroje s operačními zesilovači se výrazně liší svou parametrizací.

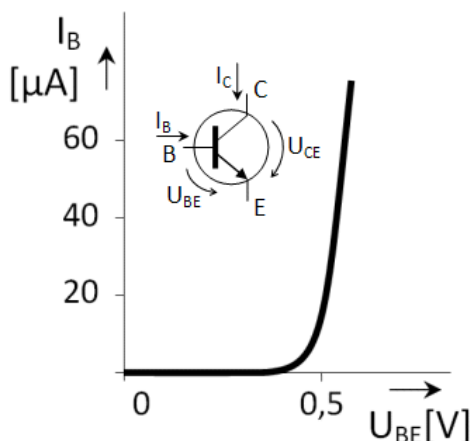
Podle typu zapojení zdroje a zátěže se navržený obvod dělí na zdroj (source) a nor (sink). Zdroj se nalézá mezi napájecím zdrojem napětí a zátěží, která je uzemněna. Pokud se jedná o nor, pak je zátěž spojena se zdrojem napětí.



Obrázek 1.8: a) source, b) sink

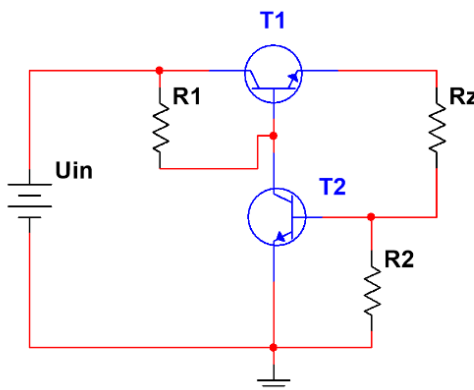
1.3.1 Zdroj proudu s diskretními součástkami

Zpětnovazební stabilizace výstupního proudu zdroje vychází z průběhu vstupní charakteristiky bipolárního tranzistoru, která je prakticky stejná jako u diody v propustném směru.



Obrázek 1.9: Vstupní charakteristika tranzistoru [3]

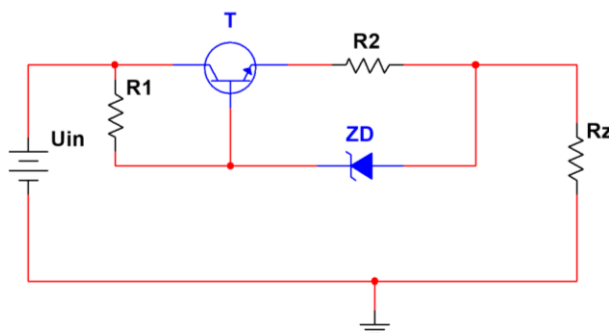
Úbytek napětí na rezistoru R_2 (Obrázek 1.10), který je roven napětí mezi bází a emitorem tranzistoru T_2 . Podle vstupní charakteristiky tranzistoru se při malé změně napětí dU_{BE2} výrazně změní hodnota proudu procházející bází o dI_{B2} .



Obrázek 1.10: Zpětnovazební stabilizátor proudu s tranzistory

S touto změnou se také značně mění hodnota proudu kolektorem tranzistoru T_2 , který se otevírá natolik, aby tranzistor T_1 propustil jen potřebnou hodnotu proudu I_Z .

Pokud bude proudové zesílení h_{21E2} tranzistoru T_2 vysoké (tzn. čím bude mít plošší vstupní charakteristiku) a vysoké vstupní napětí U_{IN} , potom může hodnota zatěžujícího odporu R_Z dosahovat vysokých hodnot.



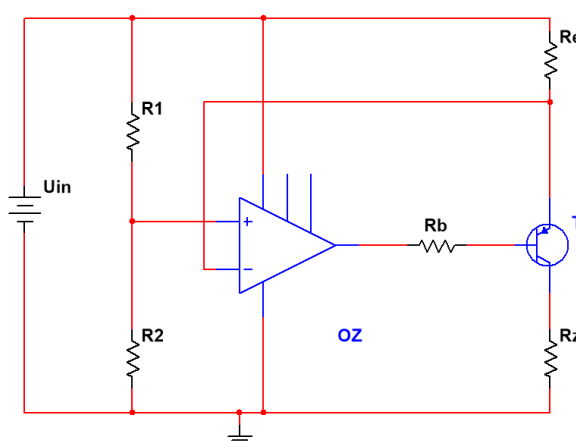
Obrázek 1.11: Zdroj proudu se Zenerovou diodou

Další zpětnovazební zdroj proudu (Obrázek 1.11) využívá skutečnosti, že pokud je udržován konstantní úbytek napětí na rezistoru, pak je konstantní i proud jím procházející. Stabilizace napětí je zde definována Zenerovou diodou. Vzhledem k průběhu vstupní charakteristiky (Obrázek 1.9) lze předpokládat, že pro různé hodnoty proudu I_B bude napětí tranzistoru U_{BE} přibližně konstantní. Z výše uvedeného předpokladu vyplývá:

$$I_Z = \frac{U_{ZD} - U_{BE}}{R_2} = konst. \quad (1.7)$$

Lepšího výsledku je však dosaženo použitím referenčního napěťového obvodu na místě stabilizátoru, kde NRO napájí vnitřní stabilizátor zdroje proudu.

Zlepšení parametrů zdrojů proudu z diskretních součástek lze dosáhnout i operačním zesilovačem. Použitím OZ je dosaženo jak zvýšeného zesílení zpětnovazební smyčky, tak odstranění vlivu napětí U_{BE} tranzistorů.



Obrázek 1.12: Zdroj proudu s OZ

Zde je využito porovnávání úbytku napětí, který vzniká průchodem jmenovitého proudu zdroje emitorovým odporem R_E s referenčním napětím, které je v tomto případě

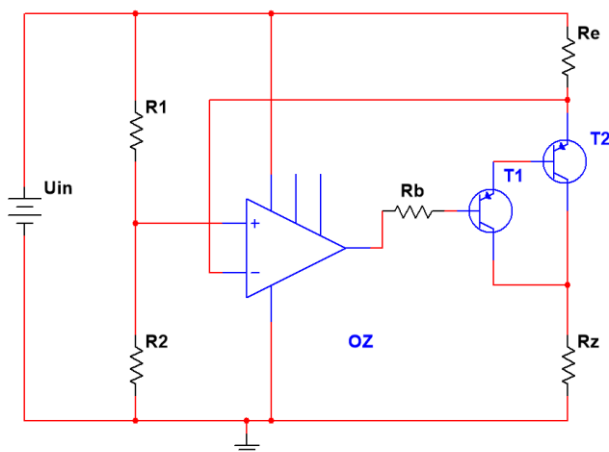
tvořeno děličem napětím s rezistorem R_1 a R_2 . Pro lepší vlastnost zdroje se spíše používají napěťové reference s nízkým teplotním koeficientem TK.

Pokud je úbytek napětí (invertující vstup OZ) na zatěžovacím odporu R_Z menší nežli referenční napětí (neinvertující vstup OZ), dochází k nastavení výstupu OZ do kladné saturace. Tento stav způsobí průtok proudu do báze tranzistoru T o velikosti:

$$I_B = \frac{U_{IN} - U_{CESOZ} - U_{BE} - U_{RE}}{R_B}, \quad (1.8)$$

kde U_{CES} je saturační napětí horního tranzistoru koncového stupně OZ.

Tento tekoucí proud do báze tranzistor T otevírá natolik, že zatěžovacím odporem protéká požadovaná hodnota proudu. Až tento proud vyvolá na emitorovém odporu úbytek napětí, který je roven právě referenčnímu napětí, pak OZ přechází z kladné saturace do pracovního bodu, kdy dochází k ustálení parametrů.



Obrázek 1.13: Zmenšení vlivu proudu báze

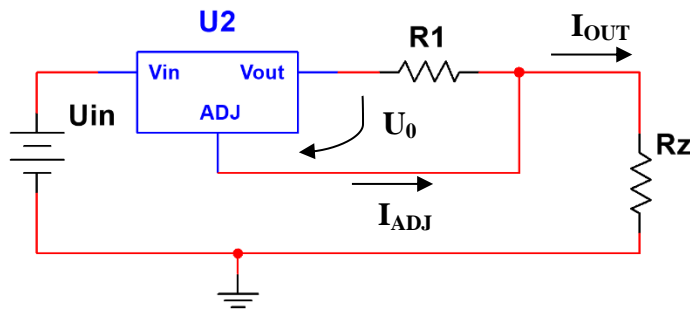
Pro nedostatečný proudový zesilovací činitel h_{21E} tranzistoru T v zapojení podle Obrázek 1.12 je možné použít dva tranzistory v Darlingtonově zapojení (viz Obrázek 1.13). Další variantou náhrady namísto jednoho bipolárního tranzistoru se nabízí tranzistor MOSFET nebo smíšené zapojení (více v [1] na s. 48). Toto zapojení maximálně eliminuje vliv řídicího proudu z OZ a také je proudově posílněn výstup zdroje.

1.3.2 Integrovaný zdroj proudu

Pro většinu případů má zdroj s OZ dostatečné parametry, ale jejich návrh je často složitý. Proto dochází k integraci celých proudových zdrojů do jednoho pouzdra. Mezi nejdokonalejší integrované zdroje patří např. LM134, LM234 nebo LM334 od společnosti LINEAR TECHNOLOGY. Jedná se o třísvorkový čip, takže konstrukční zapojení a nastavení parametrů zdroje není složité. Z katalogového listu výrobce lze vyčíst použitelný rozsah proudu v rozmezí 1 [μA] až 100 [mA], pokud je zdroj napájen napětím alespoň cca 0,8 [V] až 1,2 [V]. Maximální hodnota napětí může však dosáhnout až na 40 [V].

1.3.3 Zdroj proudu se stabilizátory napětí

U tohoto zdroje se převádí problém se stabilizací proudu na stabilizaci napětí na rezistoru, kterým proud protéká. Pro optimální případy stabilizaci napětí zajišťuje třísvorkový integrovaný stabilizátor napětí. Aby bylo dosaženo kvalitních parametrů zdroje, je nutné použít odpor obdobné kvality (teplotní stabilita, přesnost) jako stabilizátor napětí.



Obrázek 1.14: Zdroj proudu se stabilizátorem napětí

Pro hodnotu výstupního proudu platí vztah:

$$I_{OUT} = \frac{U_0}{R_1} + I_{ADJ}, \quad (1.9)$$

kde:

U_0 je hodnota výstupního napětí stabilizátoru,

I_{ADJ} je proud vlastní spotřeby stabilizátoru napětí,

R_1 je přesný nastavovací odpor.

Při konstrukci není vhodné užít libovolný stabilizátor napětí, jeho volbu lze shrnout:

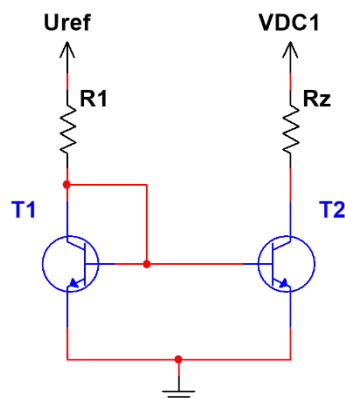
- výstupní napětí U_o dosahuje co nejmenších hodnot, jelikož vznikají výkonové ztráty na odporu R_I a snižuje se tedy účinnost celého zdroje.
- hodnota proudu I_{ADJ} je minimální, přesněji zanedbatelná proti hodnotě proudu I_{OUT} .
- minimální velikost vstupního napětí U_{IN} je taková, aby u lineárních stabilizátorů napětí jeho vnitřní sériový regulační tranzistor pracoval v lineární oblasti výstupních charakteristik. Tzn. rozdíl mezi U_{OUT} a U_{IN} (viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) je minimálně 2 až 3 [V].

1.3.4 Proudové zrcadlo

Použití proudového zrcadla a zdroje proudu jako zátěže pro tranzistory, které zesilují užitečný signál, přináší ohromné výhody [4]:

- zesilovače zesilují nezávisle na velikosti napájecího napětí
- zesilovače mohou zesilovat velké signály bez zkreslení
- rozkmit signálů může být téměř přes celý rozsah napájení
- obvod se obejde bez rezistorů, které zabírají velkou plochu na čipu

Proud protékající jedním tranzistorem, který je určen napětím U_{REF} a rezistorem R_I , je „zrcadlen“ do druhého tranzistoru. Prvně realizovaný typ proudového zrcadla je v bipolární technologii a podle autora návrhu na Obrázek 1.15 se nazývá Widlarovo proudové zrcadlo.



Obrázek 1.15: Proudové zrcadlo

Tranzistor T_I je v diodovém zapojení a protéká jím referenční proud, pro jehož velikost platí:

$$I_{REF} = \frac{U_{REF} - U_{BE}}{R_1}. \quad (1.10)$$

Pro tento proud dále platí:

$$I_{REF} = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = I_{B1} \cdot (1 + h_{21E}) + I_{B2}, \quad (1.11)$$

kde:

h_{21E} je proudový zesilovací činitel.

Pokud parametry obou tranzistorů jsou shodné, ale velikosti ploch emitorů A_{E1} a A_{E2} jsou odlišné, potom pro jednotlivé proudy do báze jsou určeny následující vztahy:

$$I_{B1} = I_B \cdot A_{E1}, \quad (1.12)$$

$$I_{B2} = I_B \cdot A_{E2}. \quad (1.13)$$

A referenční proud je pak dán:

$$I_{REF} = \frac{I_0}{A_{E2} \cdot h_{21E}} \cdot (A_{E2} + A_{E1} + A_{E1} \cdot h_{21E}). \quad (1.14)$$

1.4 Zdroj proudu s induktivní zátěží

1.4.1 Cívka (induktor)

Induktor je obvodový prvek, který v sobě v určitém okamžiku akumuluje nahromaděnou elektrickou energii a v jiném okamžiku je schopen tuto energii ze sebe vydat.

