



Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace modulu stabilizátoru napětí pro speciální nízkošumové aplikace

Autor práce: Bc. Pavel Šmaus
Vedoucí práce: Ing. Jiří Stifter, Ph.D.

Plzeň 2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel ŠMAUS**
Osobní číslo: **E10N0149P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Telekomunikační a multimediální systémy**
Název tématu: **Optimalizace modulu stabilizátoru napětí pro speciální nízko-
šumové aplikace**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Proveďte analýzu nabídky na trhu monolitických integrovaných stabilizátorů napětí, technické parametry stabilizátorů porovnejte, zaměřte se především na lineární sériové stabilizátory napětí určené pro nevýkonové aplikace do zhruba 1 A výstupního proudu s nízkou hodnotou zvlnění výstupního napětí a šumu.
2. Zrealizujte měřicí přípravky s typickými aplikačními zapojeními uváděnými výrobcem daného stabilizátoru tak, aby bylo možné tyto stabilizátory měřit. Měřte především velikost zvlnění výstupního napětí a velikost šumu při různých pracovních podmínkách zátěže na výstupu stabilizátoru. Měřicí přípravek by měl umožňovat nastavit skokovou změnu výstupního proudu tekoucího zátěží. Navrhněte a zrealizujte automatizovanou metodiku měření stabilizátorů s ohledem na uvedené požadavky a s možností začlenění do měřicího systému AP SYS2722, AP DCX127. Porovnejte výsledky měření.
3. Na základě výsledků měření zvolte nejvhodnější řešení stabilizátoru optimalizovaného pro speciální aplikace vyžadující nízkou hodnotu zvlnění výstupního napětí a šumu (napájení nf předzesilovačů s velkým zesílením, měřicích zesilovačů apod.). Jsou požadovány především tyto hodnoty napájecích napětí: +/-5, 15, 18, 24 a 48 V, případně +200 V, dále je požadována co nejnižší složitost topologie zapojení stabilizátoru a nízká cena.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Stifter, Ph.D.

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

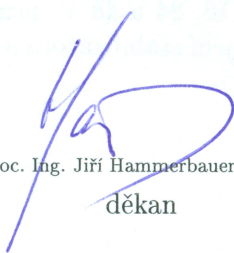
Konzultant diplomové práce:

Ing. Jiří Stifter, Ph.D.

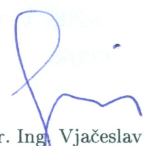
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**



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



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh optimálního řešení stabilizátoru napětí s nízkou hodnotou zvlnění výstupního napětí a nízkou efektivní hodnotou šumového napětí na výstupu stabilizátoru. Cílem práce je zhotovení měřících přípravků stabilizátorů, přípravků pro přepínání zátěží stabilizátorů a přípravků pro automatizované měření stabilizátorů pomocí výpočetního prostředí Matlab. Dalším cílem práce je vyhotovení automatizovaného zpracování naměřených dat při měření výstupního zvlnění, napětí, šumu a brumových složek signálu na výstupu stabilizátoru pomocí audio analyzátoru a optimalizace napěťového stabilizátoru složeného z diskrétních součástek a porovnání s monolitickými stabilizátory napětí.

Klíčová slova

šum, zvlnění, nízkošumový stabilizátor, efektivní hodnota šumového napětí, potlačení zvlnění napájecího napětí

Abstract

Šmaus, Pavel. *Optimization of voltage regulator module designed for special low noise applications* [*Optimalizace modulu stabilizátoru napětí pro speciální nízkošumové aplikace*]. Pilsen, 2012. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Jiří Stifter

Presented Master thesis is focused on the design optimal solutions of a voltage regulator with low output ripple, and noise voltage components. The point of the thesis is to prepare a measuring products of a voltage regulators, modules for switching regulators loads and automated measuring of a voltage regulators by using the Matlab environment. The next point of the thesis is an automatic data processing from measurement of output ripple, voltage, noise and hum components of the output of regulator by using an audio analyzer and optimization of voltage regulator module used a discrete parts a compare with a monolithic voltage regulators.

Keywords

noise, ripple, low-noise regulator, voltage noise RMS, power supply ripple rejection

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci 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 závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 18. května 2012

Bc. Pavel Šmaus

.....

Podpis

Poděkování

Tato práce vznikla s podporou projektu SGS-2012-019 „Moderní řešení elektronických řídicích a informačních systémů“.

Obsah

Seznam obrázků	xx
Seznam tabulek	xxiii
Seznam symbolů a zkratk	xxiv
1 Úvod	1
2 Popis parametrů lineárních stabilizátorů z hlediska šumu	3
2.1 Nízkošumové lineární stabilizátory pro citlivé analogové obvody	3
2.2 Zvýšení činitele potlačení zvlnění napájecího napětí lineárních stabilizátorů	4
2.2.1 Zvýšení činitele potlačení zvlnění napájecího napětí pomocí jednoho nebo kaskády RC filtrů	6
2.2.2 Zvýšení činitele potlačení zvlnění napájecího napětí pomocí LC filtru	7
2.2.3 Zvýšení činitele potlačení zvlnění napájecího napětí s využitím dalšího lineárního stabilizátoru spojeného do kaskády	7
2.3 Měření extrémně nízkého šumového napětí lineárních stabilizátorů	8
2.4 Testování nízkošumových, nízkoúbytkových stabilizátorů	10
2.5 Souhrn parametrů pro další postup návrhu zapojení lineárních stabilizátorů	13
2.6 Šumové parametry lineárních stabilizátorů a metody jejich zlepšení	14
3 Přehled monolitických lineárních integrovaných stabilizátorů napětí	16
3.1 Monolitické integrované stabilizátory napětí řady 78xx a 79xx	16
3.2 Monolitické integrované stabilizátory napětí s regulovatelným výstupním napětím řady 317 a 337	17
3.3 Lineární stabilizátor napětí řady 723	18
3.4 Lineární stabilizátor napětí TL783	20
3.5 Stabilizátor kladného napětí ADP7104	20
3.6 Stabilizátor kladného napětí LT1962	21

3.7	Stabilizátor záporného napětí LT1964	22
3.8	Stabilizátor kladného napětí LT1965	22
3.9	Nízkošumový duální lineární stabilizátor LT3032	23
3.10	Nízkošumový lineární stabilizátor kladného napětí LP2985A-50	23
3.11	Nízkošumový lineární stabilizátor kladného napětí TPS7A4901	24
3.12	Nízkošumový lineární stabilizátor záporného napětí TPS7A3001	25
3.13	Výběr lineárních stabilizátorů pro měření šumových parametrů	26
3.13.1	Porovnání lineárních stabilizátorů podle výstupní úrovně stabilizo- vaného napětí	26
4	Návrh a optimalizace napěťového stabilizátoru	29
4.1	Napěťový stabilizátor složený z diskretních součástek s ultra nízkým šumovým napětím	29
4.1.1	Modelování parametrů stabilizátoru složeného z diskretních součástek	31
4.1.2	Šumový model stabilizátoru složeného z diskretních součástek	32
4.1.3	Simulace zatěžovací charakteristiky a šumových parametrů lineárního stabilizátoru složeného z diskretních součástek	34
4.2	Optimalizace stabilizátoru složeného z diskretních součástek	36
4.2.1	Stabilizátor s výstupním napětím +5 V z diskretních součástek	38
4.2.2	Stabilizátor s výstupním napětím +15 V z diskretních součástek	40
4.2.3	Stabilizátor s výstupním napětím +18 V z diskretních součástek	42
4.2.4	Výsledky optimalizace stabilizátoru složeného z diskretních součástek	44
5	Návrh přípravků pro měření lineárních stabilizátorů napětí	45
5.1	Návrh vazebního členu	46
5.1.1	Výpočet amplitudové chyby vazebního členu	47
5.1.2	Výpočet šumu rezistorů vazebního členu	48
5.1.3	Výpočet celkového šumového napětí jedné větve vazebního členu	50
5.1.4	Výpočet mezních parametrů vazebního členu	52
5.1.5	Realizace zapojení vazebního členu	53

5.2	Automatické přepínání zátěže testovaného lineárního stabilizátoru napětí	53
5.2.1	Návrh budiče relé automatizovaného přepínání zátěže	54
5.2.2	Popis zapojení automatického přepínání zátěže testovaného lineárního stabilizátoru napětí	55
5.3	Zatěžovací moduly testovaného lineárního stabilizátoru napětí	55
5.4	Návrh chlazení lineárních stabilizátorů napětí	55
5.4.1	Výpočet chladiče lineárního stabilizátoru o jmenovitém napětí ± 5 V	55
5.5	Základna modulu napěťového zdroje pro měření lineárních stabilizátorů	56
5.5.1	Popis zapojení základny modulu napěťového zdroje	57
5.6	Měřicí moduly lineárních napěťových stabilizátorů	57
5.6.1	Moduly stabilizátorů 7805, 7815, 7818 a 7824	58
5.6.2	Moduly stabilizátorů 7905, 7915, 7918 a 7924	58
5.6.3	Moduly stabilizátorů řady 317	59
5.6.4	Moduly stabilizátorů řady 337	60
5.6.5	Moduly stabilizátorů pro výstupní napětí +48 V a +200 V	61
5.6.6	Modul stabilizátoru pro výstupní napětí -48 V	61
5.7	Moduly nízkošumových napěťových stabilizátorů	62
5.7.1	Moduly stabilizátoru ADP7104	63
5.7.2	Modul stabilizátoru LP2985A-50	63
5.7.3	Moduly stabilizátoru LT1962	64
5.7.4	Moduly stabilizátoru LT1964	65
5.7.5	Moduly stabilizátoru LT1965	66
5.7.6	Moduly stabilizátoru TPS7A3001	67
5.7.7	Moduly stabilizátoru TPS7A4901	67
5.7.8	Lineární nízkošumový stabilizátor složený z diskretních součástek s výstupním napětím +5 V	68
5.7.9	Lineární nízkošumový stabilizátor složený z diskretních součástek s výstupním napětím +18 V	69
6	Automatizované měření šumových parametrů lineárních stabilizátorů	70
6.1	Testovací signál	70
6.2	Funkce pro výpočet FFT transformace	70
6.2.1	Funkce pro výpočet frekvenčního kroku	71
6.2.2	Překryv Hannových oken, FFT, průměrování	71
6.3	Funkce pro výpočet činitele zvlnění	72
6.4	Funkce pro výpočet potlačení harmonických násobků kmitočtu 50 Hz	72
6.5	Hlavní soubor kódu automatizovaného měření šumových parametrů	73
6.5.1	Koeficienty	73

6.5.2	Kalibrace měřeného souboru	73
6.5.3	Vyhledání maxima pro zvolený kmitočet	74
7	Výsledky měření šumových parametrů lineárních stabilizátorů napětí	76
7.1	Lineární stabilizátory kladného napětí	77
7.1.1	Stabilizátor 7805	77
7.1.2	Stabilizátor 7815	78
7.1.3	Stabilizátor 7818	78
7.1.4	Stabilizátor 7824	78
7.1.5	Stabilizátor LM317 s výstupním napětím +5 V	79
7.1.6	Stabilizátor LM317 s výstupním napětím +15 V	80
7.1.7	Stabilizátor LM317 s výstupním napětím +18 V	80
7.1.8	Stabilizátor LM317 s výstupním napětím +24 V	80
7.1.9	Stabilizátor LT1962 s výstupním napětím +5 V	81
7.1.10	Stabilizátor LT1965 s výstupním napětím +15 V	81
7.1.11	Stabilizátor TPS7A4901 s výstupním napětím +24 V	82
7.2	Lineární stabilizátory záporného napětí	82
7.2.1	Stabilizátor 7905	82
7.2.2	Stabilizátor 7915	83
7.2.3	Stabilizátor 7918	83
7.2.4	Stabilizátor 7924	84
7.2.5	Stabilizátor LM337 s výstupním napětím -5 V	84
7.2.6	Stabilizátor LM337 s výstupním napětím -15 V	85
7.2.7	Stabilizátor LM337 s výstupním napětím -18 V	85
7.2.8	Stabilizátor LM337 s výstupním napětím -24 V	86
7.2.9	Stabilizátor LT1964 s výstupním napětím -8,6 V	86
7.2.10	Stabilizátor LT1964 s výstupním napětím -18 V	88
7.2.11	Stabilizátor TPS7A3001 s výstupním napětím -24 V	88
8	Závěr	89
	Reference, použitá literatura	92
	Přílohy	95
A	Přípravky pro měření lineárních stabilizátorů napětí	95
A.1	Duralový box pro stínění vazebního členu	95
A.2	Seznam součástek vazebního členu	96
A.3	Návrh DPS vazebního členu	96
A.4	Součástky přípravku pro automatické přepínání zátěže testovaného lineárního stabilizátoru napětí	99