Charakteristickou vlastností cívky je **vlastní indukčnost** L . Tekoucí proud cívku budí magnetický tok ϕ , který je úměrný hodnotě proudu a vlastní indukčnosti cívky.

$$\Phi = L \cdot I \quad (1.15)$$

Vlastní indukčnost je závislá na:

- rozměrech cívky
- počtu závitů N
- vlastnostech magnetického jádra cívky

Základní jednotkou indukčnosti je jeden henry [H]. V soustavě SI lze psát:

$$1 \text{ H} = \text{V} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}. \quad (1.16)$$

Velikost indukovaného napětí na svorkách cívky je:

$$u = L \cdot \frac{di}{dt}. \quad (1.17)$$

1.4.2 Přechodový jev

Akumulovaná energie v cívce

V okamžiku, kdy do cívky začne pronikat proud, generuje cívka proud opačného směru a součet proudů je proto nulový. Po určitém časovém intervalu τ při konstantním vstupním proudu dojde k tomu, že cívka neklade již žádný odpor a tedy cívku prochází jmenovitá hodnota zdroje proudu. Během doby τ dochází k nabití cívky jmenovitým proudem. Pokud se odpojí zdroj proudu a obvod cívky bude nadále uzavřen, cívka nahromaděnou energii dodává ve formě proudu do připojené zátěže až do okamžiku vybití cívky.

Energie W magnetického pole cívky je dána podle vztahu:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \Phi \cdot U_m, \quad (1.18)$$

kde:

Φ je hodnota magnetického toku procházející jádrem cívky,

U_m je magnetické napětí cívky

Protože magnetické napětí určíme vztahem:

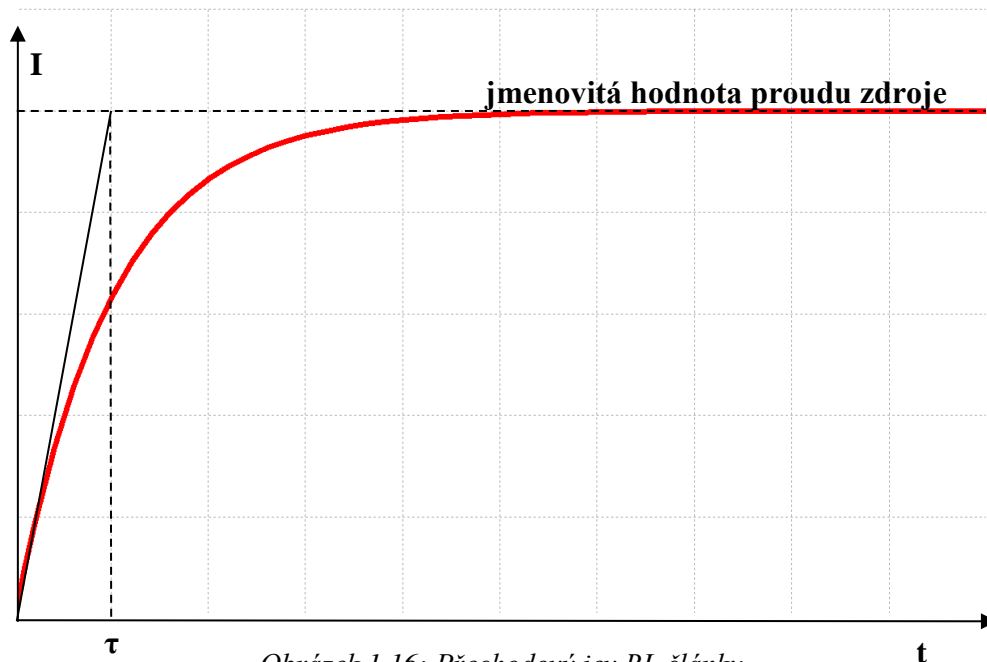
$$U_m = N \cdot I. \quad (1.19)$$

a platí vztah 1.15, lze pro energii W dostat nový vztah:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2. \quad (1.20)$$

Jelikož doba nabití cívky je závislá na velikosti indukčnosti L a celkové sériové velikosti odporu R , pak je určena **časová konstanta τ** :

$$\tau = \frac{L}{R}. \quad (1.21)$$



Obrázek 1.16: Přechodový jev RL článku

Pokud je cívka nabita, cívkou teče ustálený proud. V okamžiku odpojení cívky od zdroje proudu se v rovnici 1.17 časová změna proudu blíží k nule, napětí na svorkách induktoru proto dosahuje nekonečně velké hodnoty. Ale ve skutečnosti je tato hodnota limitována vybitím cívky, aby nedocázelo ke zničení elektronických obvodů.

Okamžitá hodnota proudu v průběhu podle obrázku 1.16 je vyjádřena rovnicí:

$$i(t) = I \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (1.22)$$

kde:

I je jmenovitá hodnota proudového zdroje,

τ časová konstanta RL článku určena rovnicí 1.21.

2 Elektromagnetický průtokoměr

V praxi jsou měřeny průtoky tekutin v potrubí různými druhy senzorů. Sensory se podle základního rozdělení třídí na senzory s přímou a nepřímou metodou měření. Pokud je popisován elektromagnetický průtokoměr, pak se jedná o senzor objemového průtoku s nepřímou metodou měření, kdy pro objemový průtok platí vztah:

$$Q_V = v_s \cdot S, \quad (2.1)$$

kde:

Q_V je velikost objemového průtoku,

v_s je střední rychlost proudění kapaliny,

S je plocha průřezu v měřené části potrubí

Výhodou takového průtokoměru je, že v oblasti měření průtoku nevzniká žádná tlaková ztráta a je vhodný pro měření problémových kapalin (kaly, žíraviny apod.).

2.1 Popis principu

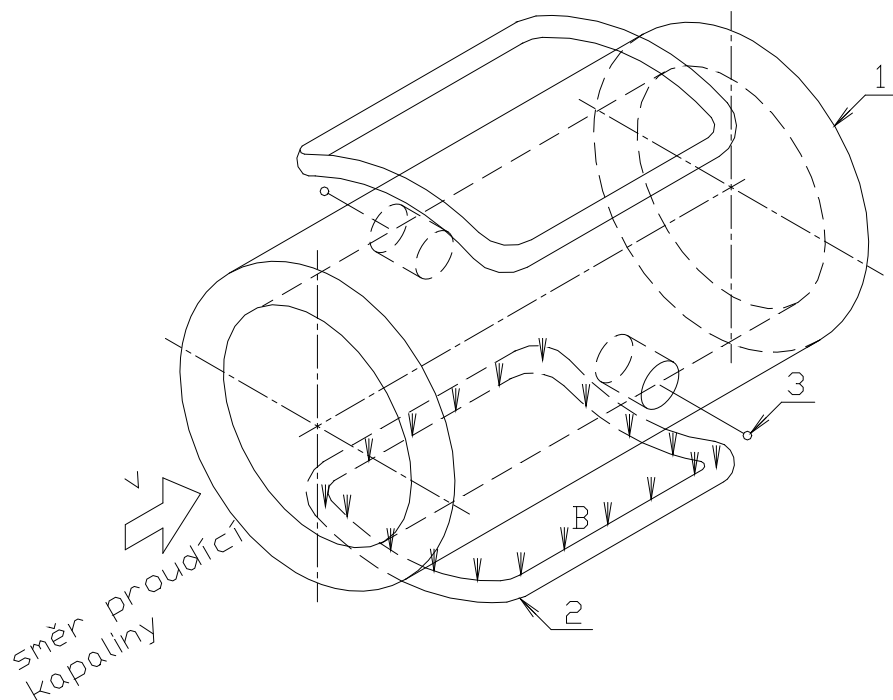
Literatura zabývající se problematikou elektromagnetického průtokoměru popisuje jeho princip pomocí Faradayova indukčního zákona, kdy při proudící kapalině (jejíž průtok je měřen) v časově proměnném magnetickém poli je vysvětlen vznik elektrického napětí U na elektrodách průtokoměru.

Elektromagnetický průtokoměr je dvojího typu:

- elektromagnetický průtokoměr s kontaktními elektrodami
- elektromagnetický průtokoměr s kapacitními elektrodami (EMFC)

2.1.1 Elektromagnetický průtokoměr s kontaktními elektrodami

Měřicí čidlo průtokoměru (viz Obrázek 2.1) je tvořeno z izolační a nemagnetické trubice z keramického materiálu na bázi korundu, dvojicí budících cívek pro vybuzení silného magnetického pole o indukci B a dvojicí elektrod. Elektrody z nemagnetického materiálu jsou umístěny tak, že jejich osa je kolmá k ose budících cívek a směru protékající kapaliny, se kterou mají elektrický kontakt.



Obrázek 2.1: Měřicí čidlo průtokoměru [6]

1 – izolační nemagnetická trubice

2 – dvojice budících cívek

3 – snímací elektrody

Pro popis vzniku elektrického napětí U na měřicích elektrodách je namísto Faradayova zákona vhodnější využít Lorenzova zákona. Tento zákon popisuje sílu \vec{F} , kterou působí elektromagnetické pole o intenzitě elektrického pole \vec{E} a o magnetické indukci \vec{B} na pohybující se náboj q .

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.2)$$

Náboj q pohybující se rychlostí \vec{v} představuje právě měřenou kapalinu, která musí být elektricky vodivá!

Pokud je náboj pohybující se pouze v elektrickém poli, vztah (2.2) se upraví na tvar:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}. \quad (2.3)$$

Podobně pro náboj v magnetickém poli s indukcí \vec{B} :

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}). \quad (2.4)$$

Jestliže pro stejný náboj q je rovna síla elektrického homogenního pole síle homogenního magnetického pole, tj. pokud se náboj nachází v rovnovážném stavu, pak lze dojít ke vztahu:

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B}. \quad (2.5)$$

Pokud se provede integrace (2.5) po přímce, která tvoří spojnici obou elektrod:

$$\int_l \vec{E} d\vec{l} = \int_l (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{l}, \quad (2.6)$$

vzniká vztah pro rozdíl potenciálů¹ na elektrodách, který je vyvolán vychýlením nábojů Lorentzovou silou:

$$U = E \cdot D = v \cdot B \cdot D, \quad (2.7)$$

kde:

- U je indukované napětí,
- v střední rychlost pohybu měřené kapaliny,
- B velikost magnetická indukce,
- E velikost intenzity elektrického pole,
- D délka spojnice (vzdálenost elektrod).

Rovnice (2.7) je platná pouze tehdy, pokud osa elektrod je kolmá k rovině vektorů magnetické indukce \vec{B} a rychlosti \vec{v} . To znamená, že se nezohledňuje zakřivení siločar pole vyvolané budícími cívkami, rychlostní profil měřeného média atp. Vlivem této skutečnosti je zaveden citlivostní koeficient, který je popsán poměrem reálného napětí a teoretického odhadu:

$$S = \frac{U_{REAL}}{U}, \quad (2.8)$$

kde:

- U_{REAL} je skutečné napětí na elektrodách,
- U teoretické napětí dané vztahem (2.7).

V praxi citlivostní koeficient dosahuje maximálně hodnot $S = 0,2$ [8].

¹ Velikost napětí U zohledňuje pouze pohybové napětí (u_p) vyvolané pohybem smyčky v časově stálém magnetickém poli.

2.1.2 Elektromagnetický průtokoměr s kapacitními elektrodami

Princip funkce elektromagnetického průtokoměru s kapacitními elektrodami se neliší od funkce elektromagnetického průtokoměru s kontaktními elektrodami. Rozdíl je v umístění měřicích elektrod, které jsou umístěny vně průtokoměrné trubice. Elektrodou je kondenzátor, jehož jedna elektroda je tvořena vnitřní stranou izolované měřicí trubice a druhá je vnější plochá elektroda. Pokud má být napětí naměřené mezi kapacitními elektrodami stejné jako u kontaktních elektrod, musí být u vyhodnocovacího předzesilovače velký vstupní odpor a platit:

$$R_{buffer} \cdot C \gg \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (2.9)$$

kde:

R_{buffer} vstupní odpor předzesilovače,

C kapacita elektrod,

f frekvence budicího signálu.

Jelikož vlivem nízkých kapacit elektrod (\approx desítky pF [8]) při srovnatelných frekvencích budicího signálu jako průtokoměru s kontaktními elektrodami mají kapacitní elektrody velmi vysokou impedanci.

2.1.3 Průběhy budicích signálů magnetického pole

Stojnosměrné buzení magnetického pole v indukčním průtokoměru s kapacitními elektrodami není možné vlivem galvanického oddělení elektrod s měřenou kapalinou.

Pokud se buzení provádí střídavým signálem, dochází k potlačení napětí u_{CH} způsobené elektrochemickými vlivy. Toto napětí se přičítá ke vztahu (2.6), takže naměřené napětí na elektrodách je:

$$u = \int_l (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{l} + u_{CH}. \quad (2.10)$$

Velikost parazitního napětí u_{CH} značně převyšuje užitečnou složku napětí na elektrodách. Střídavým buzením je možné kromě potlačení elektrochemických vlivů i schopnost odstranit vlivy stojnosměrného rušení.

Nevýhodou je skutečnost, že dochází k rozšíření o transformační složku u_T . Tato složka napětí je vyvolána časovou změnou magnetického toku Φ :

$$u_T = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}. \quad (2.11)$$

Celkové výstupní napětí na elektrodách průtokoměru je dáno rovnicí:

$$u = u_p + u_{CH} + u_T = \int_l (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{l} + u_{CH} - \frac{\partial \phi}{\partial t}. \quad (2.12)$$

Tvar střídavého signálu budící magnetické pole průtokoměru může mít tvar:

- harmonický
- obdélníkový
- lichoběžníkový
- pulzní

Pokud je použit k buzení **obdélníkový průběh**, pak vliv vířivých proudů a transformační složka napětí se uplatní pouze při změně polarity budícího proudu. Je možné i po kratší dobu budit cívky vyšším proudem, který dosahuje takových hodnot, že není překročena jejich povolená výkonová ztráta.

Při změně polarity buzení vznikají tlumené zákmity napětí na cívkách, frekvence tohoto napětí je dána indukčností a parazitní kapacitou budících cívek.

Frekvence signálu je celočíselným podílem 50 Hz, což je frekvence parazitního indukovaného signálu z napájecí sítě. Nejčastěji se volí frekvence 6,25 Hz až 12,5 Hz. Rušení je eliminováno odečtením hodnot při obou polaritách buzení.

Hodnota proudu je od 100 mA do několika jednotek ampér a výkonová ztráta proudu dosahuje od jednotek wattů do desítek wattů.

3 Návrh zdroje pro budicí cívku indukčního průtokoměru

3.1 Zdroj proudu

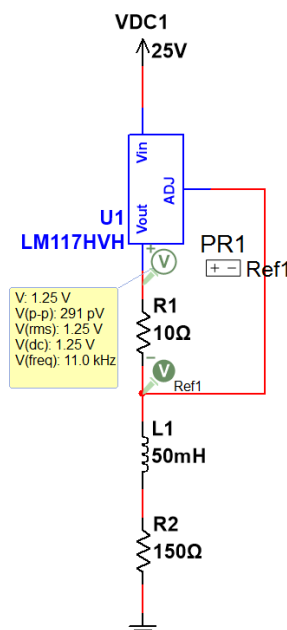
V této kapitole je rozebrán průběh simulace a návrhu zdroje proudu. Simulace probíhá v programu NI Multisim 14.0 a LTSpice IV. Cílem návrhu je zdroj s vysokou účinností a přesností jmenovitého proudu do 0,3 %. Zatěžujícím prvkem tohoto zdroje je cívka, která v indukčním průtokoměru vyvolává magnetický tok.

Parametry cívky jsou následující:

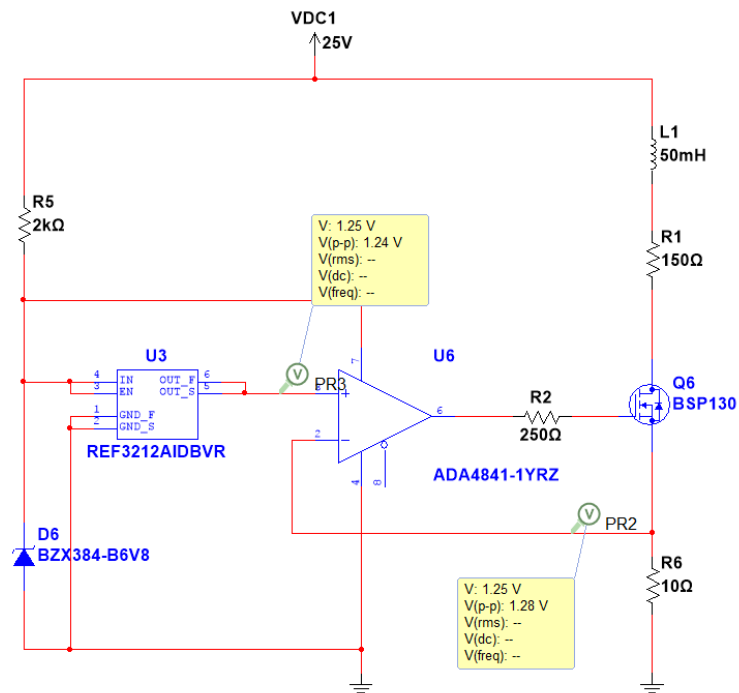
- vlastní indukčnost $L = (5-50)$ mH
- odpor $R = (100-150)$ Ω

Prvním navrženým zdrojem je zdroj proudu s integrovaným napěťovým stabilizátorem LM117 (1.3.3 Zdroj proudu se stabilizátory napětí). Zapojení (Obrázek 3.1) je navrženo pro jmenovitou hodnotu $I_N = 125$ mA, která je určena vztahem (1.9) a její hodnota v časové analýze nepřesáhla povolenou toleranci.

Dalším možným návrhem je proudový zdroj s operačním zesilovačem a unipolárním tranzistorem (Obrázek 3.2). Časovou analýzou je zjištěna dostatečná přesnost i tohoto zapojení.

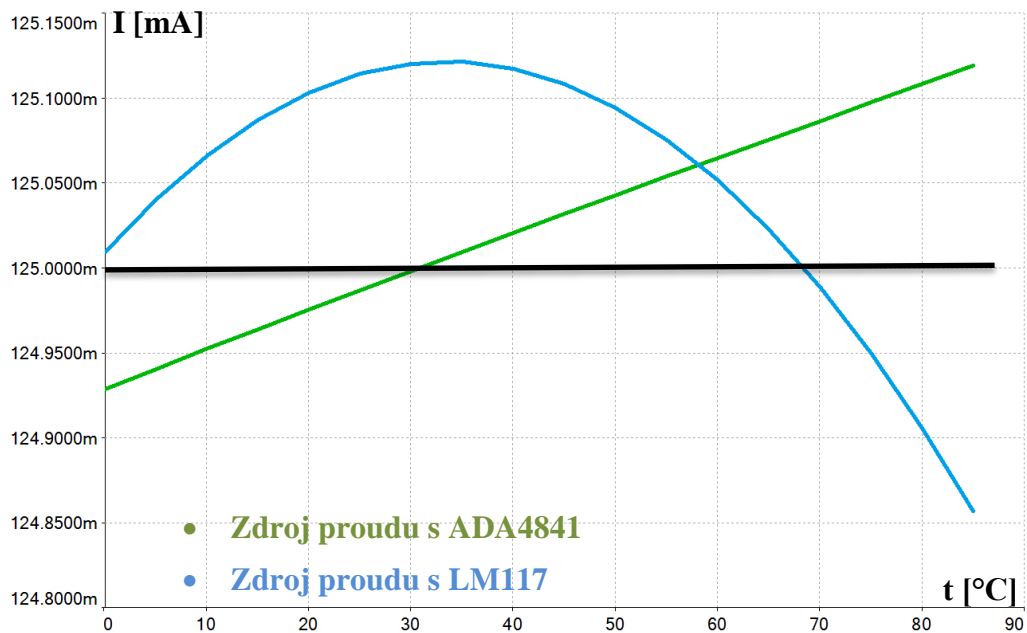


Obrázek 3.1: Zdroj proudu s napěťovým regulátorem LM117

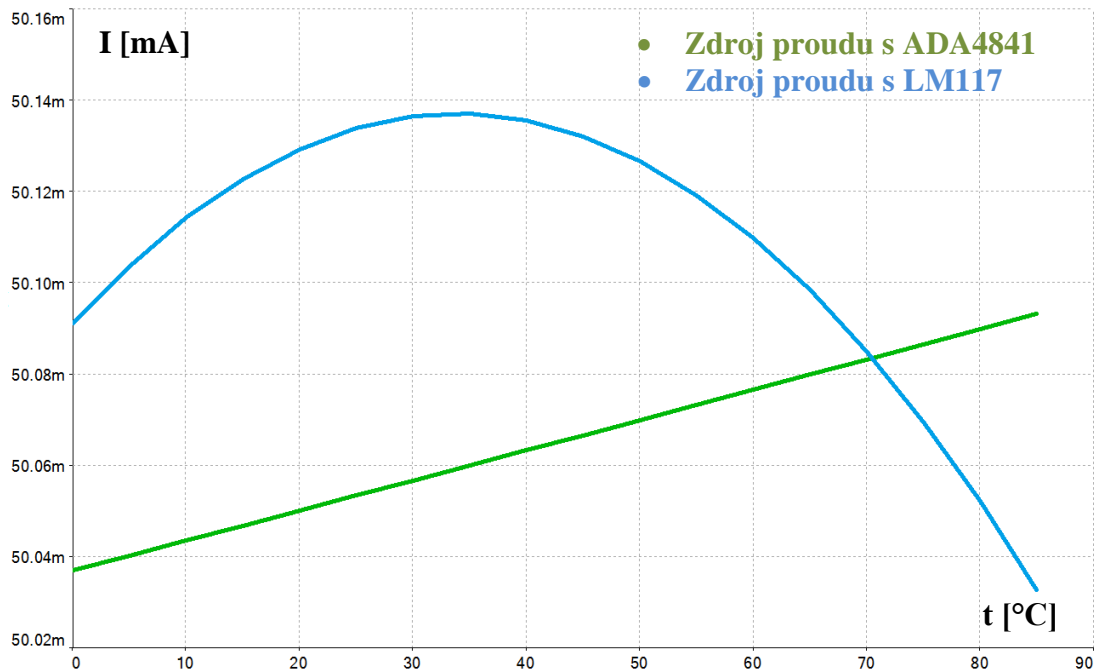


Obrázek 3.2: Zdroj proudu s OZ

Níže jsou provedeny teplotní analýzy navržených obvodů. Na analyzovaném teplotním rozsahu 0 °C až 85 °C dvojice návrhu vyhovuje požadované přesnosti. Parametrický odpor (R1 na Obrázek 3.1 a R6 na Obrázek 3.2) zdrojů má teplotní koeficient $TK = 5 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$.



Graf 3.1: Teplotní analýza návrhů pro jmenovitý proud 125 mA



Graf 3.2: Teplotní analýza pro jmenovitý proud 50 mA

3.2 Průběh budicího proudu

K buzení magnetického pole cívky průtokoměru je zvolen obdélníkový průběh proudu (viz. 2.1.3 Průběhy budicích signálů magnetického pole). K vytvoření takového průběhu je docíleno tzv. H můstkem.

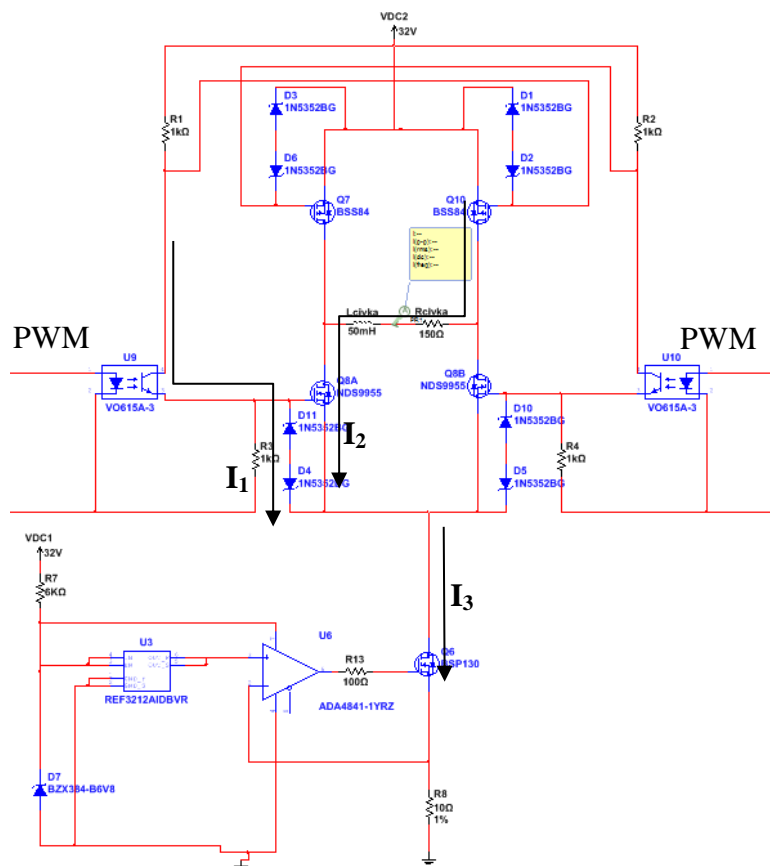
3.2.1 H můstek

Jedná se o zapojení čtyř spínaných prvků do „tvaru“ písmene H. Spínaným prvkem je buďto bipolární či unipolární tranzistor. Podle toho, která dvojice tranzistorů je otevřena (resp. zavřena), mění se polarita napětí na svorkách buzené cívky i směr proudu touto cívkou. Můstek se převážně používá k řízení stejnosměrných motorů, kde se nepoužívají zdroje proudu.

Při návrhu H můstku pro buzení magnetického pole indukčního průtokoměru je důležité dbát, aby nedocházelo k úbytkům jmenovitého proudu vstupující do cívky.

3.2.2 Realizace budicího obvodu

První návrh H můstku je na obrázku 3.3. Vstupní logika PWM signálu je elektricky oddělena od můstku pomocí optonů.

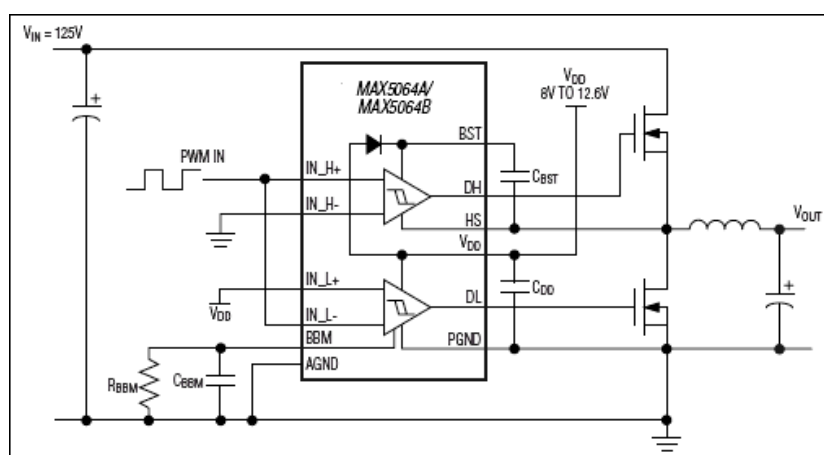


Obrázek 3.3: První realizace budicího obvodu

Zenerovy diody omezují napětí mezi vývody source-gate unipolárního tranzistoru pod hodnotu² $U_{GS} = \pm 20 \text{ V}$ a vlivem tohoto omezení nedochází k jejich poškození. Nepoužitelnost zapojení spočívá ve dvojici antisériově zapojených párů ochranných diod, která je spojena se zdrojem proudu. Důsledek je takový, že cívkou neprochází proud s definovanou hodnotou. Hodnota proudu I_3 dána proudovým zdrojem je totiž součtem proudu I_2 procházející cívkou a proudem I_1 procházející touto dvojicí diod.