A.5	Automatické přepínání zátěže lineárního stabilizátoru napětí	99
A.6	Součástky základny modulu napěťového zdroje	103
A.7	Základna modulu zdroje pro lineární stabilizátory napětí	103
B	Moduly lineárních napěťových stabilizátorů	105
B.1	Součástky pro lineární stabilizátory kladného napětí 7805, 7815, 7818 a 7824	105
B.2	Součástky pro lineární stabilizátory záporného napětí 7905, 7915, 7918 a 7924	107
B.3	Součástky pro lineární stabilizátory kladného napětí řady 317	108
B.4	Součástky pro lineární stabilizátory záporného napětí řady 337	112
B.5	Součástky pro lineární stabilizátory kladného napětí 48 V a 200 V pomocí integrovaného obvodu 723	116
B.6	Součástky pro lineární stabilizátory záporného napětí -48 V pomocí integrovaného obvodu 723	119
B.7	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí ADP7104	121
B.8	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LP2985A-50	123
B.9	Lineární nízkošumový stabilizátor L1962 s výstupním napětím 5 V	124
B.10	Lineární nízkošumový stabilizátor L1962 s výstupním napětím 15 V a 18 V	125
B.11	Lineární nízkošumový stabilizátor L1964 s výstupním napětím -5 V	126
B.12	Lineární nízkošumový stabilizátor L1964 s výstupním napětím -15 V a -18 V	126
B.13	Lineární nízkošumový stabilizátor LT1965	128
B.14	Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A3001	130
B.15	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí TPS7A4901	132
B.16	Zapojení lineárního nízkošumového stabilizátoru složeného z diskretních součástek	134
B.17	Moduly zatěžovacích rezistorů lineárních stabilizátorů napětí	136
B.18	DPS zatěžovacích modulů lineárních stabilizátorů	140

C Průběhy šumového napětí měřených stabilizátorů	150
D Vývojové diagramy kódu pro automatizované měření zvlnění, brumových a šumových složek	175
E Automatický výpočet parametrů	179
E.1 Funkce f_krok.m	179
E.2 Funkce cin_zvl.m	179
E.3 Funkce fft_transform.m	180
E.4 Funkce potlac_50.m	181
E.5 Funkce MAIN.m	182

Seznam obrázků

2.1	Závislost fázového šumu na frekvenci na výstupu VCO napájeného konvenčním LDO stabilizátorem ADP3334 a nízkošumovým stabilizátorem ADP150, které byly napájeny monočlánky Převzato z [6] 	4
2.2	Frekvenční charakteristika činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) lineárního napěťového stabilizátoru MAX8867 při použití rozdílných velikostí výstupních kapacit při zatěžovacím proudu 50 mA Převzato z [8] 	5
2.3	Příklad zapojení RC filtru 1. a 2. řádu na vstupu LDO stabilizátoru společně s výstupním kondenzátorem Převzato z [8] 	6
2.4	Amplitudové charakteristiky LC filtru pro různé tlumící poměry Převzato z [8]	7
2.5	Zapojení LC filtru na vstup lineárního stabilizátoru a umístění dumping rezistoru Převzato z [8] 	7
2.6	Sériové spojení dvou lineárních napěťových stabilizátorů do kaskády pro zvýšení činitele PSRR Převzato z [8] 	8
2.7	Zapojení pro měření extrémně nízké hodnoty šumového napětí pro frekvenční rozsah od 0,1 Hz do 10 Hz Převzato z [9] 	9
2.8	Blokové schéma měřícího řetězce pro měření lineárního stabilizátoru s extrémně nízkým šumovým napětím a rozvod napájení, zemnění a stínění Převzato z [9] 	9
2.9	Struktura filtrů pro testování LDO stabilizátorů Převzato z [10] 	10
2.10	Výběr a umístění výstupního kondenzátoru lineárního stabilizátoru napětí Převzato z [10] 	11
2.11	Procentní změna kapacity keramických kondenzátorů vyrobených z dielektrika X5R a X5V v závislosti na přiloženém napětí (a) a na teplotě (b) Převzato z [10] 	11
2.12	Voltmetry pro měření šumového napětí Převzato z [10] 	12
3.1	Doporučené zapojení lineárních napěťových stabilizátorů pro kladné a záporné výstupní napětí řady 78xx a 79xx	17
3.2	Doporučené zapojení lineárních napěťových stabilizátorů pro kladné a záporné výstupní napětí řady 317 a 337	19
3.3	Typické zapojení lineárního stabilizátoru řady 723 Převzato z [19] 	19
3.4	Typické zapojení lineárního stabilizátoru TL783 Převzato z [20]	20

3.5	Typické zapojení lineárního stabilizátoru ADP7104 s pevným výstupním napětím 5 V a nastavitelným výstupním napětím [Převzato z [21]].	21
3.6	Typické zapojení lineárního stabilizátoru kladného napětí LT1962 pro pevné a nastavitelné výstupní napětí od 1,22 V až 20 V [Převzato z [22]].	21
3.7	Typické zapojení lineárního stabilizátoru záporného napětí LT1964 pro pevné výstupní napětí -5 V a nastavitelné výstupní napětí od $-1,22$ V do -20 V [Převzato z [23]].	22
3.8	Typické zapojení lineárního stabilizátoru kladného napětí LT1965 pro pevné výstupní napětí 2,5 V a nastavitelné výstupní napětí od 1,20 V do 19,5 V [Převzato z [24]].	23
3.9	Typické zapojení duálního stabilizátoru napětí LT3032 pro pevné a nastavitelné výstupní napětí [Převzato z [25]].	24
3.10	Typické zapojení duálního stabilizátoru napětí LP2985A-50 [Převzato z [26]].	24
3.11	Typické zapojení stabilizátoru kladného napětí TPS7A4901 pro maximalizaci činitele PSRR a minimalizaci šumového napětí [Převzato z [27]].	25
3.12	Typické zapojení stabilizátoru záporného napětí TPS7A3001 pro maximalizaci činitele PSRR a minimalizaci šumového napětí [Převzato z [28]].	25
4.1	Zapojení diskretního stabilizátoru výstupního napětí 5 V [Převzato z [29]].	30
4.2	Spektrální hustota efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu stabilizátoru složeného z diskretních součástek v porovnání s monolitickým stabilizátorem MAX8887 [Převzato z [29]].	30
4.3	Schéma zapojení v programu PSPICE pro ověření funkce obvodu a šumovou analýzu	31
4.4	Spektrální hustota efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu stabilizátoru dle obrázku 4.3 ve frekvenčním rozsahu 10 Hz až 1 kHz	32
4.5	Šumový model lineárního stabilizátoru složeného z diskretních součástek	32
4.6	Zapojení pro výpočet zisku chybového zesilovače stabilizátoru	33
4.7	Schéma zapojení pro měření zatěžovací charakteristiky, efektivního šumového napětí, činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) a ztrátového výkonu stabilizátoru	34
4.8	Zatěžovací charakteristika lineárního stabilizátoru složeného z diskretních součástek od firmy MAXIM a ztrátový výkon na tranzistoru FDN302P	35
4.9	Průběh efektivní hodnoty výstupního napětí a frekvenční charakteristika činitele PSRR nízkošumového stabilizátoru napětí	35
4.10	Zapojení nízkošumového stabilizátoru napětí složeného z diskretních součástek dostupných na českém trhu pro vstupní napětí 5 V pro měření efektivní hodnoty výstupního šumového napětí, činitele PSRR a ztrátového výkonu stabilizátoru	37

4.11	Zatěžovací charakteristika pro zapojení stabilizátoru s OZ LM7301 (a) a výkonová ztráta na tranzistoru IRF9530N (b) při nastaveném výstupním napětí +5 V	38
4.12	Frekvenční závislost efektivní hodnoty šumového napětí a činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) při nastaveném výstupním napětí stabilizátoru +5 V	39
4.13	Zatěžovací charakteristika pro zapojení stabilizátoru s OZ LM7301 (a) a výkonová ztráta na tranzistoru IRF9530N (b) při nastaveném výstupním napětí +15 V	40
4.14	Frekvenční závislost efektivní hodnoty šumového napětí a činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) při nastaveném výstupním napětí stabilizátoru +15 V	41
4.15	Zatěžovací charakteristika pro zapojení stabilizátoru s OZ LM7301 (a) a výkonová ztráta na tranzistoru IRF9530N (b) při nastaveném výstupním napětí +18 V	42
4.16	Frekvenční závislost efektivní hodnoty šumového napětí a činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) při nastaveném výstupním napětí stabilizátoru +18 V	43
5.1	Blokové schéma měřicího řetězce obsahující napěťový zdroj s lineárním stabilizátorem, vazební člen a měřící analyzátor	45
5.2	Schéma zapojení vazebního členu	46
5.3	Celkové hodnoty rezistorů a kondenzátorů vazebního členu pro funkci dolní propusti	47
5.4	Zapojení rezistorů pro výpočet amplitudové chyby (zjednodušeno pro nesymetrické zapojení)	48
5.5	Frekvenční charakteristika útlumu vazebního členu ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz	48
5.6	Schéma zapojení rezistorů vazebního členu pro výpočet celkového šumového napětí rezistorů vazebního členu	49
5.7	Šumový model jedné větve vazebního členu	50
5.8	Zdroje šumového napětí jedné větve vazebního členu	51
5.9	Efektivní hodnota výstupního šumového napětí obou větví vazebního členu v závislosti na šířce pásma	51
5.10	Testovací impuls pro přechodový děj	52
5.11	Průběhy stejnosměrného napětí a nabíjecího proudu na kondenzátoru C na obr. 5.10 při působení skokového signálu o amplitudě 630 V	52
5.12	Blokové schéma automatického přepínání zátěže pro testovaný stabilizátor napětí	53
5.13	Zapojení budiče relé pro spínání zátěže lineárního stabilizátoru napětí	54
5.14	Schéma zapojení modulu základny lineárního zdroje	57

5.15	Schéma zapojení modulu pro stabilizátory kladného napětí 7805, 7815, 7818 a 7824	58
5.16	Schéma zapojení modulu pro stabilizátory záporného napětí 7905, 7915, 7918 a 7924	58
5.17	Schéma zapojení modulu pro stabilizátory kladného napětí +5 V, +15 V, +18 V a +24 V řady 317	59
5.18	Schéma zapojení modulu pro stabilizátory záporného napětí -5 V, -15 V, -18 V a -24 V řady 337	60
5.19	Schéma zapojení modulu pro stabilizátory kladného napětí +48 V a +200 V pomocí obvodu 723 a NPN tranzistoru	61
5.20	Schéma zapojení modulu pro stabilizátor záporného napětí -48 V pomocí obvodu 723 a PNP tranzistoru	62
5.21	Schéma zapojení lineárního nízkošumového stabilizátoru napětí ADP7104	63
5.22	Schéma zapojení stabilizátoru LP2985A-50	64
5.23	Schéma zapojení lineárního nízkošumového stabilizátoru LT1962	64
5.24	Schéma zapojení lineárního nízkošumového stabilizátoru záporného napětí LT1964	65
5.25	Schéma zapojení lineárního nízkošumového stabilizátoru napětí LT1965	66
5.26	Schéma zapojení lineárního nízkošumového stabilizátoru záporného napětí TPS7A3001	67
5.27	Schéma zapojení lineárního nízkošumového stabilizátoru kladného napětí TPS7A4901	68
5.28	Schéma zapojení stabilizátoru z diskretních součástek s výstupním napětím 5 V	69
5.29	Schéma zapojení stabilizátoru z diskretních součástek s výstupním napětím 18 V	69
6.1	Blokový diagram měřícího algoritmu	75
A.1	Duralový profil pro stínění vazebního členu	95
A.2	Deska plošných spojů vazebního členu	97
A.3	Osazovací plán pro vazební člen	98
A.4	Celkové schéma zapojení automatického přepínání zátěže lineárního stabilizátoru napětí	100
A.5	Deska plošného spoje modulu automatického přepínání zátěže lineárního stabilizátoru napětí	101
A.6	Rozvržení součástek desky plošného spoje modulu automatického přepínání zátěže lineárního stabilizátoru napětí	102
A.7	Osazovací plán základny zdroje napětí pro měření modulů lineárních stabilizátorů	103