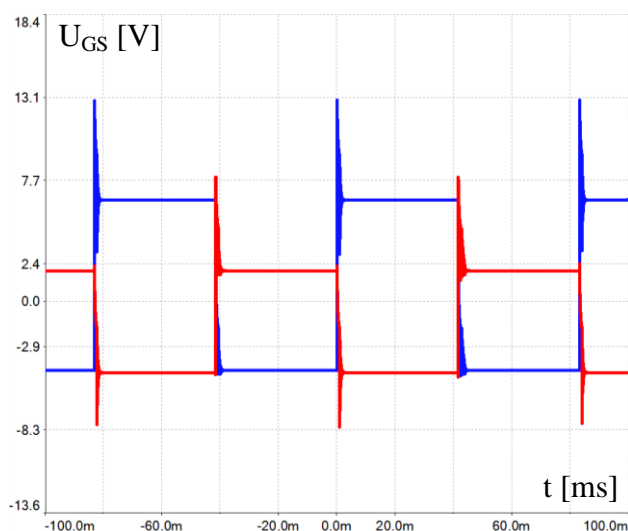
² Katalogová hodnota dovoleného napětí může být i menší.

K řízení můstků jsou používány i tzv. drivery. Na obrázku 3.4 je blokové uspořádání driveru MAX5064. Tyto integrované obvody omezují stav, kdy nastává k otevření obou MOSFETů jednoho polomůstku. Protože tranzistorové budiče velmi rychle nabíjí a vybíjí kapacity na gatech MOSFETů, používají se především k vysokofrekvenčním aplikacím. Jak je uvedeno v kapitole 2.1.3 Průběhy budičích signálů magnetického pole, budič signál má nízkou frekvenci. Vlivem této skutečnosti a požadavku na nízkonákladovou realizaci celého zapojení nebyl driver použit.



Obrázek 3.4: Blokové uspořádání driveru H můstku MAX5064

Aby nedošlo k destrukci tranzistorů způsobenou překročením povolené hodnoty napětí U_{GS} , je snížena hodnota výkonového napětí můstku z 32 V na 25 V. Při této hodnotě napětí je provedena analýza (viz graf 3.3) napětí U_{GS} tranzistorů, pokud jsou odebrány ochranné diody.

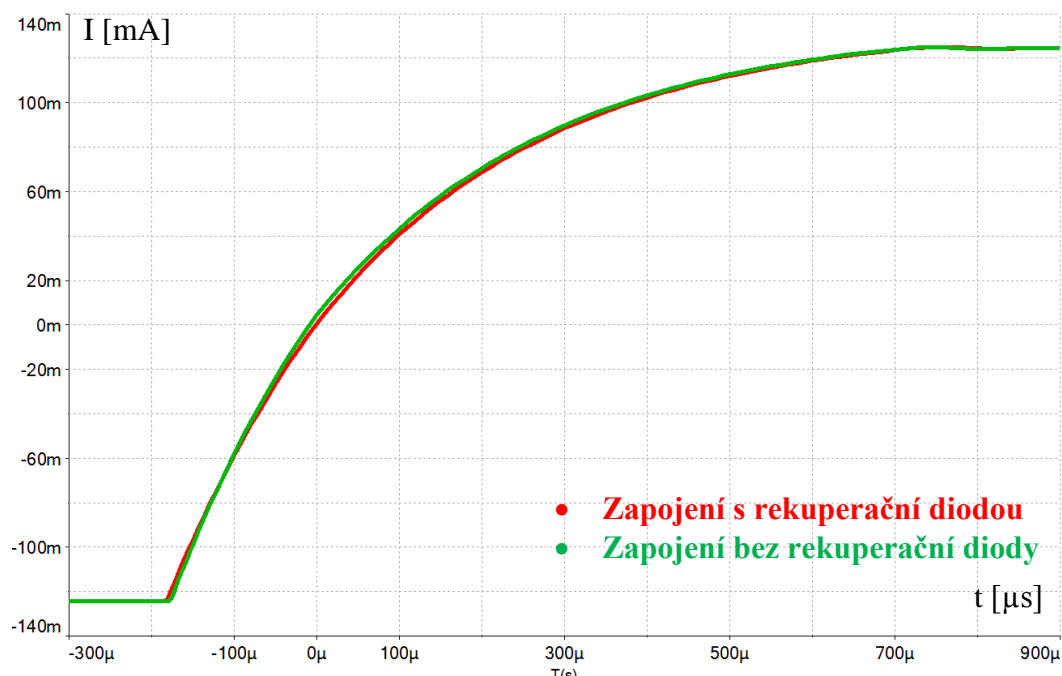


Graf 3.3: Napětí U_{GS} tranzistorů bez ochranných diod

Snížené výkonové napětí způsobí, že se přeběh proudu z jedné polarity na druhou prodlouží. Je předpokládáno zrychlení tohoto přeběhu vlivem samovolného vybití naakumulované energie cívky. Proto je provedena analýza vybití během 50 μs (příloha B) po změně i před změnou polarity proudu procházející cívku. Vybití je provedeno třemi způsoby:

- otevřením horních a uzavřením dolních tranzistorů
- uzavřením horních a otevřením dolních tranzistorů
- otevřením všech tranzistorů

Z provedených analýz vyplývá, že tento předpoklad je špatný. Následně je provedena zkouška zrychlení pomocí rekuperační diody. Použitím rekuperační diody však dochází k malému zpoždění.

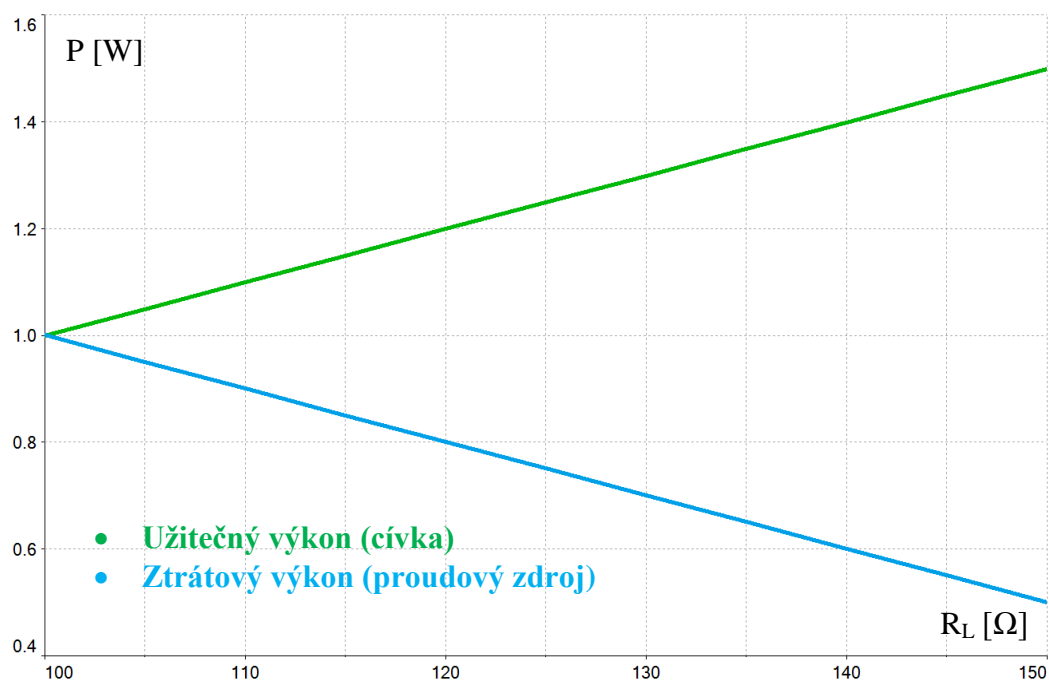


Graf 3.4: Vliv rekuperační diody

Po konzultaci s vedoucím práce je hodnota proudu stanovena na maximálních 100 mA, jelikož se snižuje napájecí napětí H můstku na 20V. Touto hodnotou se zajistí, že nedojde k překročení absolutní hodnoty U_{GS} .

3.3 Zdroj proudu s vysokou účinností

Na grafu 3.5 je zobrazena výkonová ztráta základních zapojení proudových zdrojů (viz obázek 1.13 a obrázek 1.14) s dodaným výkonem na cívce jako závislost změny odporu zátěžovací cívky. Analýza je provedena pro jmenovitou hodnotu proudu 100 mA při napájení napětím 20 V.



Graf 3.5: Výkony v zapojení zdroje proudu s ADA4841 a LM117

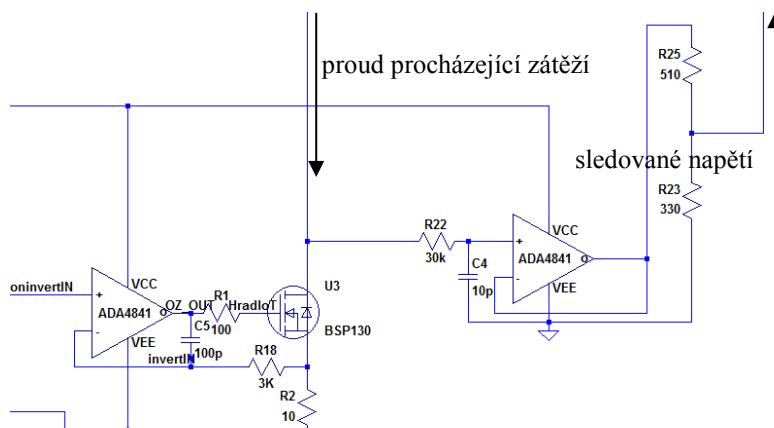
3.3.1 Zdroj proudu se spínaným zdrojem napětí

Jako konečný zdroj proudu je vybráno zapojení s unipolárním tranzistorem a operačním zesilovačem ADA4841, účinnost celého zapojení je realizováno konstantní výkonovou ztrátou na unipolárním tranzistoru při různé hodnotě odporu zatěžující cívky.

Změna výkonové ztráty na tranzistoru je kompenzována sníženou či zvýšenou hodnotou výkonového napětí. Tato změna napětí je řízena referenčním napětím na výstupu VSENSE spínaného zdroje napětí (viz obrázek 3.5).

Obrázek 3.5: Spínaný zdroj napětí

Pokud je sledované napětí menší (větší) než hodnota 0,8 V, potom se výstupní napětí spínaného zdroje zvyšuje (snižuje) do té doby, dokud není sledované napětí stabilizováno právě na hodnotu 0,8 V. Napětí nad tranzistorem je sledováno pomocí sledovače napětí, tímto způsobem je zajištěno, že nedochází k úbytku jmenovitého proudu. Udržovaná hodnota napětí na tranzistoru je zvolena na 1 V. S referenčním napětím proudového zdroje to dělá přibližně 2 V. Rozdíl mezi udržovanou hodnotou (2V) a referenční hodnotou (0,8 V) je vyřešen pomocí děliče napětí.



Obrázek 3.6: Sledovač napětí

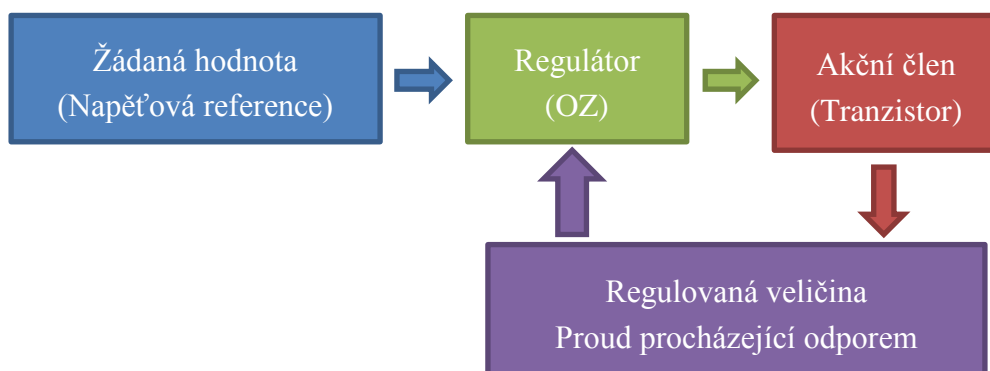
Maximální frekvence spínání tohoto napěťového zdroje je 2 MHz, je zvolena menší a odporem R_T určená spínací frekvence na 1 MHz.

$$R_T = \frac{206033}{f_{sw}^{1,0888}} = 110K\Omega \quad (3.1)$$

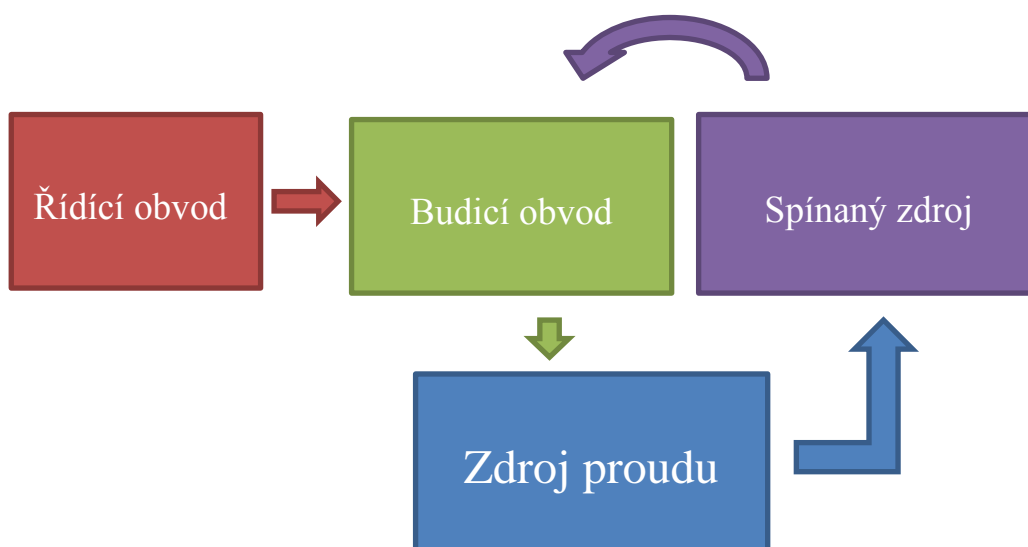
Celá stabilita proudu spočívá na rychlostech dvou regulačních zpětnovazebních smyček.

První zpětnovazební smyčkou je zdroj proudu (viz obrázek 3.7) a druhou zpětnovazební smyčku tvoří spínaný zdroj napětí, zdroj proudu a budicí obvod.