A.8	Deska plošných spojů základny zdroje napětí pro měření modulů lineárních stabilizátorů	104
B.1	Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí 78xx	106
B.2	Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí 79xx	107
B.3	Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 317 s výstupním napětím 5 V	108
B.4	Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 317 s výstupním napětím 15 V	109
B.5	Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 317 s výstupním napětím 18 V	110
B.6	Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 317 s výstupním napětím 24 V	111
B.7	Modul lineárního stabilizátoru záporného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 337 s výstupním napětím -5 V	112
B.8	Modul lineárního stabilizátoru záporného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 337 s výstupním napětím -15 V	113
B.9	Modul lineárního stabilizátoru záporného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 337 s výstupním napětím -18 V	114
B.10	Modul lineárního stabilizátoru záporného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 337 s výstupním napětím -24 V	115
B.11	Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 723 a tranzistoru BU406 s výstupním napětím +48 V	117
B.12	Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 723 a tranzistoru BUT11 s výstupním napětím +200 V	118
B.13	Modul lineárního stabilizátoru záporného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 723 a tranzistoru TIP 127 s výstupním napětím -48 V	120
B.14	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí ADP7104 s výstupním napětím 5V	121
B.15	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí ADP7104 s výstupním napětím 15V	122
B.16	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí ADP7104 s výstupním napětím 18V	122
B.17	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LP2985A-50 s výstupním napětím 5V	123
B.18	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1962 s výstupním napětím 5V	124
B.19	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1962 s výstupním napětím 15V	125
B.20	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1962 s výstupním napětím 18V	125

B.21	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1964 s výstupním napětím $-5V$	126
B.22	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1964 s výstupním napětím $-15V$	127
B.23	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1964 s výstupním napětím $-18V$	127
B.24	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1965 s výstupním napětím $5V$	128
B.25	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1965 s výstupním napětím $15V$	128
B.26	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1965 s výstupním napětím $18V$	129
B.27	Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A3001 s výstupním napětím $-5V$	130
B.28	Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A3001 s výstupním napětím $-15V$	130
B.29	Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A3001 s výstupním napětím $-18V$	131
B.30	Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A3001 s výstupním napětím $-24V$	131
B.31	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí TPS7A4901 s výstupním napětím $5V$	132
B.32	Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A4901 s výstupním napětím $15V$	132
B.33	Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A3001 s výstupním napětím $18V$	133
B.34	Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A4901 s výstupním napětím $24V$	133
B.35	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí s výstupním napětím $+5V$ podle článku [29]	134
B.36	Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí s výstupním napětím $+18V$ složený z diskrétních součástek	135
B.37	Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí $5V$ zatěžovaný proudem $100mA$	136
B.38	Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí $5V$ zatěžovaný proudem $200mA$	136
B.39	Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí $5V$ zatěžovaný proudem $500mA$	136
B.40	Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí $5V$ zatěžovaný proudem $700mA$	136

B.41 Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 100 mA	137
B.42 Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 200 mA	137
B.43 Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 500 mA	137
B.44 Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 700 mA	137
B.45 Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 100 mA	138
B.46 Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 200 mA	138
B.47 Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 500 mA	138
B.48 Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 700 mA	138
B.49 Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V zatěžovaný proudem 200 mA	139
B.50 Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V zatěžovaný proudem 500 mA	139
B.51 Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V zatěžovaný proudem 700 mA	139
B.52 Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 48 V zatěžovaný proudem 100 mA	139
B.53 Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V a 48 V zatěžovaný proudem 100 mA a 200 mA	140
B.54 Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 200 V zatěžovaný proudem 100 mA	140
B.55 DPS modulu zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 5 V zatěžovaný proudem 100 mA	140
B.56 DPS modulu zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 5 V zatěžovaný proudem 200 mA	141
B.57 DPS modulu zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 5 V zatěžovaný proudem 500 mA	141
B.58 DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 5 V zatěžovaný proudem 700 mA	142
B.59 DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 100 mA	143
B.60 DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 200 mA	143

B.61 DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 500 mA	143
B.62 DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 700 mA	144
B.63 DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 100 mA	145
B.64 DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 200 mA	145
B.65 DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 500 mA	146
B.66 DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 700 mA	146
B.67 DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V zatěžovaný proudem 200 mA	146
B.68 DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V zatěžovaný proudem 500 mA	147
B.69 DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V zatěžovaný proudem 700 mA	147
B.70 DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 48 V zatěžovaný proudem 100 mA	148
B.71 DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V a 48 V zatěžovaný proudem 100 mA a 200 mA	149
B.72 Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 200 V zatěžovaný proudem 100 mA	149
C.1 Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7805 (a) a 7815 (b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA	151
C.2 Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7805 s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu	152
C.3 Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7818 (a) a 7824 (b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA	153
C.4 Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7824 s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu	154
C.5 Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +5 V (a) a LM317 s výstupním napětím +15 V (b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA	155
C.6 Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +5 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu	156

C.7	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +18 V (a) a LM317 s výstupním napětím +24 V (b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA	157
C.8	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +24 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu	158
C.9	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím +5 V (a) a LT1965 s výstupním napětím +15 V (b) a TPS7A4901 s výstupním napětím +24 V (c) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA	159
C.10	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím +5 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu	160
C.11	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LT1965 s výstupním napětím +15 V a s proudovým zatížením 0 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu	161
C.12	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru TPS7A4901 s výstupním napětím +24 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu	162
C.13	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7905 (a) a 7915 (b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA	163
C.14	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7905 s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu	164
C.15	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7918 (a) a 7924 (b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA	165
C.16	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7924 s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu	166
C.17	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -5 V (a) a LM337 s výstupním napětím -15 V (b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA	167
C.18	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -5 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu	168
C.19	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -18 V (a) a LM337 s výstupním napětím -24 V (b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA	169

C.20	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -24 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu	170
C.21	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LT1964 s výstupním napětím $-8,6\text{ V}$ (a) a LT1964 s výstupním napětím -18 V (b) a TPS7A3001 s výstupním napětím -24 V (c) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA	171
C.22	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LT1964 s výstupním napětím $-8,6\text{ V}$ a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu	172
C.23	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LT1964 s výstupním napětím -18 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu	173
C.24	Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru TPS7A3001 s výstupním napětím -24 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu	174
D.1	Vývojový diagram kódu pro výpočet frekvenčního kroku a potlačení násobku síťového kmitočtu a výpočet činitele zvlnění	176
D.2	Vývojový diagram kódu pro výpočet FFT se zadaným překryvem	177
D.3	Vývojový diagram hlavního souboru MAIN	178

Seznam tabulek

3.1	Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím +5 V . . .	27
3.2	Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím -5 V . . .	27
3.3	Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím +15 V . .	27
3.4	Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím -15 V . .	27
3.5	Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím +18 V . .	28
3.6	Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím -18 V . .	28
3.7	Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím +24 V . .	28
3.8	Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím -24 V . .	28
3.9	Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím +48 V, -48 V a +200 V	28
5.1	Výpočet jednotlivých šumových napětí použitých rezistorů pro šířku pásma $B_1 = 20$ kHz, $B_2 = 100$ kHz a $B_3 = 500$ kHz pro teplotu $27^\circ C$	49
7.1	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7805 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	77
7.2	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7815 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	78
7.3	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7818 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	78
7.4	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7824 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	79
7.5	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM317 s výstup- ním napětím +5 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudly	79
7.6	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM317 s výstup- ním napětím +15 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudly	80
7.7	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM317 s výstup- ním napětím +18 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudly	80

7.8	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +24 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	81
7.9	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím +5 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	81
7.10	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím +15 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	82
7.11	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru TPS7A4901 s výstupním napětím +24 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	82
7.12	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7905 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	83
7.13	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7915 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	83
7.14	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7918 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	84
7.15	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7924 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	84
7.16	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -5 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	85
7.17	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -15 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	85
7.18	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -18 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	86
7.19	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -24 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	86
7.20	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LT1964 s výstupním napětím -8,6 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	87
7.21	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LT1964 s výstupním napětím -18 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	88

7.22	Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru TPS7A3001 s výstupním napětím -24 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy	88
A.1	Použité součástky vazebního členu	96
A.2	Součástky přípravku pro automatické přepínání zátěže testovaného stabilizátoru napětí	99
A.3	Součástky základny modulu napěťového zdroje pro měření modulů lineárních stabilizátorů napětí	103
B.1	Součástky pro měřicí moduly napěťových stabilizátorů 7805, 7815, 7818 a 7824	105
B.2	Součástky pro měřicí moduly napěťových stabilizátorů 7905, 7915, 7918 a 7924	107
B.3	Součástky pro měřicí moduly napěťových stabilizátorů řady 317	108
B.4	Součástky pro měřicí moduly napěťových stabilizátorů řady 337	112
B.5	Součástky měřících modulů kladného stabilizátoru napětí $+48\text{ V}$ a $+200\text{ V}$	116
B.6	Součástky měřícího modulu záporného stabilizátoru napětí -48 V	119
B.7	Součástky modulů stabilizátoru ADP7104	121
B.8	Součástky modulu stabilizátoru LP2985A-50	123
B.9	Součástky modulu stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím 5 V	124
B.10	Součástky modulu stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím 15 V a 18 V	125
B.11	Součástky modulu stabilizátoru LT1964 s výstupním napětím -5 V	126
B.12	Součástky modulu stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím -15 V a -18 V	126
B.13	Součástky modulu stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím 5 V , 15 V a 18 V	128
B.14	Součástky modulu stabilizátoru záporného napětí TPS7A3001 s výstupním napětím -5 V , -15 V , -18 V a -24 V	130
B.15	Součástky modulu stabilizátoru kladného napětí TPS7A4901 s výstupním napětím 5 V , 15 V , 18 V a 24 V	132
B.16	Součástky modulu stabilizátoru kladného napětí s výstupním napětím $+5\text{ V}$ podle článku [29]	134
B.17	Součástky modulu stabilizátoru kladného napětí s výstupním napětím $+18\text{ V}$ složeného z diskrétních součástek	135

Seznam symbolů a zkratek

A/D	Analog to digital converter. Převodník z analogového signálu na digitální.
FFT	Fast Fourier Transformation. Rychlá Fourierova transformace.
k	Boltzmannova konstanta $\left(1,38 \cdot 10^{-23} \left[\frac{J}{\circ K}\right]\right)$.
CMRR	Common Mode Rejection Ratio. Činitel potlačení souhlasného rušení.
PSRR	Power Supply Rejection Ratio. Činitel potlačení zvlnění napájecího napětí.
ESR	Equivalent Series Resistance. Ekvivalentní sériový odpor.
LDO	Low Dropout regulator. Stabilizátor s nízkým úbytkem napětí.
VCO	Voltage Control Oscillator. Napětím řízený oscilátor
PLL	Fázový závěs. Phase locked loop.
LR	Odolnost vůči změnám vstupního napětí. Line regulation.
SMD	Elektronické součástky pro povrchové pájení. Surface mount device.
FET	Tranzistor řízený polem. Field effect transistor.
AP	Audio Precision.
DPS	Deska plošného spoje.
TTL	Tranzistorově tranzistorová logika. Transistor transistor logic.
SNR	Signal to Noise Ratio. Odstup signálu od šumového pozadí.

1

Úvod

Diplomová práce je zaměřena na porovnání šumových parametrů lineárních stabilizátorů řady 78xx, 79xx, 317, 337 a 723 s nízkošumovými lineárními stabilizátory od předních světových výrobců elektronických součástek Analog Devices, Texas Instruments, Linear Technology atd. Práce se zabývá vytvořením automatizovaného měřícího řetězce v prostředí Matlab, pro měření zvlnění, šumového napětí, činitele potlačení napájecího napětí a brumových složek signálu na výstupu stabilizátoru.

Cílem práce je nalezení optimální topologie napájecího řetězce pro napájení nízkopříkonových audio aplikací požadujících co nejmenší složky rušení, jako jsou audio předzesilovače, VCO, PLL, napěťové reference A/D a D/A převodníky atd. Napájecí řetězec obsahující lineární zdroj napětí nesmí zanášet do napájeného zařízení rušivé složky jako jsou zvlnění stabilizovaného napětí, šumové napětí a také brumové složky. Pro navržené napájecí zdroje byly použity lineární stabilizátory pro jejich lepší šumové vlastnosti než mají spínané napájecí zdroje. Jako vhodná alternativa k lineárním monolitickým stabilizátorům napětí bylo zvoleno zapojení lineárního stabilizátoru z diskretních součástek. Při optimalizaci tohoto zapojení byl kladen důraz na cenu jednotlivých komponent a na vlastnosti celého zapojení.

Z dostupných aplikačních poznámek od výrobců nízkošumových lineárních stabilizátorů napětí vyplývá, že mezi měřené veličiny těchto stabilizátorů patří činitel zvlnění napájecího napětí (PSRR) a efektivní hodnota výstupního šumového napětí. Většina autorů aplikačních poznámek používá jako napájecí napětí stabilizátorů monočlánek a celé zapojení je co nejdokonaleji stíněno obvykle v kovové krabici. Jako zdroj napětí pro stabilizátor nebude v této práci použit monočlánek ale modul napájecího zdroje případně stejnosměrný regulovaný zdroj pro napájení nízkošumových lineárních stabilizátorů napětí.

Pro správnou funkci napěťových stabilizátorů by měly být vysokofrekvenční složky ve výstupním napětí stabilizátoru menší než je úroveň, která ovlivňuje výsledky měření [1].

Program pro automatizované měření šumových parametrů, vytvořený v prostředí Matlab, počítá činitel zvlnění na výstupu stabilizátoru vzhledem k hladině výstupního stabilizovaného napětí, efektivní hodnotu šumového napětí na zadaném kmitočtovém intervalu a zobrazuje spektrum měřeného signálu na zadaném kmitočtovém intervalu. Uživa-

tel může zadat potlačení až dvaceti harmonických násobků kmitočtu 50 Hz pro odstranění brumových složek z měřeného signálu. Pokud uživatel požaduje potlačení násobků kmitočtu 50 Hz (brumových složek), zobrazí se frekvenční průběh s potlačenými brumovými složkami společně s průběhem, kde tyto složky nejsou potlačeny. Efektivní hodnota výstupního šumového napětí a činitel zvlnění se počítají z průběhu, ve kterém jsou brumové složky odfiltrovány.

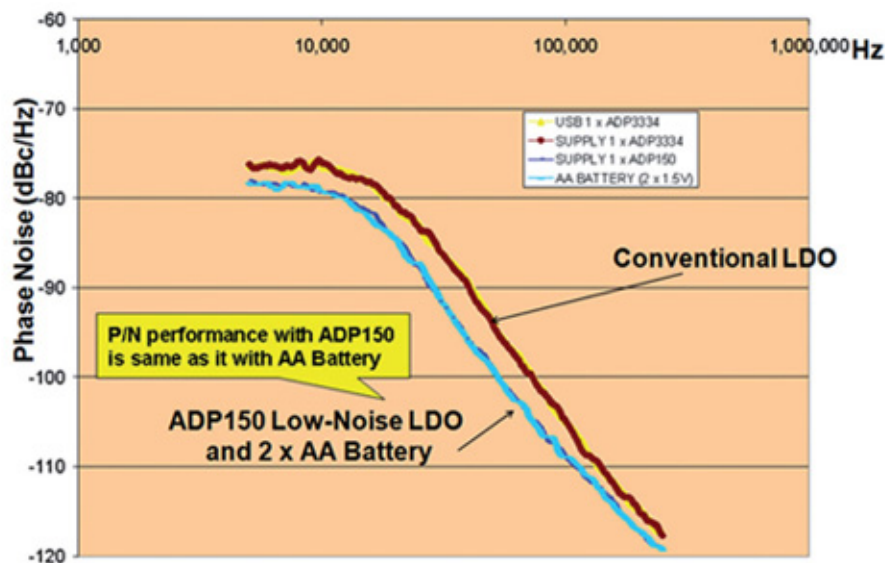
2

Popis parametrů lineárních stabilizátorů z hlediska šumu

2.1 Nízkošumové lineární stabilizátory pro citlivé analogové obvody

Ken Marasco ve svém článku s názvem „Low-noise LDOs enhance noise-sensitive analogue/RF circuits“ [6] se zabývá LDO stabilizátory pro napájení VCO. LDO stabilizátory jsou stabilizátory, které zachovávají výstupní napětí v širokém rozsahu zatěžovacích proudů. Napěťový úbytek může být například 80 mV při zatížení proudem 200 mA. Tyto stabilizátory se skládají z napěťové reference, chybového zesilovače, zpětnovazebního napěťového děliče a tranzistoru. Napětí tranzistoru je řízeno zesilovačem odchylky, který porovnává referenční napětí se zpětnovazebním napětím a zesiluje rozdíl pro snížení chybového napětí. Autor popisuje nízkošumový napěťový stabilizátor ADP150. Na vstup stabilizátoru ADP150 lze přivést napětí od 2,2 V do 5,5 V, jeho výstupní napětí je 1,8 V a maximální proudové zatížení je 150 mA. Stabilizátor dosahuje hodnoty výstupního šumového napětí $9 \mu\text{V}$ v pásmu od 10 Hz do 100 kHz, činitel PSRR je 70 dB. Autor došel k závěru, že ESR výstupního kondenzátoru ovlivňuje stabilitu LDO stabilizátoru. Výrobce doporučuje minimální kapacitu výstupního keramického kondenzátoru $1 \mu\text{F}$ s ekvivalentním sériovým odporem (ESR) pod 1Ω . Výstupní kapacita ovlivňuje i přechodovou odezvu při změnách výstupního zatížení. Čím vyšší kapacita, tím lepší přechodová odezva. Připojením kondenzátoru o kapacitě $1 \mu\text{F}$ na vstup stabilizátoru se sníží citlivost obvodu na vysokou vstupní impedanci zdroje nebo vůči dlouhým přívodům na desce plošného spoje. Moderní nízkošumové napěťové stabilizátory s využitím inovativní topologie obvodu dosahují velmi nízkých hodnot výstupního šumového napětí, řádově desítky μV v pásmu od 10 Hz do 100 kHz, což je důležité pro napájení citlivých analogových vysokofrekvenčních aplikací [6].

Na obrázku 2.1 jsou znázorněny velikosti fázového šumu na výstupu testovaného VCO napájeného ze stabilizátorů ADP3334 a ADP150. Na vstup stabilizátoru ADP3334 lze



Obr. 2.1: Závislost fázového šumu na frekvenci na výstupu VCO napájeného konvenčním LDO stabilizátorem ADP3334 a nízkošumovým stabilizátorem ADP150, které byly napájeny monočlánsky |Převzato z [6]]

přivést vstupní napětí od 2,6 V do 11 V, výstupní napětí je od 1,5 V do 10 V s proudovým zatížením až 500 mA. Průběhy znázorňují výkon o velikosti jedné třetiny fázového šumu na výstupu VCO.

2.2 Zvýšení činitele potlačení zvlnění napájecího napětí lineárních stabilizátorů

Aplikační poznámka společnosti MAXIM „Improved Power-Supply Rejection for Linear Regulators“ [8] se zabývá třemi způsoby zvýšení činitele potlačení zvlnění napájecího zdroje (PSRR). Autor uvádí rozdíl mezi činitelem potlačení napájecího napětí (PSRR) a odolností vůči změnám vstupního napětí (Line Regulation) LR, který je definován v praxi dle používané rovnice 2.1. Tento parametr udává procentní změnu výstupního napětí stabilizátoru v závislosti na změně stejnosměrné složky vstupního napětí.

$$LR = \frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta U_{IN}} \frac{100}{U_{OUT}} \quad [\%/V] \quad (2.1)$$

U_{OUT} je výstupní napětí, ΔU_{OUT} je změna stejnosměrné složky výstupního napětí a ΔU_{IN} je změna stejnosměrné složky vstupního napětí.

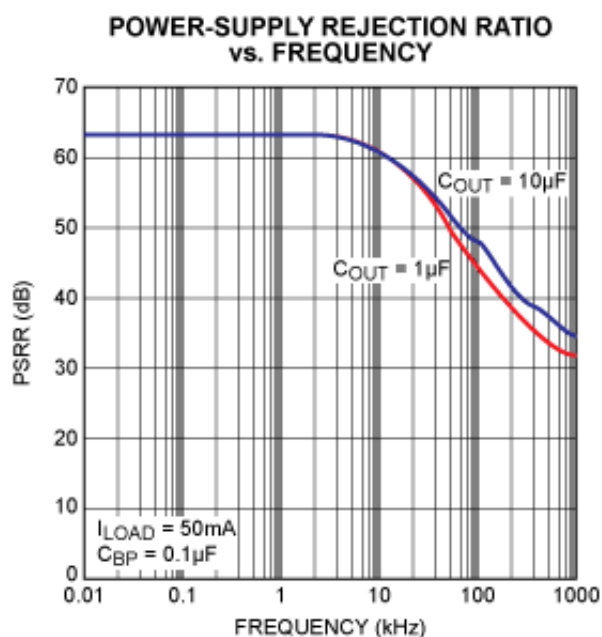
Parametr LR udává procentuální změnu výstupního napětí v závislosti na změně vstupního napětí v ustáleném stavu, protože tento parametr vychází ze stejnosměrných hodnot napětí, nevyjadřuje šumové a ani jiné poměry platné pro popis střídavých signálů na výstupu stabilizátoru.

PSRR vyjadřuje míru potlačení harmonického signálu na výstupu stabilizátoru. Činitel PSRR nevyjadřuje velikost vlastního šumu na výstupu stabilizátoru. Pro měření činitele PSRR je potřeba monitorovat vstupní a výstupní zvlnění (změnu) střídavé složky signálu v závislosti na kmitočtu.

$$PSRR = 20 \log \frac{\delta U_{OUT}}{\delta U_{IN}} \quad [dB] \quad (2.2)$$

Rovnice 2.2 udává výpočet činitele potlačení zvlnění napájecího napětí PSRR. Tento činitel je maximální na frekvencích desítek Hz. Klesá se vzrůstajícím kmitočtem v okolí frekvence 1 kHz nebo 10 kHz podle návrhu stabilizátoru. δU_{OUT} je změna střídavé složky výstupního napětí a δU_{IN} je změna střídavé složky vstupního napětí.

Typický průběh činitele PSRR udává obr. 2.2. Tento činitel lze vylepšit přidáním výstupní kapacity o velikosti $10\mu F$ na výstup lineárního napěťového stabilizátoru, viz obrázek 2.2. Na vstup lineárního stabilizátoru MAX8867 lze přivést napětí o velikosti od 2,5 V do 5,5 V, výstupní napětí lze nastavit v rozmezí 2,5 V až 5 V. Stabilizátor MAX8867 lze zatížit proudem až 150 mA.



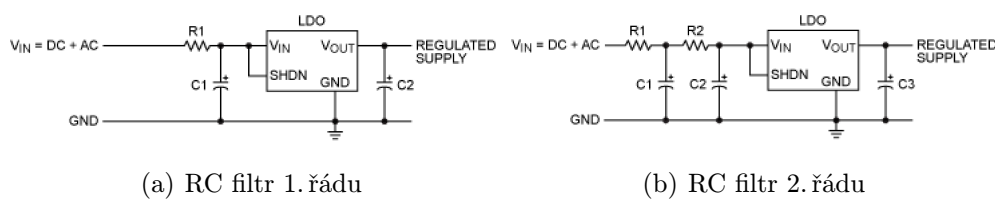
Obr. 2.2: Frekvenční charakteristika činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) lineárního napěťového stabilizátoru MAX8867 při použití rozdílných velikostí výstupních kapacit při zatěžovacím proudu 50 mA [Převzato z [8]]

Činitel PSRR lze zvýšit třemi způsoby. Prvním způsobem je použití jednoho nebo kaskády RC filtrů, další možností je použití LC filtru a poslední možností je využití dalšího lineárního stabilizátoru spojeného do kaskády společně s nízkošumovým stabilizátorem.

2.2.1 Zvýšení činitele potlačení zvlnění napájecího napětí pomocí jednoho nebo kaskády RC filtrů

Sériové rezistory RC filtru musí mít co nejmenší odpor, aby se minimalizovaly výkonové ztráty vzniklé průchodem proudu rezistorem. Kondenzátory musí mít vysokou kapacitu. Obvykle se používají RC členy, kde je hodnota rezistoru $1\ \Omega$, případně $10\ \Omega$. Na vstupu RC filtru je předpokládána nízká impedance, z důvodu stability kaskády pasivního RC filtru a stabilizátoru se nedoporučuje velikost rezistoru větší než $200\ \Omega$. Doporučené velikosti kondenzátorů RC filtru jsou desítky μF [8]. Kondenzátory musejí mít velmi nízkou hodnotu ESR, protože konečný útlum je určen podle rovnice 2.3, která udává velikost útlumu činitele PSRR v dB [8]. ESR kondenzátorů musí být mnohokrát menší než odpor rezistoru R případně R_1 a R_2 , jinak dochází k omezení činitele PSRR. Typická zapojení RC filtrů k lineárním stabilizátorům jsou na obr. 2.3.