Pomocí simulací a měření je zjištěno, že vnitřní regulační smyčka (zdroj proudu) musí být rychlejší než vnější regulační smyčka.

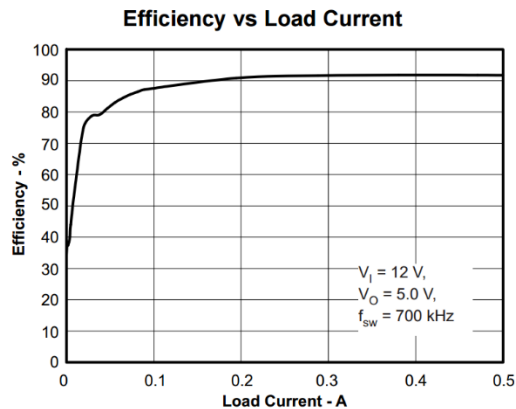


Obrázek 3.7: Blokové schéma vnitřní regulační smyčky



Obrázek 3.8: Blokové schéma vnější regulační smyčky

3.3.2 Výsledná účinnost proudového zdroje



Graf 3.6: Účinnost spínaného zdroje [10]

Z grafu 3.7 je zjištěno, že při odběru 100 mA je účinnost zdroje 87 %. Pokud je v obvodu stejný proud (100 mA), vztah (1.6) se upraví:

$$\eta = \frac{U_z}{U_z + U} \cdot 100, \quad (3.2)$$

kde:

U_z napětí na zátěži,

U udržované napětí na tranzistoru a referenčním odporu (2 V).

Pomocí vztahu (3.2) je zjištěna ztráta:

$$\eta_z = 100 - \eta, \quad (3.3)$$

kde:

η hodnota účinnosti ze vztahu (3.2).

Následně odečtením ztráty ze vztahu (3.2) od účinnosti zdroje (87 %) je účinnost proudového zdroje se spínaným zdrojem napětí následující:

- pro odpor zátěže 100 Ω je účinnost 71 %
- pro odpor zátěže 150 Ω je účinnost 76 %

3.4 Návrh desky plošného spoje

Pro návrh je využito návrhového systému EAGLE 6.4 od firmy CadSoft. Tento systém umožňuje kromě zapojení schématu také generovat desku pro navržené zapojení.

Při návrhu desky plošného spoje je snaha osazovat součástky pouze na její vrchní stranu. Pro logické signály jsou šířky spojů 0,4 mm a pro výkonové jsou šířky spojů

0,8 mm. Pro snížení rušivých vlivů je po celé vrchní i spodní straně rozlita měď a následně připojena k nulovému potenciálu GND.

Výrobní data potřebná k výrobě DPS jsou součástí příloženého CD.

3.5 Měření parametrů

Měření je provedeno v laboratoři (příloha D) nacházející se na FM. Seznam použitých měřících přístrojů je v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1: Měřící přístroje

Měřící přístroj	Značka	Model
LCR měřič	Escort	ELC-132A
Funkční generátor	Tektronix	AFG 3102
Laboratorní zdroj	Matrix	MPS-3005L-3
Osciloskop	Rigol	DS1102CD
Multimetr	Agilent	34410A

Prvním měřeným parametrem je jmenovitá hodnota proudu. Hodnoty proudu tabulka 3.2 jsou měřeny číslicovým multimetrem Agilent 34410A a s použitím výrobního katalogu spočtena rozšířená nejistota měření.

Tabulka 3.2: Naměřené hodnoty jmenovitého proudu

Číslo měření	Naměřená hodnota [mA]	u_{Bj}
1	100,013	0,03176
2	100,012	0,03176
3	100,026	0,03176
4	100,009	0,03176
5	100,011	0,03176
6	100,029	0,03176
7	100,020	0,03176
8	100,015	0,03176
9	100,022	0,03176
10	100,006	0,03176
11	100,026	0,03176
12	100,024	0,03176
Průměr	100,018	0,03176

Nejistota typu A:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (3.4)$$

$$u_A = 0,00220 \quad (3.5)$$

Nejistota typu B:

$$u_B = \sqrt{\sum_j u_{Bj}^2}, \quad (3.6)$$

$$u_B = 0,110 \quad (3.7)$$

kde u_{Bj} jsou složky nejistoty typu B s koeficientem $\theta = \sqrt{3}$

Standardní kombinovaná nejistota:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3.8)$$

$$u = 0,110 \quad (3.9)$$

Rozšířená nejistota:

$$U = 2 \cdot u \quad (3.10)$$

$$U = 0,220 \quad (3.11)$$

Výsledek měření proudu:

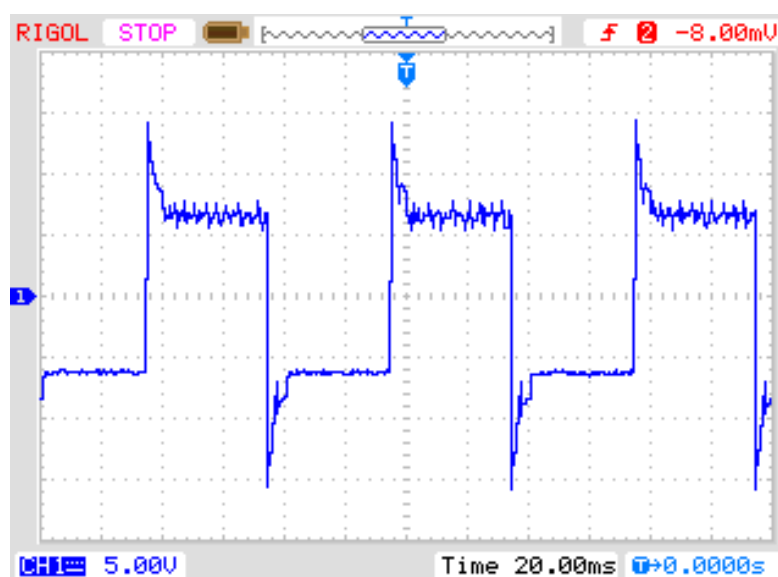
$$I = (100,018 \pm 0,220) \text{mA} \quad (3.12)$$

Dalším měřeným parametrem je průběh napětí a proudu na budicích cívkách (Příloha D). Proud cívkou je měřen na snímacím odporu s hodnotou 10Ω .

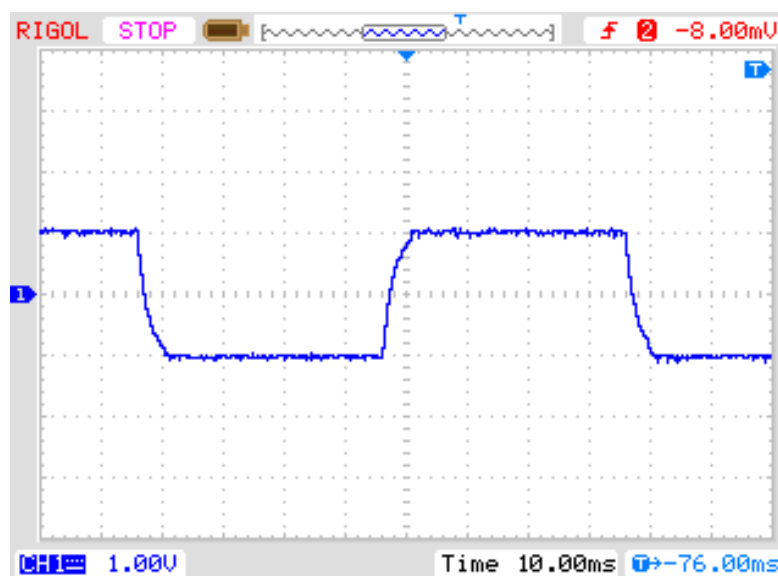
Naměřené parametry cívek jsou v tabulce 3.3.

Tabulka 3.3: Parametry použitých cívek

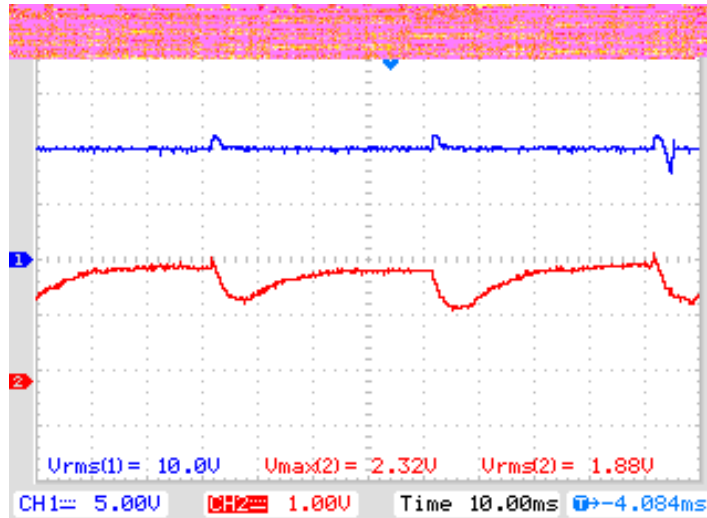
Cívka	Odpor [Ω]	Indukčnost [mH]
1	62,5	208,6
2	99,8	62,3



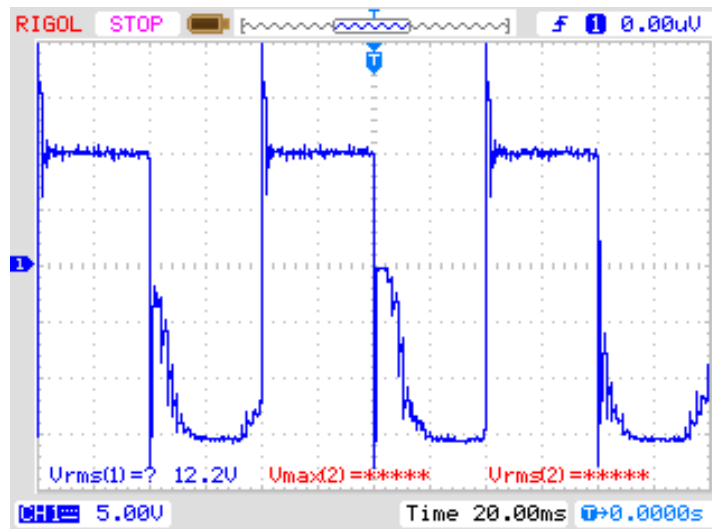
Obrázek 3.9: Napětí na cívce číslo jedna



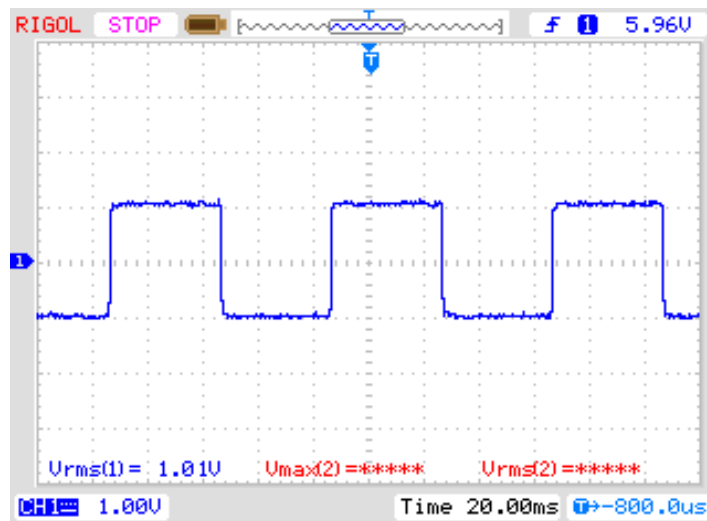
Obrázek 3.10: Proud cívkou číslo jedna



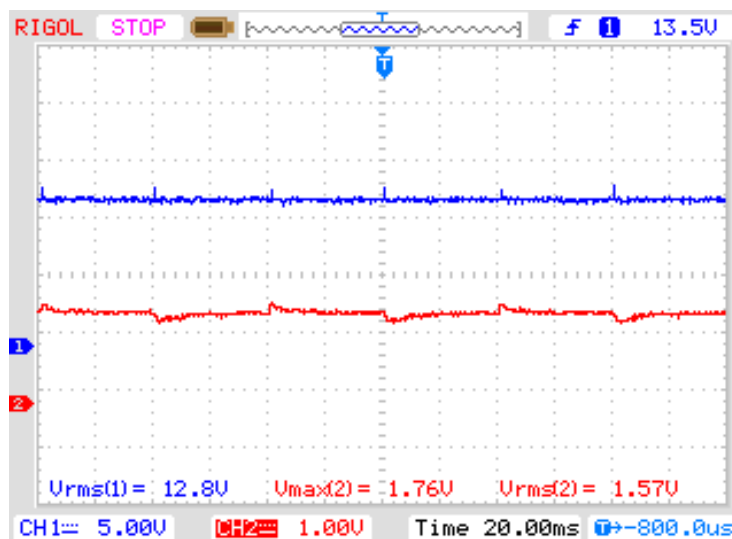
Obrázek 3.11: Výstupní napětí zdroje a sledované napětí nad tranzistorem



Obrázek 3.12: Napětí na cívce číslo dva



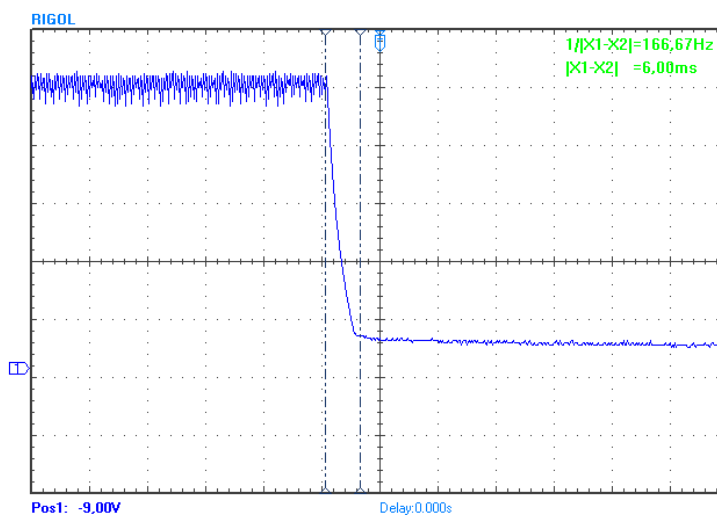
Obrázek 3.13: Proud cívkou číslo dva



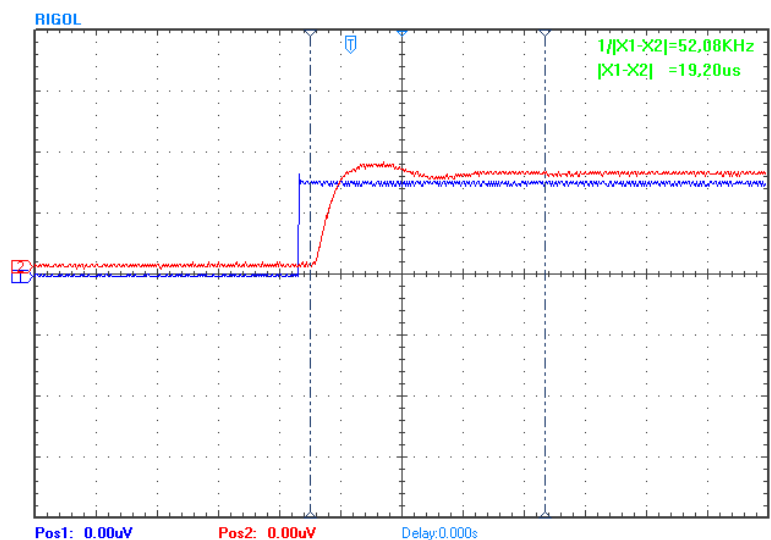
Obrázek 3.14: Napětí spínaného zdroje a napětí nad tranzistorem

Pro určení časových konstant regulačních zpětnovazebních smyček je naměřena reakce spínaného zdroje napětí a proudového zdroje na skokovou změnu.

Na obrázku 3.15 je reakce spínaného zdroje na skokovou změnu napětí na vstupu VSENSE. Reakce proběhla bez dopravního zpoždění a doba reakce trvala přibližně 6 ms. Reakce proudového zdroje (viz obrázek 3.16) proběhla po dobu 19,2 μ s a to s dopravním zpožděním 1,4 μ s.



Obrázek 3.15: Reakce spínaného zdroje na skokovou změnu napětí 0,8 V na vstupu VSENSE



Obrázek 3.16: Reakce proudového zdroje na skokovou změnu referenčního napětí

3.6 Teplotní závislost realizovaného zdroje proudu

3.6.1 Rozbor teplotních koeficientů součástek

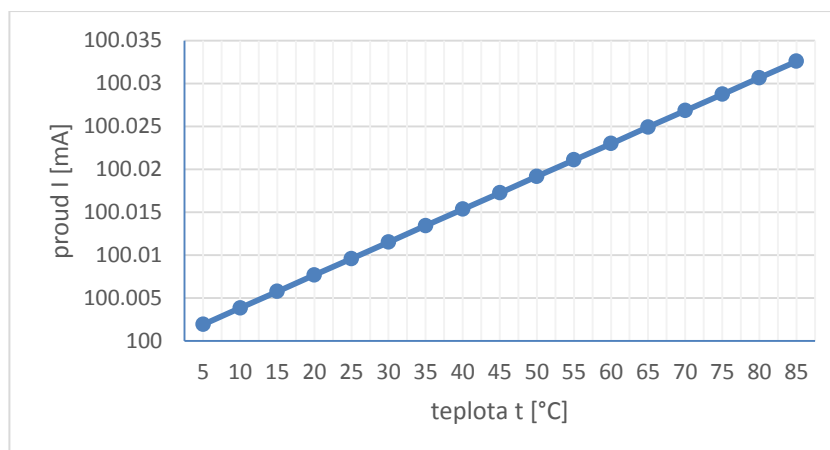
Tabulka 3.4: Teplotní závislosti

Součástka	Teplotní závislost
Napěťová reference ADR3412 (1,2 V)	8ppm/°C (9,6 μV/°C)
Operační zesilovač ADA4841	0,84ppm/°C (1 μV/°C)
Referenční odpor RN73 12 Ω (0,1%)	5ppm/°C (60 μΩ/°C)

Teplotní závislost proudu činí:

$$I = \frac{U + t \cdot 8,84ppm}{R + t \cdot 5ppm} \quad (3.13)$$

Podle vztahu (3.13) jsou vypočteny hodnoty proudu a vyneseny do grafu 3.8.



Graf 3.7: Teplotní závislost výstupního proudu

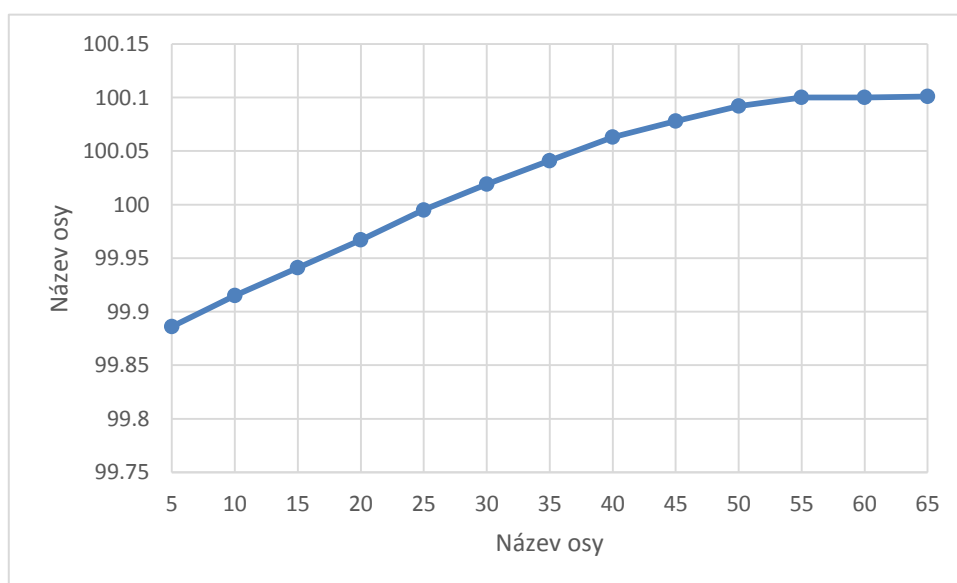
3.6.2 Naměřená teplotní závislost

Tabulka 3.5: Měření teplotní závislosti

Teplota t [°C]	Proud I [mA]
5,06	99,886
10,02	99,915
14,95	99,941
20,02	99,967
25,07	99,995
29,99	100,019
34,96	100,041
39,94	100,063
45,01	100,078
50,04	100,092
54,99	100,097
60,07	100,099
64,98	100,101

Teplotní závislost zdroje proudu je měřena v teplotní komoře CTS T-40/100 (Příloha H). Měřený teplotní rozsah nedosahuje k 85 °C vlivem případného tavení přívodních vodičů a kontaktního pole. Přesnost proudu na měřeném teplotním rozsahu je 0,12 %. Z průběhu proudu na grafu 3.9 lze předpokládat, že změna při nárůstu o dalších 20 °C nebude značná.

Tato přesnost neodpovídá teplotnímu rozboru, ale je splněn požadavek zadání i s určitou rezervou.



Graf 3.8: Měřená teplotní závislost proudu

4 Závěr

Stěžejním úkolem bakalářské práce bylo vytvořit přesný zdroj proudu s vysokou účinností. Hlavním požadavky byla vysoká stabilita proudu a vysoká účinnost zdroje. Při vývoji zdroje bylo nejdříve navrženo několik modelů v simulačních prostředích LTspice a Multisim.

Jako nejlepší řešení se ukázala kombinace spínaného zdroje napětí se zapojením proudového zdroje využívajícího zpětnovazebního zapojení operačního zesilovače. Výstupní napětí zdroje je regulováno tak, aby výkonová ztráta na regulačním tranzistoru MOSFET v obvodu operačního zesilovače byla co nejnižší.

Zdroj proudu je určen pro buzení elektromagnetického průtokoměru, kde je nutno měnit polaritu proudu do indukční zátěže. Největším problémem pak bylo vyřešit obvod tak, aby nedocházelo k oscilacím při přepínání polarity – jedná se totiž o dva regulační obvody. Spínaný napěťový zdroj byl nastaven tak, že regulace napětí (vnější regulační smyčka) je asi 300× pomalejší než regulace zdroje proudu (vnitřní regulační smyčka). Výsledné řešení je stabilní.

Teoretickým odvozením i praktickým měřením byla prokázána i stabilita proudu, která v rozsahu teplot 65 °C činí 0,12 % a je tak s rezervou splněno zadání.

Účinnost proudového zdroje se pohybuje mezi 71 a 76 % v závislosti na odporu budících cívek (100 až 150 Ω).

Zvýšené účinnosti lze dosáhnout snížením referenčního napětí proudového zdroje a snížením úbytku napětí na výkonovém tranzistoru ve zpětné vazbě operačního zesilovače proudového zdroje.

Návrh schématu a desky plošného spoje byl proveden v softwarovém prostředí Eagle 6.4.

Seznam odborné literatury

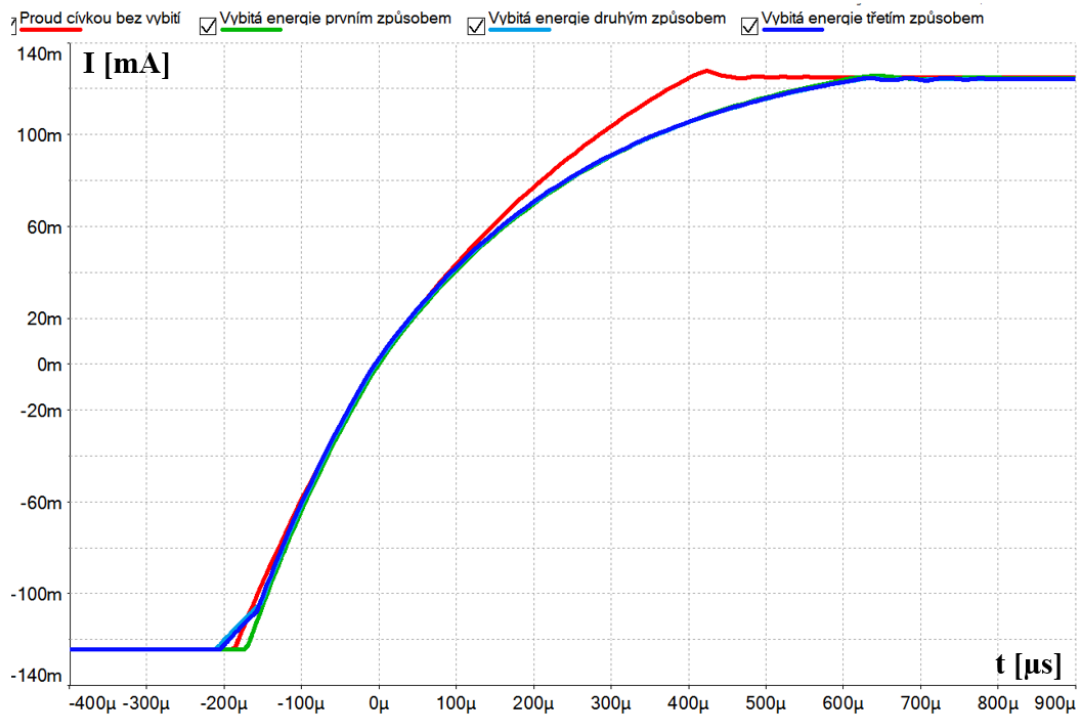
- [1] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Zdroje proudu*. 1. vydání. Praha: BEN, 1999. 111 s. ISBN 80–86056-84-8.
- [2] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje*. 1. vyd. Praha: BEN, 1999. 349 s. ISBN 80–86056–56–2.
- [3] DIVIŠ, Jozef. *Základy elektroniky* [online]. SPŠE Mohelnice. [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zel/>
- [4] HORTEL Milan, *Proudové zrcadlo* [online]. [vid. 26. 3. 2016]. Dostupné z: <http://www.mlab.cz/Articles/Texts%20Krouzek/Proudov%C3%A9%20zrcadlo/DOC/Proudov%C3%A9%20zrcadlo.cs.pdf>
- [5] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky 1. díl*. 1. vyd. Praha: BEN, 2005. 344 s. ISBN 978-80-7300-146-9.
- [6] PATERKA, Vojtěch. Elektromagnetický průtokoměr s Kapacitními elektrodami: Electromagnetic flowmeter with capacitive electrodes. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2000.
- [7] ROSICKÝ, Jakub. Optimalizace magnetického pole čidla indukčního průtokoměru: Optimization of magnetic field of the electromagnetic flow sensor [CD-ROM]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011.
- [8] SLAVÍK, Lubomír. Indukčně.kapacitní měření průtoku kapalin, studium vlivů a metoda měření: Inductive-capacitive liquid flow measuring, research of influence and measuring method [CD-ROM]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010.
- [9] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. 1. vyd. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-156-X.
- [10] Katalogový list firmy Texas Instrument. [online] 2016-01 [cit. 15. 5. 2016].