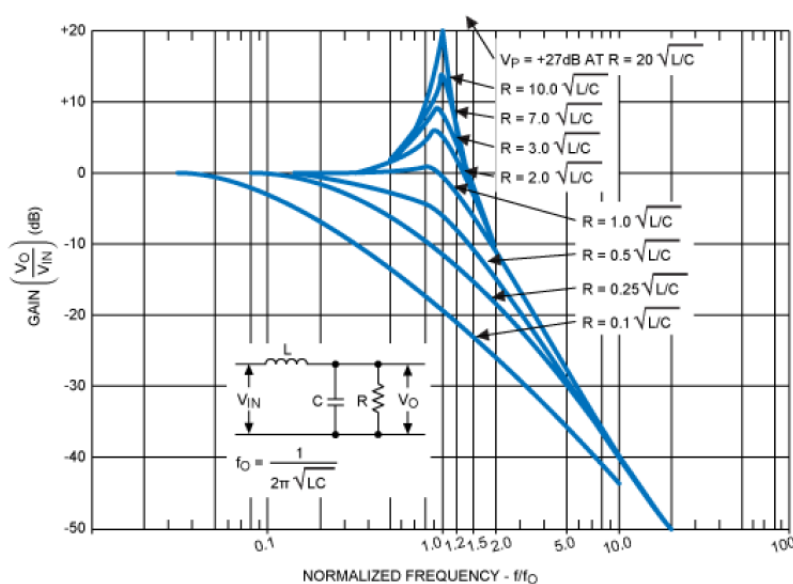
$$dB_{ATTEN} = 20 \log \frac{R_{ESR}}{R + R_{ESR}} \quad (2.3)$$



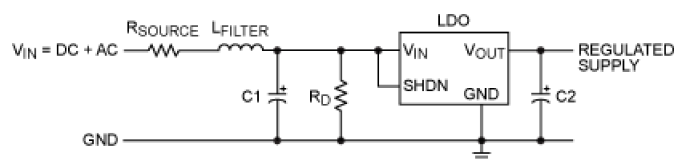
Obr. 2.3: Příklad zapojení RC filtru 1. a 2. řádu na vstupu LDO stabilizátoru společně s výstupním kondenzátorem |Převzato z [8]|

2.2.2 Zvýšení činitele potlačení zvlnění napájecího napětí pomocí LC filtru

Možný problém při využití toho typu filtru je nízká hodnota vlastního tlumení (nárůst impedance v okolí rezonančního kmitočtu) na vstupu stabilizátoru. Impedance zdroje napětí je nízká, ale vstupní svorky lineárního stabilizátoru představují vysokou impedanci paralelně s kondenzátorem o kapacitě desítky μF . Je nemožné tlumit LC síť na vstupu stabilizátoru pomocí paralelního rezistoru bez poklesu stejnosměrného napětí. Kombinace indukčnosti a kapacity představuje na svém rezonančním kmitočtu zvýšenou impedanci mezi vstupem stabilizátoru a zemní svorkou viz obr. 2.4, při návrhu filtru je vhodné posunout kritický kmitočet LC filtru na co nejnižší frekvence, zde je ovšem problém s velikostí indukčnosti.



Obr. 2.4: Amplitudové charakteristiky LC filtru pro různé tlumící poměry [Převzato z [8]]

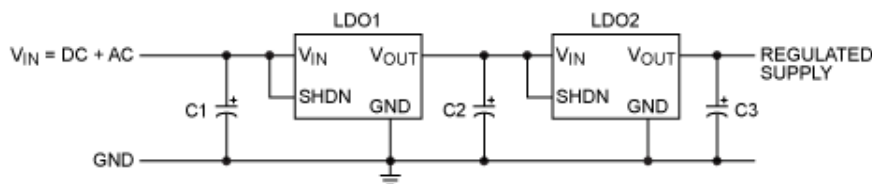


Obr. 2.5: Zapojení LC filtru na vstup lineárního stabilizátoru a umístění dumping rezistoru [Převzato z [8]]

2.2.3 Zvýšení činitele potlačení zvlnění napájecího napětí s využitím dalšího lineárního stabilizátoru spojeného do kaskády

Výhodou této metody je úspora místa na desce plošného spoje. Pokud jsou použity dva stejné lineární stabilizátory v sérii, zdvojnásobí se hodnota činitele PSRR na daném kmi-

točtu. Nevýhodou je zdvojnásobení úbytku napětí na stabilizátorech. Výrobce doporučuje rozdělit napěťový úbytek na oba stabilizátory. Na obr. 2.6 je znázorněno zapojení dvou lineárních stabilizátorů do kaskády s použitím třech keramických kondenzátorů o kapacitě jednotek μF .



Obr. 2.6: Sériové spojení dvou lineárních napěťových stabilizátorů do kaskády pro zvýšení činitele PSRR [Převzato z [8]]

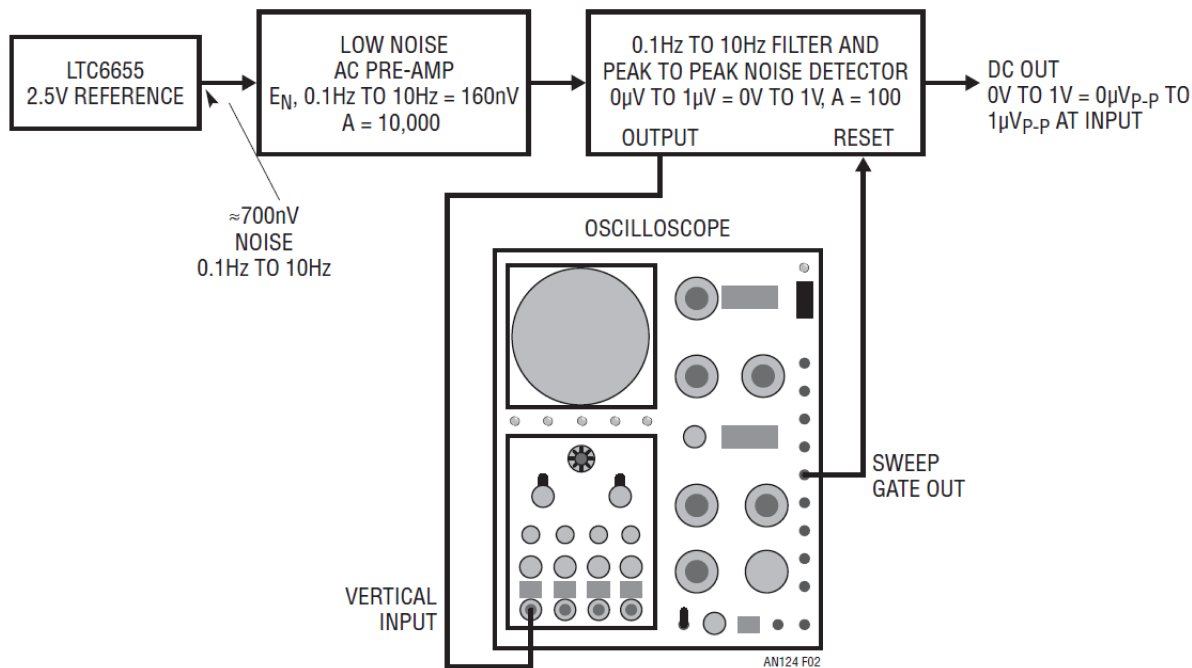
2.3 Měření extrémně nízkého šumového napětí lineárních stabilizátorů

Jim Williams se v aplikační poznámce s názvem „775 Nanovolt Noise Measurement for A Low Noise Voltage Reference“ [9] zabývá měřením šumového napětí na frekvenčním rozsahu 0,1 Hz až 10 Hz. Šum měřil pomocí bateriového zdroje, ke kterému byl připojen nízkošumový stabilizátor LTC6655, hodnota šumového napětí byla naměřena 775 nV na frekvenčním rozsahu 0,1 Hz až 10 Hz [9].

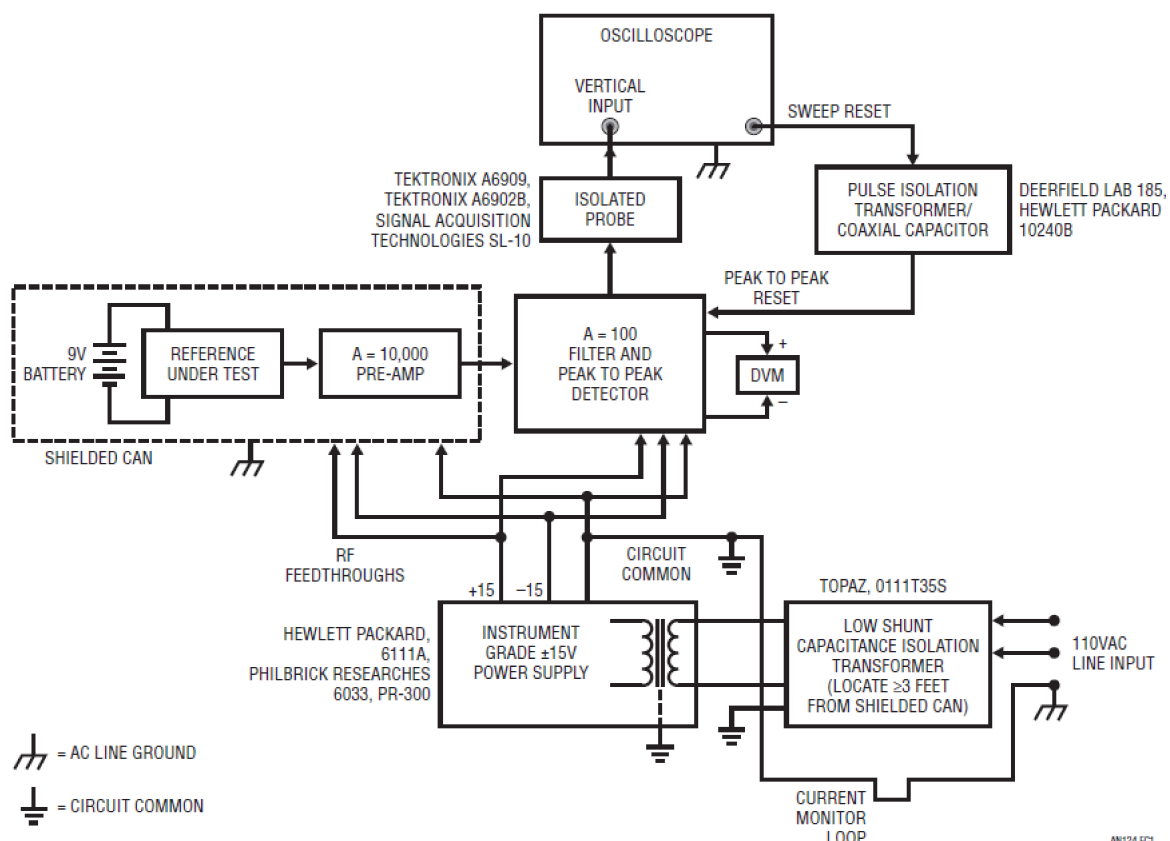
Měřicí řetězec pro měření extrémně nízké hodnoty šumového napětí obsahuje měřený nízkošumový lineární napěťový stabilizátor, měřící nízkošumový předzesilovač s vlastním šumovým napětím 160 nV na frekvenčním rozsahu 0,1 Hz až 10 Hz, filtr pro šířku frekvenčního pásma 0,1 Hz až 10 Hz se šumovým špičkovým detektorem, připojeným k vertikálnímu vstupu osciloskopu. Výstup rozmítání osciloskopu resetuje šumový detektor viz obr 2.7.

Autor v článku popisuje mechanickou konstrukci celého měřícího přípravku. Deska měřícího přípravku je uzavřena ve stíněné krabici, tepelné zdroje se musí nacházet v co největší vzdálenosti od zesilovače s JFET tranzistory. Vstupní speciální tantalový kondenzátor je použit pro minimalizaci stejnosměrného svodového proudu tekoucího do vstupu měřícího předzesilovače. Tento kondenzátor pracuje s malou hodnotou napětí, než na které je dimenzovaný. To má za následek mnohem nižší svod ($<5 \text{ nA}$) než udává výrobce kondenzátoru [9].

Stínění a zemnění je provedeno společně pro bateriový zdroj, testovaný lineární stabilizátor a předzesilovač. Zdroj pro napájení předzesilovače, filtr i celý měřící objekt je zemněn zemnicím bodem napájecí sítě viz obr. 2.8.



Obr. 2.7: Zapojení pro měření extrémně nízké hodnoty šumového napětí pro frekvenční rozsah od 0,1 Hz do 10 Hz [Převzato z [9]]

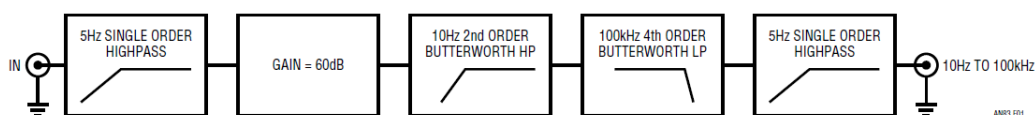


Obr. 2.8: Blokové schéma měřicího řetězce pro měření lineárního stabilizátoru s extrémně nízkým šumovým napětím a rozvod napájení, zemnění a stínění [Převzato z [9]]

2.4 Testování nízkošumových, nízkoúbytkových stabilizátorů

Autoři článku „Performance Verification of Low Noise, Low Dropout Regulators“ [10] se zabývají napěťovými stabilizátory pro oblasti telekomunikací, datových sítí a audio zařízení, které vyžadují nízkošumové napájecí zdroje. V článku autoři popisují postup měření těchto stabilizátorů pomocí přípravku, kde vstupní napětí zabezpečují bateriové články, které jsou společně se stabilizátorem a doporučenými kondenzátory odstíněné v kovové krabici.