- [11] Katalogový list firmy Analog Devices. ADA4841 [online] 2014 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4841-1_4841-2.pdf
- [12] Katalogový list firmy Toshiba. TLP181 [online] 2009-11 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z: <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=16749&prodName=TLP181>
- [13] Katalogový list firmy Infineon. BSS314PE [online] 2010-03 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/396457/INFINEON/BSS314PE.html>
- [14] Katalogový list firmy Fairchild Semiconductor. NDS355 [online] 1996-03 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z: <http://bns.com.pl/data/files/NDS355/NDS355.pdf>
- [15] Katalogový list firmy Analog Devices. ADR3412 [online] 2010 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADR3412_ADR3420_ADR3425_ADR3430_ADR3433_ADR3440_ADR3450.pdf
- [16] Katalogový list firmy Texas Instruments. LM317 [online] 2014-11 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z : <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf>
- [17] Katalogový list firmy TE connectivity. RN73 [online] 2011-06 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z: http://www.tme.eu/cz/Document/c2c9dd933782d2bed4709e3bf9541941/TE_CONNECTIVITY_RN73.pdf
- [18] Katalogový list firmy Agilent. 34410A [online] 2013-04 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-3738EN.pdf>

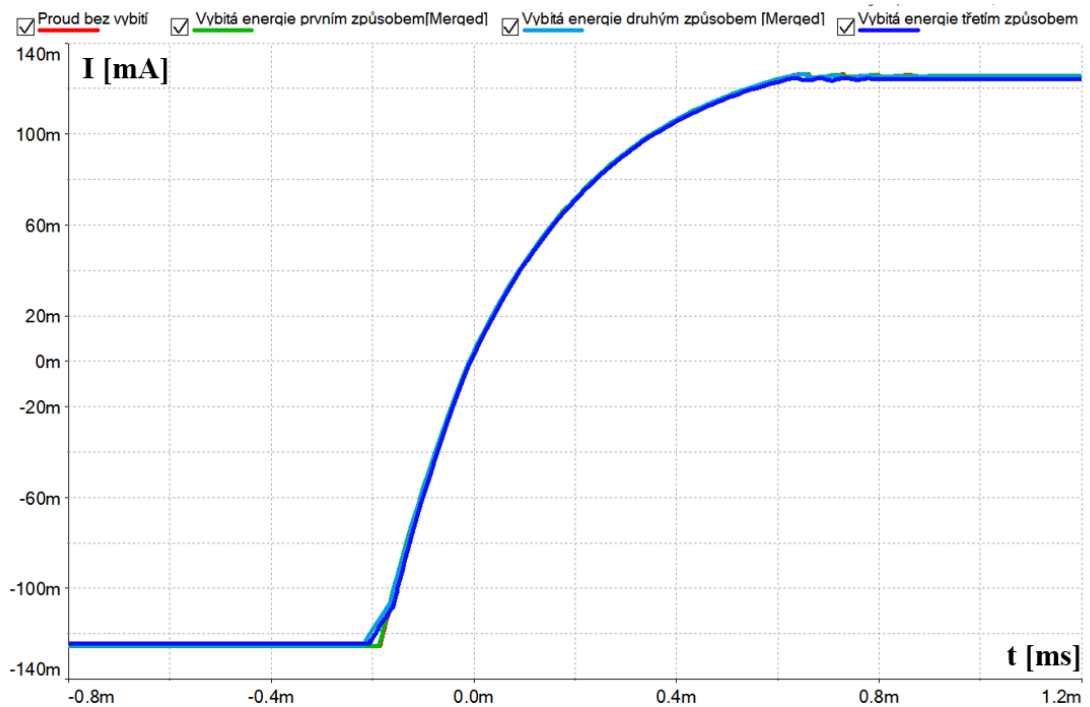
A Obsah příloženého CD

- Bakalářská práce ve formátu PDF a DOCX
- Vytvořené modely
- Katalogové listy
- Schéma navrženého obvodu
- Výrobní data DPS

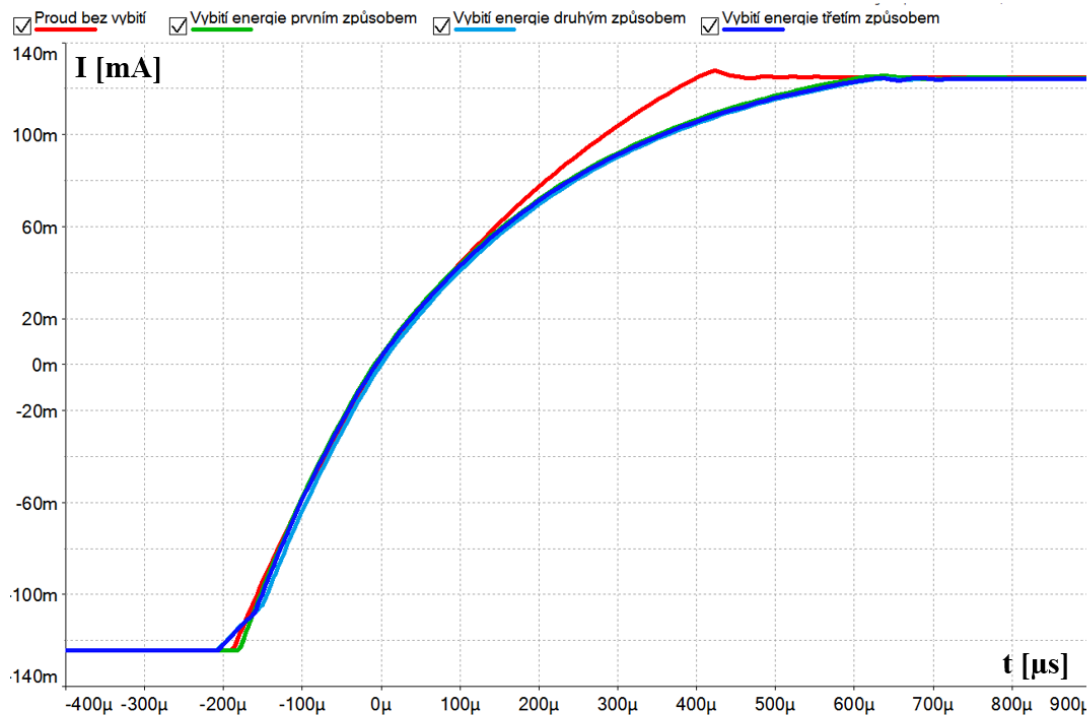
B Vybíjení cívky



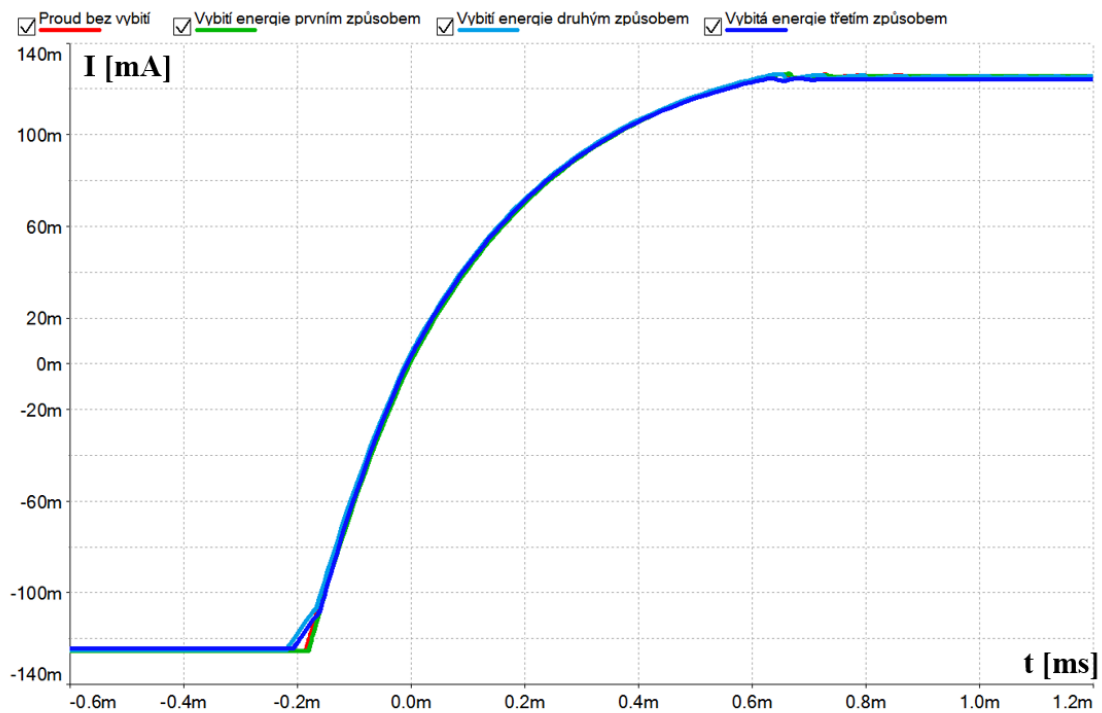
Graf C.1: Vybítí energie po změně polaroty proudu, LM117 nad můstkem



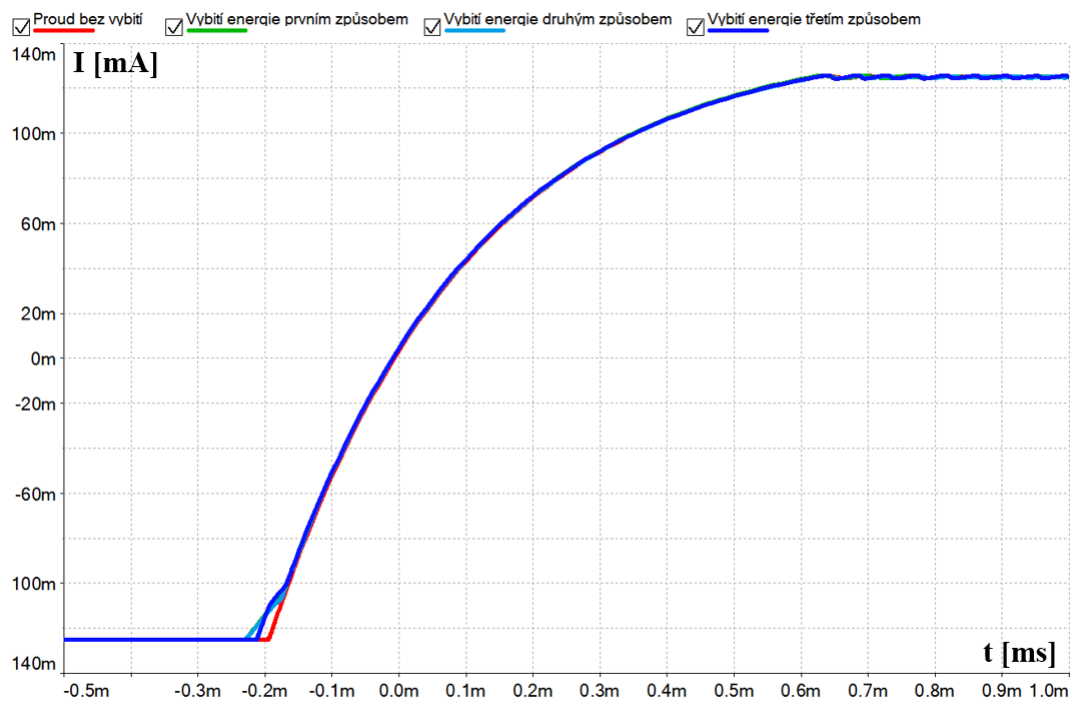
Graf C.2: Vybítí energie před změnou polaroty proudu, LM117 nad můstkem



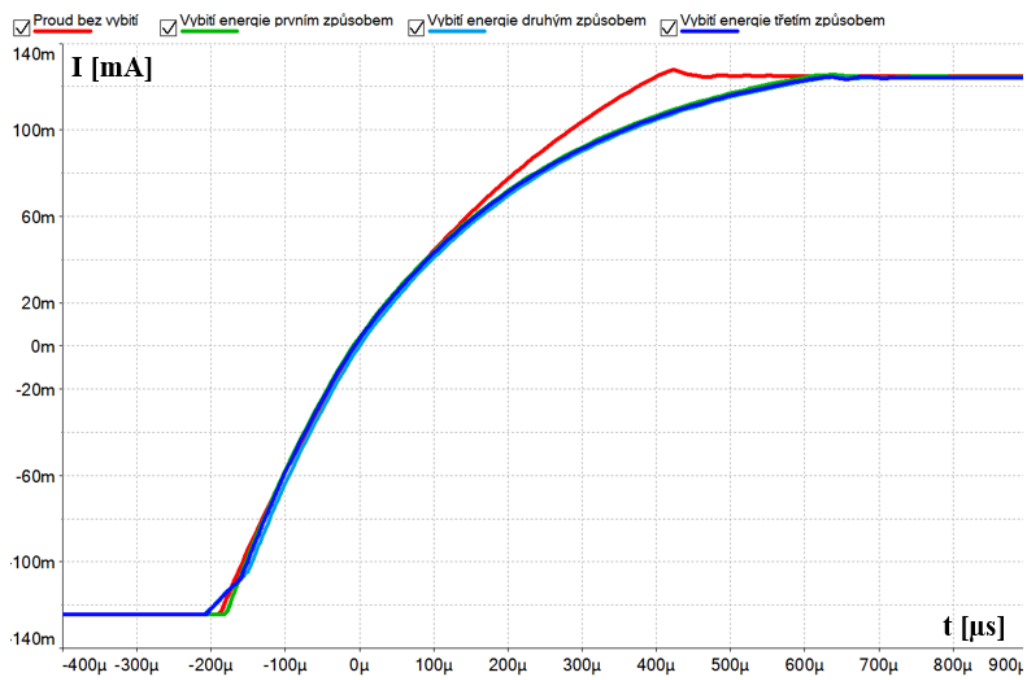
Graf C.3: Vybití energie po změně polarity proudu, LM117 pod můstkem