Pro měření šumového napětí se používá měřící pásmo kmitočtů od 10 Hz do 100 kHz, protože lineární stabilizátory neprodukují širokopásmové rušení narozdíl od spínaných zdrojů. Na obr. 2.9 je struktura filtrů pro testování LDO stabilizátorů. Filtry typu Butterworth se skládají z filtru typu horní propust se zlomovým kmitočtem 10 Hz a filtru typu dolní propust se zlomovým kmitočtem 100 kHz. Tyto filtry zajišťují strmý sklon a vyrovnanou frekvenční charakteristiku v propustném pásmu celého filtru. Vstupní šumové napětí je zesíleno pro další zpracování filtry typu Butterworth.



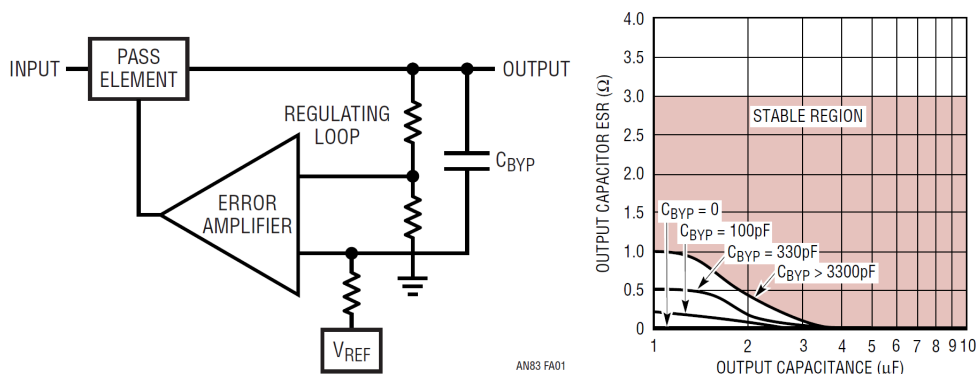
Obr. 2.9: Struktura filtrů pro testování LDO stabilizátorů |Převzato z [10]|

Zlepšení činitele potlačení napájecího napětí (PSRR) lze dosáhnout přidáním keramickým kondenzátorem C_{BYP} s nízkým ESR o velikosti desítek μF umístěným na svorce interního zdroje referenčního napětí lineárního stabilizátoru viz obr. 2.10. Zlepšením činitele PSRR dochází k minimalizaci šumového napětí stabilizátoru [10]. Autor naměřil efektivní hodnotu šumu $20 \mu\text{V}$ ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz na nízkošumovém stabilizátoru LT1761.

Pro zabránění oscilací je doporučeno umístit na výstupní svorky lineárního stabilizátoru kondenzátor o kapacitě minimálně $3,3 \mu\text{F}$ a ESR maximálně 3Ω [10].

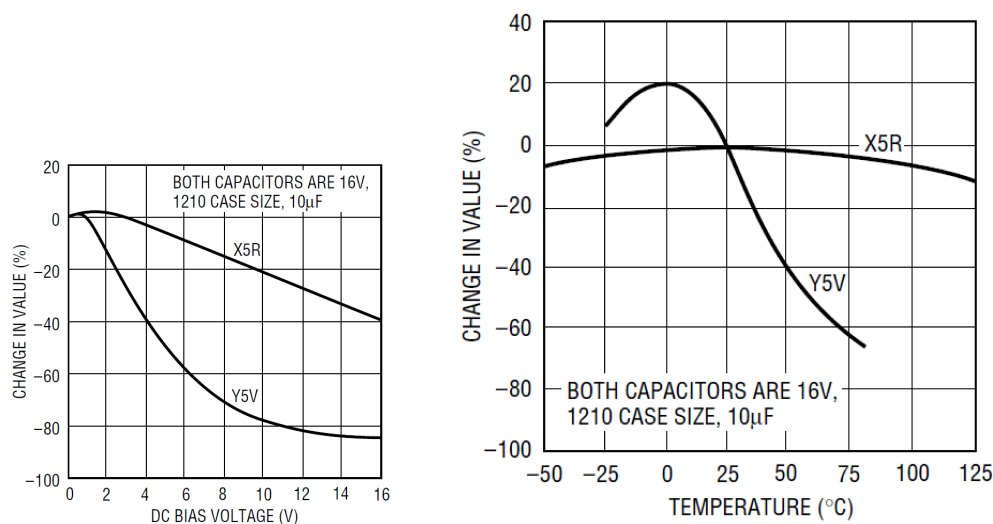
Keramické kondenzátory pro zvýšení činitele PSRR a snížení šumového napětí musejí být vyrobeny z dielektrika s označením Z5U, Y5V, X5R nebo X7R. Dielektrika Z5U a Y5V umožňují vyrobit kondenzátor s vysokou kapacitou při zachování malých rozměrů. Kondenzátory s dielektriky X5R a X7R se vyznačují vyšší stabilitou kapacity kondenzátoru na vyšších kmitočtech a vyšší stabilitou kapacity kondenzátoru se vzrůstající teplotou [10] viz obr. 2.11. Dielektrikum X7R se vyznačuje vyšší stabilitou kapacity kondenzátoru při změně teploty a dielektrikum X5R je levnější a kondenzátory s tímto dielektrikem nemění kapacitu při vyšší hodnotách přiloženého napětí.

Výběru voltmetru pro měření efektivní hodnoty musí být věnována značná pozornost, protože většina voltmetrů na trhu není schopna změřit správnou hodnotu šumu. Voltmetr



(a) Blokové schéma zapojení nízkošumového LDO stabilizátoru (b) Vyznačení oblasti stability LDO stabilizátoru v závislosti na ESR výstupního blokovacího kondenzátoru

Obr. 2.10: Výběr a umístění výstupního kondenzátoru lineárního stabilizátoru napětí [Převzato z [10]]

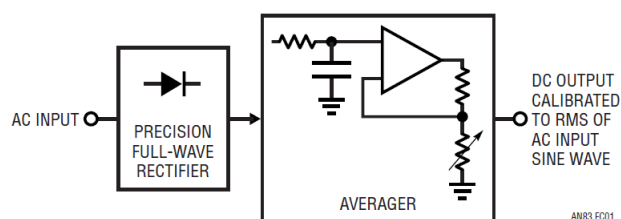


(a) Změna kapacity v závislosti na přiloženém napětí (b) Změna kapacity v závislosti na teplotě

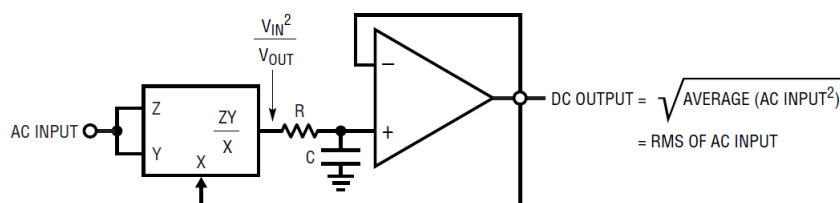
Obr. 2.11: Procentní změna kapacity keramických kondenzátorů vyrobených z dielektrika X5R a X5V v závislosti na přiloženém napětí (a) a na teplotě (b) [Převzato z [10]]

s měřícím termočlánkem je schopný změřit efektivní hodnotu šumového napětí bez ohledu na průběh měřeného napětí.

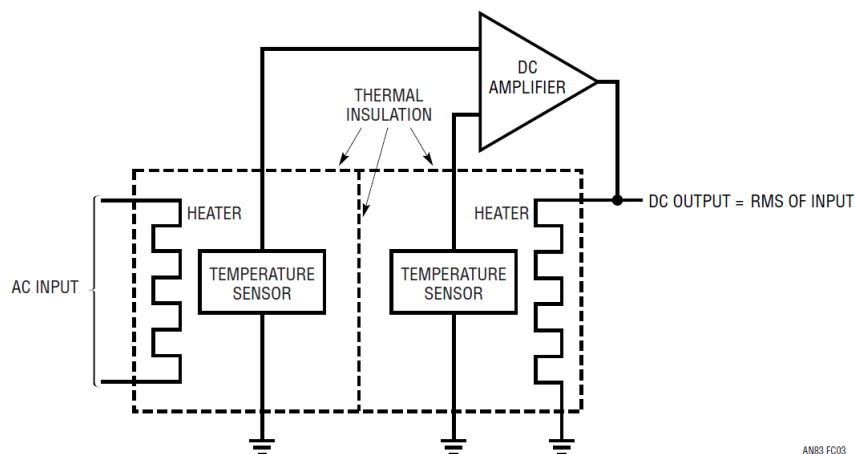
Běžná zapojení voltmetru s celovlnným usměrňovačem viz obr. 2.12 (a) jsou vhodná pro měření signálu sinusového průběhu. Voltmetr založený na analogovém výpočtu pomocí násobičky viz obr. 2.12 (b) je přesnější než voltmetr s usměrňovačem, okamžitá hodnota se zde vypočítává pomocí analogové zpětnovazební smyčky viz obr. 2.12. Voltmetr s měřícím termočlánkem viz obr. 2.12 (c) není citlivý na průběh měřeného napětí. Pokud je měřen signál různými typy voltmetrů, může vzniknout chyba při porovnávání těchto výsledků.



(a) Zapojení voltmetru s usměrňovačem



(b) Zapojení voltmetru s analogovým průměrováním ve zpětné vazbě



(c) Zapojení voltmetru s měřícím termočlánkem

Obr. 2.12: Voltmetry pro měření šumového napětí [Převzato z [10]]

2.5 Souhrn parametrů pro další postup návrhu zapojení lineárních stabilizátorů

Nízkošumové lineární stabilizátory napětí dosahují šumového výstupního napětí řádově jednotky až desítky μV ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz. Pro zlepšení stability stabilizátorů je vhodné umístit na výstupní svorky stabilizátoru kondenzátor o kapacitě jednotek μF s ekvivalentním sériovým odporem (ESR) nižším než $1\ \Omega$. Pro měření velmi nízkého šumového napětí je vhodné stabilizátory napájet z bateriového zdroje.

Činitel potlačení napájecího napětí (PSRR) vyjadřuje míru potlačení harmonického signálu na výstupu stabilizátoru. PSRR lze vylepšit přidáním jednoho nebo kaskády RC filtrů na vstup stabilizátoru, kondenzátory v RC filtru musí mít co nejnižší hodnotu ESR, rezistory RC filtru musí mít hodnotu odporu maximálně $200\ \Omega$. Dále lze PSRR vylepšit pomocí LC filtru, zde je problém s nárůstem impedance v okolí rezonančního kmitočtu. PSRR lze také vylepšit přidáním dalšího stabilizátoru do kaskády s měřeným stabilizátorem.

Vazební kondenzátor musí být vybírán s ohledem na velikost svodového proudu. Pokud je dostatečně napěťově dimenzován, je velikost svodového proudu nižší než udává výrobce. Autor používá tantalový kondenzátor od firmy Vishay s kapacitou $1300\ \mu\text{F}$ na napětí 30 V. Autor měří svodový proud při výběru vhodného kondenzátoru pomocí mikrovoltmetru. Kondenzátor je napájen z 3 V baterie, zatížen rezistorem $1\ \text{k}\Omega$. Měření probíhá po dobu 24 hodin a výslednou výchylky na mikrovoltmetru lze přepočítat jako $1\ \text{nA} = 1\ \mu\text{V}$. Tantalové kondenzátory jsou pro použití jako vazební kondenzátor lineárních stabilizátorů vhodné, ale jsou velmi drahé. Autor používá jako zdroj napětí bateriové články, v této diplomové práci nebudou stabilizátory napájeny z baterií.

Pro testování nízkošumových stabilizátorů lze použít jako vstupní napětí napětí z bateriových článků, v této práci nebudou testované stabilizátory napájeny tímto způsobem z důvodu získání šumových poměrů shodných s praktickým použitím těchto stabilizátorů. Pro zvýšení činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) a snížení efektivní hodnoty výstupního šumového napětí se používají keramické kondenzátory o kapacitě jednotek μF umístěné na výstupních svorkách lineárních stabilizátorů. Nejpoužívanější dielektrika těchto kondenzátorů jsou X5R a X7R. Tato dielektrika mají jen nepatrnou procentní změnu kapacity v závislosti na přiloženém napětí a na teplotě. Pro měření efektivní hodnoty výstupního šumového napětí nízkošumových lineárních stabilizátorů je nejvhodnější použít voltmetr s měřícím termočlánkem, který není závislý na průběhu vstupního signálu. Pro sinusové signály lze použít voltmetr s usměrňovačem nebo voltmetr s analogovým průměrováním. Při porovnávání nízkošumových stabilizátorů může vzniknout chyba při použití různých typů měřících přístrojů.

2.6 Šumové parametry lineárních stabilizátorů a metody jejich zlepšení

Z hlediska šumu, se na lineárních stabilizátorech se měří činitel potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR), který výrobci udávají na jednom kmitočtu, který je obvykle 120 Hz (100 Hz) případně 1 kHz nebo jako frekvenční závislost v pásmu 10 Hz až 100 kHz. PSRR vyjadřuje míru potlačení harmonického signálu na výstupu stabilizátoru. Harmonický signál je přiveden na vstupní svorky měřeného lineárního stabilizátoru a na výstupu stabilizátoru je zjišťována míra jeho potlačení.

Efektivní hodnota výstupního šumového napětí lineárního stabilizátoru se udává na kmitočtovém rozsahu od 10 Hz do 100 kHz, protože lineární stabilizátory neprodukují širokopásmové rušení na rozdíl od spínaných zdrojů.

Pro zvýšení činitele PSRR a minimalizaci šumového napětí doporučují výrobci použití keramický nebo tantalový kondenzátor s dielektrikem s označením X5R nebo X7R o velikosti několik desítek μF připojený na výstup lineárního stabilizátoru. Tyto typy dielektrika vynikají malou procentní chybou změny kapacity při působení rozdílných teplot nebo různých velikostí napětí na kondenzátoru. Činitel PSRR lze vylepšit také přidáním jednoho nebo kaskády RC popřípadě LC filtrů na vstup lineárního stabilizátoru. U RC a LC filtrů je potřeba použít kondenzátory s velmi nízkým ekvivalentním sériovým odporem (ESR), nižším než $1\ \Omega$. Velikost činitele PSRR lze až zdvojnásobit použitím dvojice lineárních stabilizátorů zapojených do kaskády. Tato metoda je velice vhodná z hlediska zabrané plochy desky plošného spoje.

Pro měření lineárních stabilizátorů s extra nízkým šumovým napětím se používají jako zdroj napětí monočlánky z důvodu zanesení co nejnižší hodnoty šumového napětí ze zdroje.

Výrobci doporučují umístit vstupní a výstupní keramické kondenzátory s kapacitou jednotek μF co nejbližší vstupním a výstupním svorkám obvodu a zemní svorce (ADJ). Tyto kondenzátory jsou vyrobeny technologií SMD o velikostech 0603 nebo 0805, případně 1206. Vazební kondenzátory o velikosti jednotek až desítek μF musí mít co nejnižší hodnotu (méně než $3\ \Omega$) ekvivalentního sériového odporu (ESR). Pro vazební kondenzátory se používají elektrolytické tantalové případně hliníkové kondenzátory. Tantalové kondenzátory mají velmi nízkou hodnotu svodového proudu, ale jsou dražší než hliníkové. Pokud jsou kondenzátory napěťově naddimenzovány, je hodnota svodového proudu nižší než s jakou počítají výrobci kondenzátorů. Tantalové kondenzátory nebudou v této práci použity z cenového hlediska.

Celý měřicí přípravek pro měření nízkošumových lineárních kondenzátorů by měl být odstíněn od okolních vlivů například v kovové krabici. Efektivní hodnota šumového napětí se měří voltmetrem pro měření efektivní hodnoty. Pro měření efektivní hodnoty výstupního šumového napětí lineárního stabilizátoru lze použít voltmetr s měřícím termočlánkem, na který nemá vliv tvar měřeného signálu, také lze použít voltmetr s usměrňovačem,

se kterým lze měřit pouze sinusové signály nebo voltmetr s analogovým průměrováním. Při použití jiného typu měřicího přístroje nebo při měření jiného průběhu signálu, než pro který je měřicí přístroj určen může dojít k rozdílům naměřených hodnot při porovnání například s hodnotami udávanými výrobcem.

V této diplomové práci budou lineární stabilizátory měřeny pomocí audio analyzátoru Audio Precision AP SYS2722 a dále zpracovány v programu Matlab.

3

Přehled monolitických lineárních integrovaných stabilizátorů napětí

V dnešní době se ve velké většině používají monolitické lineární stabilizátory pro napájení nevýkonových aplikací. Lineární stabilizátory se používají pro napájení nízkošumových aplikací, kde nelze využít princip spínaných zdrojů, protože do obvodu zanášejí rušivé vlivy. Ty vznikají při spínání velmi vysokých frekvencí v řádech stovek kHz. Při výběru monolitických lineárních napěťových stabilizátorů pro měření šumových parametrů byly voleny klasické, běžně dostupné napěťové stabilizátory, společně s nejmodernějšími stabilizátory od největších světových výrobců.

3.1 Monolitické integrované stabilizátory napětí řady 78xx a 79xx

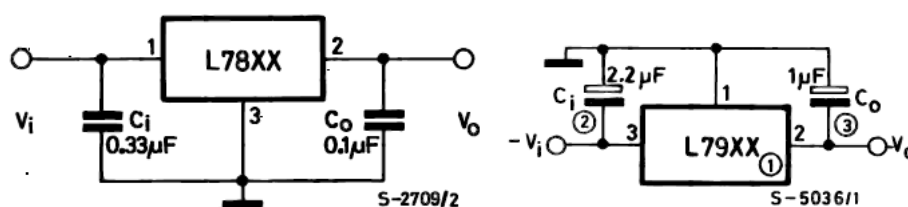
Nejrozšířenějšími typy monolitických integrovaných stabilizátorů napětí s proudovým zatížením do 1 A jsou integrované stabilizátory řady 78xx a 79xx, které jsou historicky známé již z počátku 70-tých let. Stabilizátory označené 78xx jsou stabilizátory s kladným výstupním napětím a 79xx jsou stabilizátory se záporným výstupním napětím. Stabilizátory disponují výstupním napětím od ± 5 V postupně až do ± 24 V. Tyto stabilizátory se vyrábějí pro proudová zatížení s označením L: 100 mA, M: 500 mA až do zatížení 2 A. Například označení 78L05 znamená integrovaný stabilizátor s výstupním napětím 5 V a maximálním proudovým zatížením 100 mA. Tyto stabilizátory jsou vyráběny v pouzdrech podle jejich proudového zatížení. Nejčastěji se setkáme s pouzdrem TO 220, TO 3, TO 92 nebo ISOWAT [3]. Stabilizátory řady 78xx respektive 79xx stabilizující vstupní napětí do 35 V pro výstupní napětí od ± 5 V do ± 18 V respektive 40 V pro ± 20 V a ± 24 V.

Stabilizátory řady 78xx a 79xx mají hodnoty šumové napětí měřeny pro šířku pásma 10 Hz až 100 kHz. Stabilizátory kladného napětí řady 7805 má hodnotu šumového napětí $200 \mu\text{V}$, stabilizátor 7815 má hodnotu šumového napětí $600 \mu\text{V}$, stabilizátor 7818 má hodnotu šumového napětí $720 \mu\text{V}$ a napěťový stabilizátor 7824 má šumové napětí $960 \mu\text{V}$ [15].

Stabilizátor záporného napětí -5 V (7905C) má šumové napětí $100\ \mu\text{V}$, stabilizátor napětí -15 V (7915C) má hodnotu šumového napětí $250\ \mu\text{V}$, pro napětí -18 V (7918C) je hodnota šumového napětí $300\ \mu\text{V}$ a pro napětí -24 V (7924C) je hodnota šumového napětí $400\ \mu\text{V}$ [16].

Stabilizátor kladného napětí $+5\text{ V}$ má hodnotu činitele PSRR 68 dB na frekvenci 120 Hz . Stabilizátor napětí $+15\text{ V}$ řady 78xx má hodnotu činitele PSRR 60 dB na frekvenci 120 Hz , stabilizátor napětí $+18\text{ V}$ má hodnotu činitele PSRR 59 dB na frekvenci 120 Hz a pro napětí $+24\text{ V}$ je hodnota činitele PSRR 56 dB na frekvenci 120 Hz [15]. Stabilizátory řady 79xx pro záporná napětí -5 V , -15 V , -18 V a -24 V mají hodnotu činitele PSRR 60 dB na frekvenci 120 Hz [16].

Doporučená schémata zapojení pro stabilizátory kladného a záporného napětí řady 78xx a 79xx jsou na obrázku 3.1.



(a) Lineární stabilizátor kladného napětí řady 78xx |Převzato z [15]| (b) Lineární stabilizátor záporného napětí řady 79xx |Převzato z [16]|

Obr. 3.1: Doporučené zapojení lineárních napěťových stabilizátorů pro kladné a záporné výstupní napětí řady 78xx a 79xx

Cena stabilizátoru řady 78xx a 79xx ke dni 25. 3. 2012 je: 7,90 CZK/1 ks (ges.cz).

3.2 Monolitické integrované stabilizátory napětí s regulovatelným výstupním napětím řady 317 a 337

Integrované stabilizátory s označením 317 a 337 jsou ekvivalentem řady 78xx a 79xx s možností regulace výstupního napětí v rozmezí daném odporovým děličem. Lineární stabilizátor 317 stabilizuje kladné výstupní napětí. Stabilizátor 337 stabilizuje záporné výstupní napětí. Vnitřní referenční napětí stabilizátorů a zároveň minimální nastavitelná hodnota napětí na výstupu stabilizátoru řady 317 a 337 je $1,25\text{ V}$. Maximální regulované napětí nesmí přesáhnout hodnotu 40 V a maximální povolené proudové zatížení $1,5\text{ A}$. Tento typ lineárního stabilizátoru lze použít i jako stabilizátor s proměnným výstupním napětím pomocí potenciometru v odporovém děliči [3].

Lineární stabilizátor kladného napětí řady 317 a záporného napětí řady 337 mají výstupní hodnotu šumového napětí na kmitočtovém rozsahu 10 Hz až 100 kHz podle nastaveného výstupního napětí. Pokud je výstupní napětí $\pm 5\text{ V}$, hodnota šumového napětí

na výstupu stabilizátoru je $150 \mu\text{V}$ na daném kmitočtovém rozsahu. Při výstupní hodnotě napětí $\pm 15 \text{ V}$ je šumové napětí $450 \mu\text{V}$ na daném frekvenčním rozsahu, při napětí $\pm 18 \text{ V}$ je šumové napětí $540 \mu\text{V}$ a při napětí $\pm 24 \text{ V}$ je hodnota šumového napětí $720 \mu\text{V}$ na daném kmitočtovém rozsahu [17], [18].

Velikost činitele PSRR pro lineární stabilizátor kladného napětí řady 317 je 64 dB na kmitočtu 120 Hz při použití kondenzátoru C_{ADJ} , který je umístěn mezi výstupem ADJUSTMENT a zemní svorkou obr. 3.2 o velikosti $10 \mu\text{F}$. Činitel PSRR pro stabilizátor záporného napětí řady 337 na kmitočtu 120 Hz při použití kondenzátoru C_{ADJ} je 77 dB viz obr. 3.2 o velikosti $10 \mu\text{F}$.

Ochranné diody D_1 a D_2 typického zapojení stabilizátoru řady 317 chrání výstup před vybíjením kondenzátoru C_{ADJ} [17]. Velikost výstupního napětí lze určit podle rovnice 3.1, kde V_{REF} je referenční napětí a velikost vyrovnávacího proudu I_{ADJ} je $50 \mu\text{A}$.

$$V_O = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} R_2 \quad (3.1)$$

Kondenzátory C_1 a C_2 typického zapojení stabilizátoru záporného napětí řady 337 na obr. 3.2 jsou tantalové kondenzátory o kapacitě $1 \mu\text{F}$. Velikost rezistoru R_1 doporučená výrobcem je 120Ω . Výstupní napětí lze nastavit pomocí odporového děliče podle rovnice 3.2, kde V_O je výstupní hodnota napětí ve voltech [18]. Proud I_{ADJ} je typicky $65 \mu\text{A}$.

$$-V_O = -V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + (-I_{ADJ} R_2) \quad (3.2)$$

Cena stabilizátoru řady 317 ke dni 25. 3. 2012 je: 6,90 CZK/1 ks (ges.cz). Cena stabilizátoru řady 337 ke dni 25. 3. 2012 je: 11,90 CZK/1 ks (ges.cz).