Graf C.4: Vybití energie před změnou polarity proudu, LM117 pod můstkem

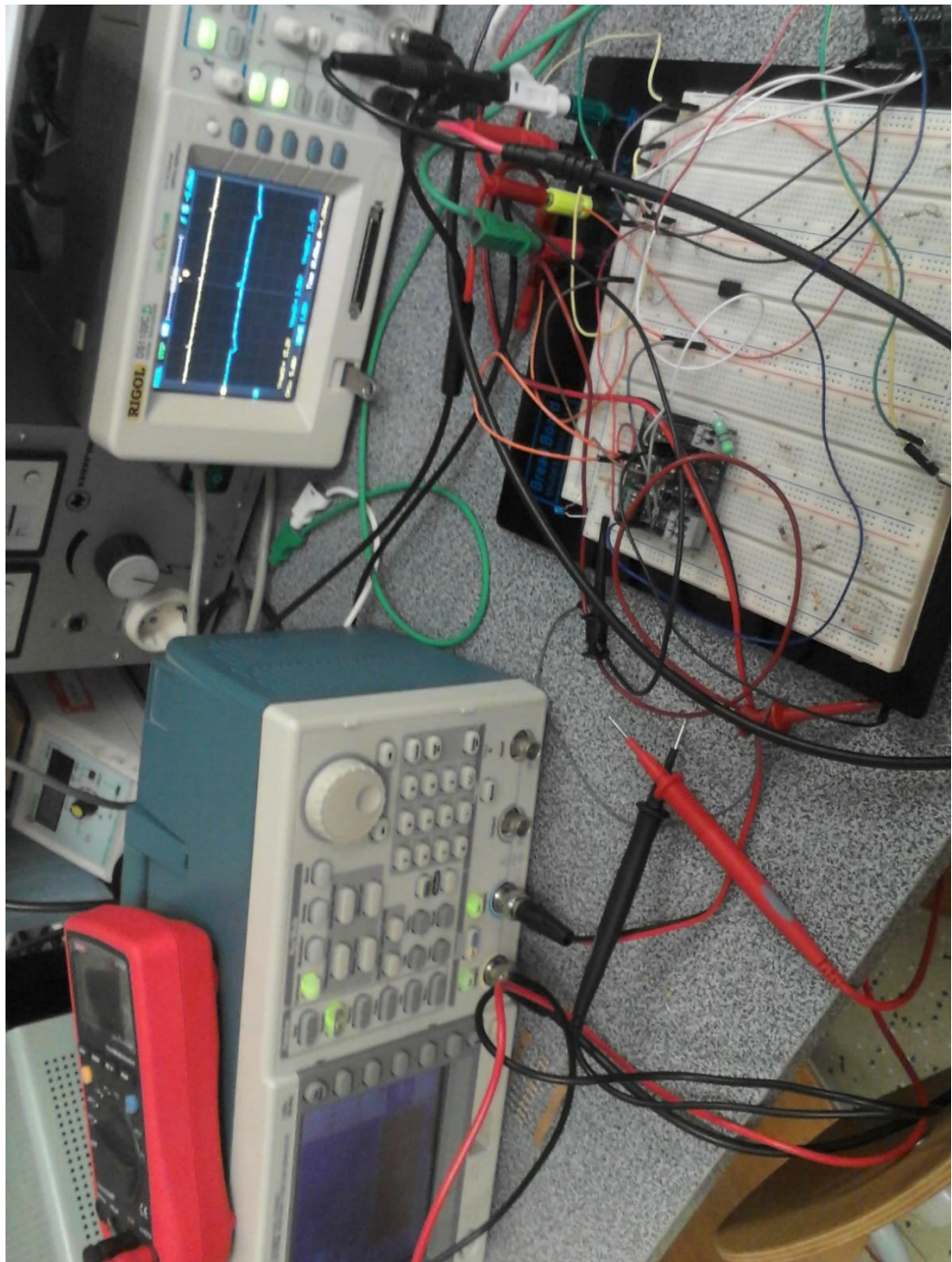


Graf C.5: Vybití energie před změnou polaroty proudu, ADA4841 pod můstkem

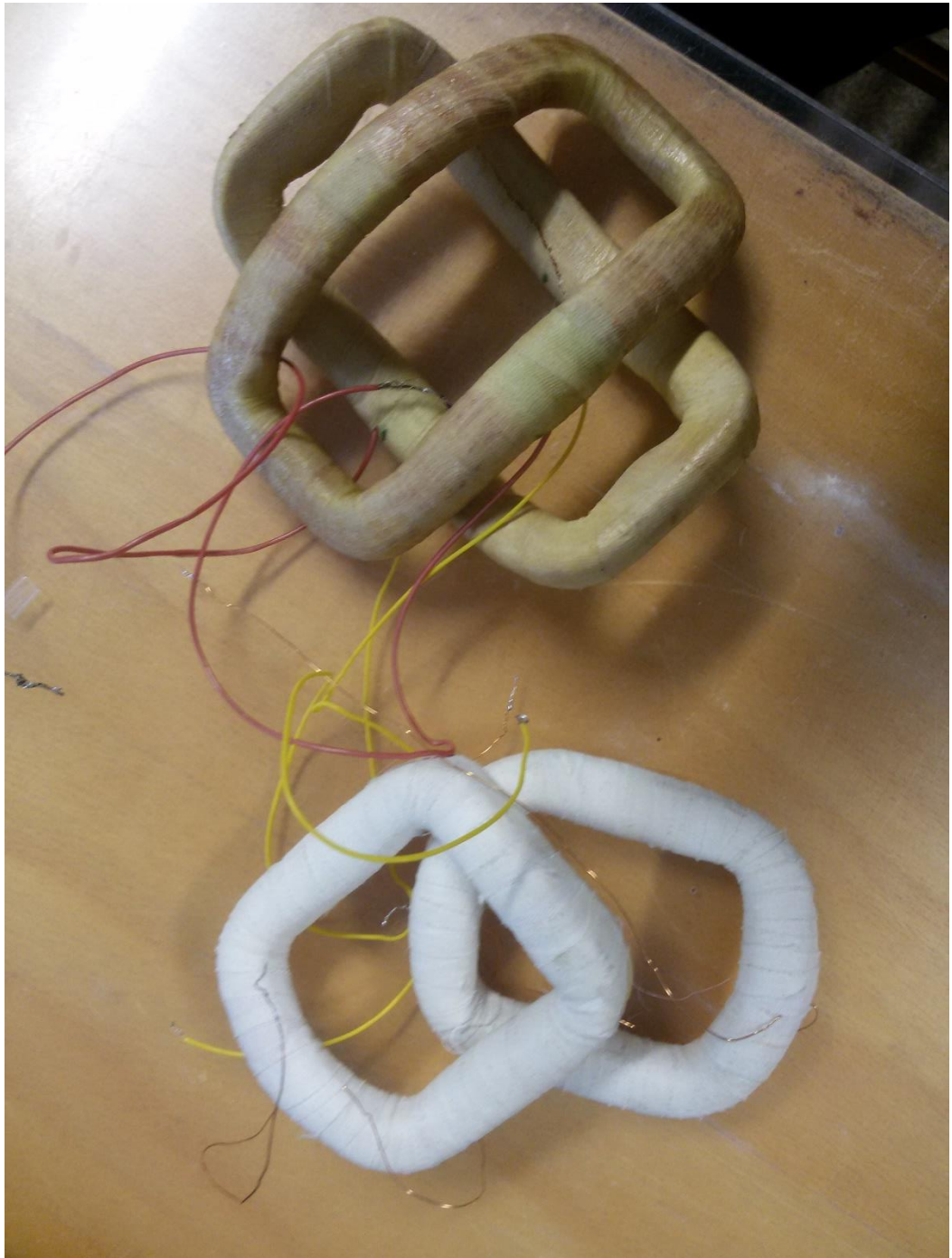


Graf C.6: Vybití energie po změně polaroty proudu, ADA4841 pod můstkem

C Měřicí pracoviště

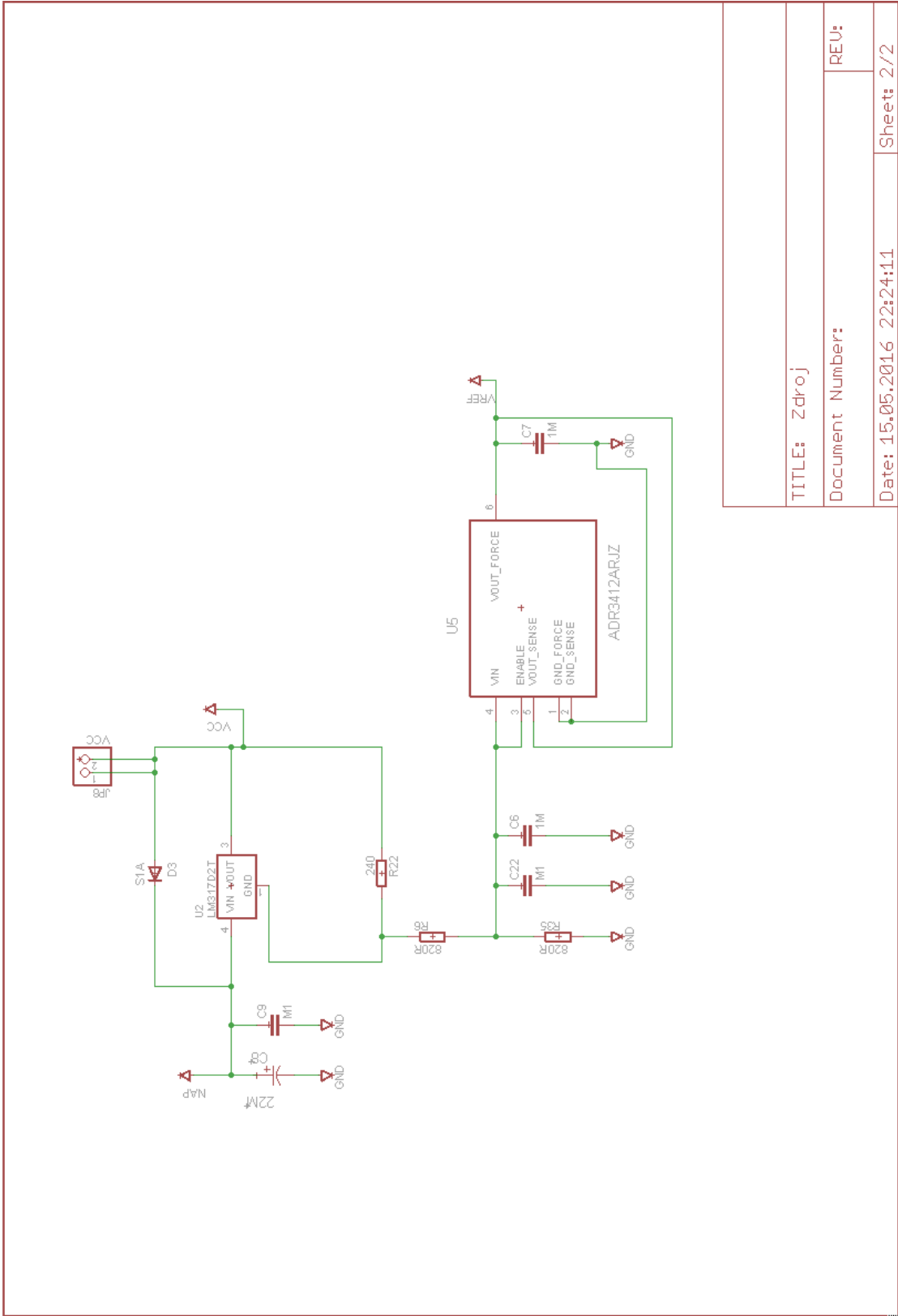


D Cívky pro měření



E Schéma zapojení

F Schéma zapojení 2



TITLE: Zdroj

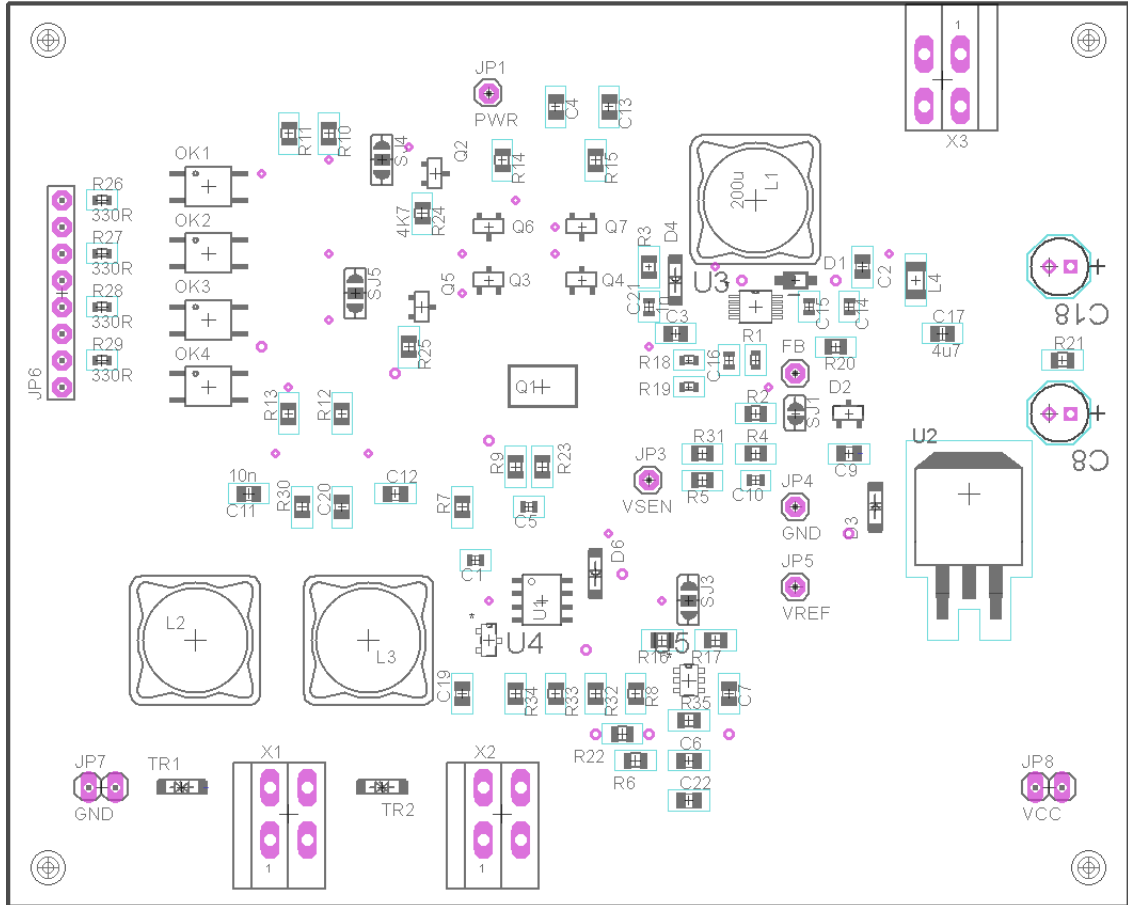
Document Number:

REU:

Date: 15.05.2016 22:24:11

Sheet: 2/2

G Osazovací schéma



H Teplotní komora