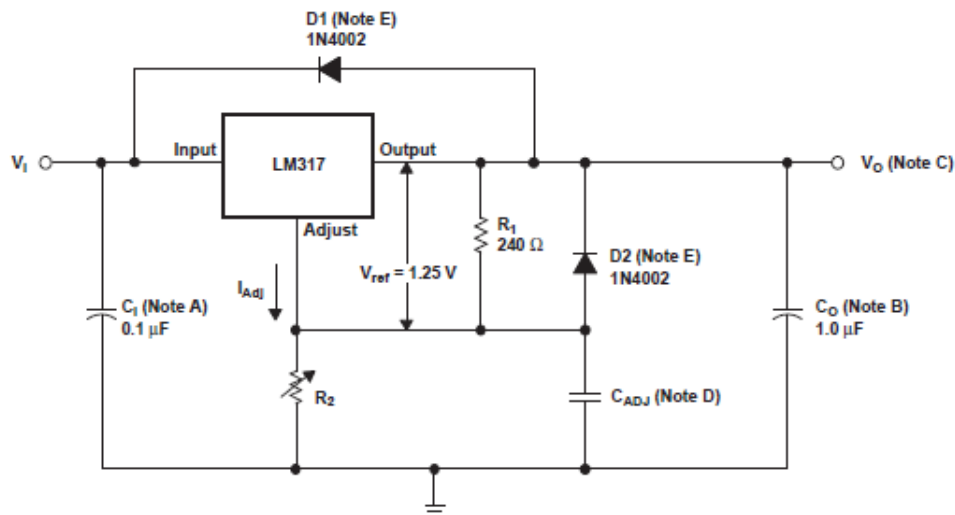
3.3 Lineární stabilizátor napětí řady 723

Nejrozšířenějším stabilizátorem pro stabilizaci napětí vyšších než $\pm 24 \text{ V}$ je obvod řady 723. Tento obvod má vnitřní referenční napětí $7,15 \text{ V}$, nejvyšší přípustné proudové zatížení 150 mA a největší ztrátový výkon obvodu 800 mW . Pomocí obvodu 723 lze vytvořit stabilizátor napětí od 2 V do 7 V , nebo stabilizátor pro napětí vyšší než 7 V . Tento obvod lze použít společně s výkonovým tranzistorem, se kterým lze dosáhnout kladného nebo záporného stabilizovaného napětí až stovky V a proudového zatížení až do velikosti, na kterou je dimenzován výkonový tranzistor [3].

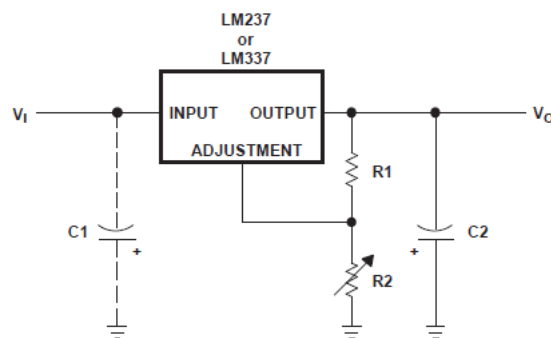
Šumové napětí samotného lineárního stabilizátoru řady 723 v kmitočtovém pásmu 100 Hz až 10 kHz při použití kondenzátoru C_{REF} s kapacitou $5 \mu\text{F}$ viz obr. 3.3 je $2,5 \mu\text{V}$ [19].

Velikost činitele PSRR je 86 dB [19] při použití kondenzátoru C_{REF} s kapacitou $5 \mu\text{F}$ obr. 3.3 v kmitočtovém pásmu 50 Hz až 10 kHz.

Cena stabilizátoru řady 723 ke dni 25. 3. 2012 je: 11,90 CZK/1 ks (ges.cz).

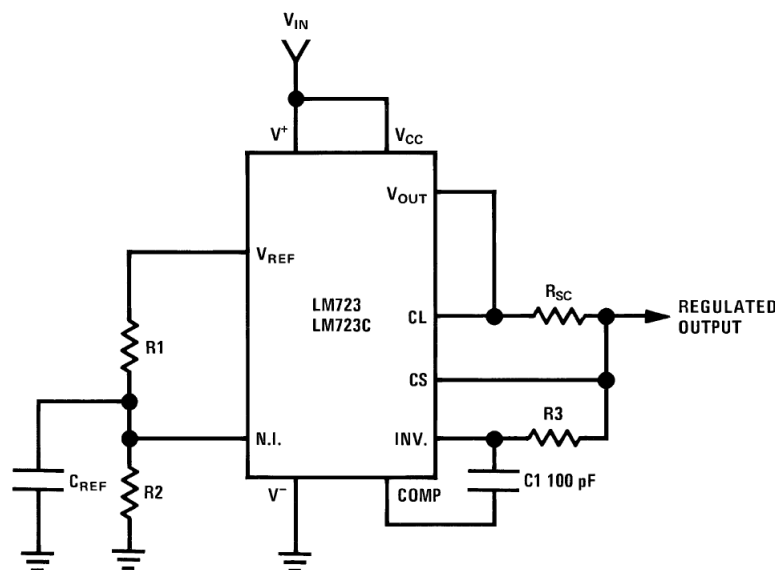


(a) Lineární stabilizátor kladného napětí řady 317 |Převzato z [17]|



(b) Lineární stabilizátor záporného napětí řady 337 |Převzato z [18]|

Obr. 3.2: Doporučené zapojení lineárních napěťových stabilizátorů pro kladné a záporné výstupní napětí řady 317 a 337

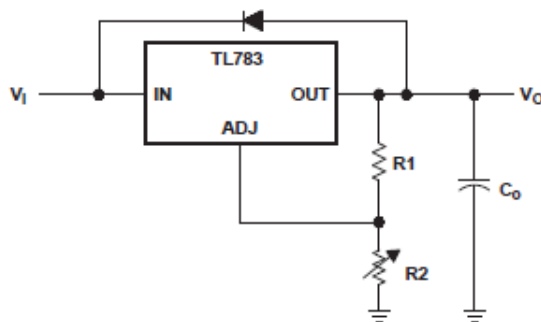
**Obr. 3.3:** Typické zapojení lineárního stabilizátoru řady 723 |Převzato z [19]|

3.4 Lineární stabilizátor napětí TL783

Lineární napěťový stabilizátor TL783 má nastavitelné výstupní napětí v rozsahu 1,25 V až 125 V při vstupním napětí od 21,5 V do 150 V při maximálním proudovém zatížení 700 mA. Výstupní šumové napětí má hodnotu 1,44 mV v kmitočtovém pásmu od 10 Hz do 10 kHz pro výstupní napětí +48 V a 6 mV pro výstupní napětí +200 V. Hodnota činitele PSRR na frekvenci 120 Hz je 76 dB [20]. Typické zapojení je na obr. 3.4. Výpočet odporového děliče pro nastavení výstupního napětí udává rovnice 3.3.

$$V_O = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} R_2 \quad (3.3)$$

V_O je výstupní napětí, V_{REF} je hodnota referenčního napětí 1,25 V, I_{ADJ} je vyrovnávací proud o typické velikosti $0,5 \mu\text{A}$ [20]. Minimální velikost výstupního kondenzátoru C_O se určí podle vztahu $C_O (\mu\text{F}) = 15/V_O$ [20].



Obr. 3.4: Typické zapojení lineárního stabilizátoru TL783 [Převzato z [20]].

Cena stabilizátoru TL783 ke dni 25. 3. 2012 je: 40 CZK/1 ks (tme.cz).

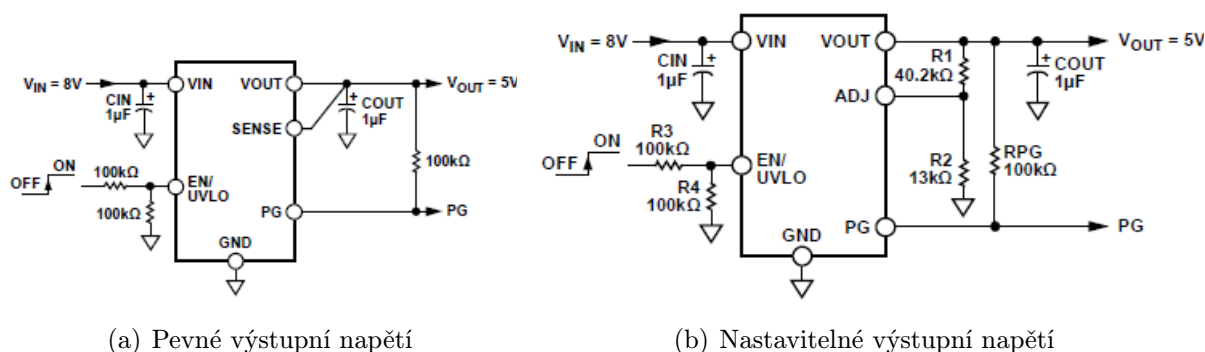
3.5 Stabilizátor kladného napětí ADP7104

Na vstupní svorky těchto stabilizátorů je možné přivést napětí od 3,3 V do 20 V. Výstupní napětí těchto stabilizátorů je přednastaveno na 1,5 V, 1,8 V, 2,5 V, 3 V, 3,3 V, 5 V a 9 V, lze také využít regulovatelný výstup podle rovnice 5.22 s napětím od 1,22 V až po hodnotu vstupního napětí. Stabilizátor ADP7102 je zatížitelný proudem 300 mA, stabilizátor ADP7104 lze zatížit proudem až 500 mA. Na výstup těchto stabilizátorů výrobce doporučuje připojit keramický kondenzátor o kapacitě $1 \mu\text{F}$ [21].

$$V_{OUT} = 1,22 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (3.4)$$

Tento stabilizátor má výstupní šumové napětí $15 \mu\text{V}$ v kmitočtovém pásmu 10 Hz až 100 kHz pro fixní výstupní napětí 5 V. Pro nastavitelné výstupní napětí 5 V je šumové napětí v kmitočtovém pásmu 10 Hz až 100 kHz $30 \mu\text{V}$. Pro výstupní napětí 15 V je šumové napětí $65 \mu\text{V}$ v kmitočtovém pásmu 10 Hz až 100 kHz.

Hodnota činitele PSRR je 70 dB na frekvenci 120 Hz při výstupním napětí 5 V a těžovacím proudu 500 mA. Pro výstupní napětí je hodnota činitele PSRR 60 dB. Typické zapojení lineárního stabilizátoru u ADP7104 je na obr. 5.21.



(a) Pevné výstupní napětí

(b) Nastavitelné výstupní napětí

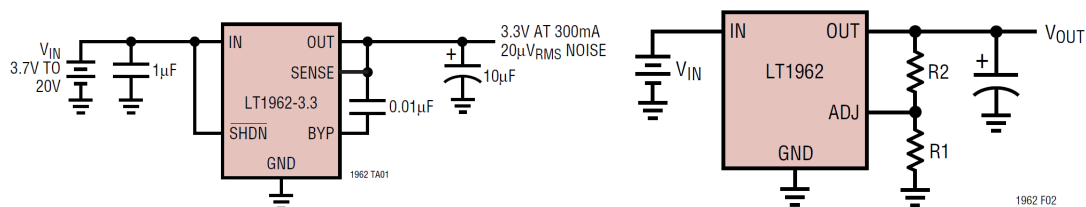
Obr. 3.5: Typické zapojení lineárního stabilizátoru ADP7104 s pevným výstupním napětím 5 V a nastavitelným výstupním napětím [Převzato z [21]].

Cena stabilizátoru ADP7104 ke dni 25. 3. 2012 je: 97 CZK/1 ks (cz.farnell.com).

3.6 Stabilizátor kladného napětí LT1962

Tento stabilizátor má rozsah vstupního napětí od 1,8 V do 20 V, pevné výstupní napětí 1,5 V, 1,8 V, 2,5 V, 3 V, 3,3 V a 5 V, dále lze regulovat výstupní napětí v rozmezí 1,22 V až 20 V podle rovnice 5.23. V_{OUT} je výstupní regulované napětí, I_{ADJ} je vyrovnávací proud, který je typicky 30 nA při teplotě 25°C. Maximální proudové zatížení je 300 mA. Šumové napětí tohoto stabilizátoru je 20 µV v pásmu od 10 Hz do 100 kHz. Potlačení zvlnění napájecího napětí PSRR je 65 dB na kmitočtu 120 Hz [22]. Typické schéma zapojení je na obr. 3.6.

$$V_{OUT} = 1,22 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} R_2 \quad (3.5)$$



(a) Stabilizátor LT1962 s pevným výstupním napětím

(b) Stabilizátor LT1962 s nastavitelným výstupním napětím

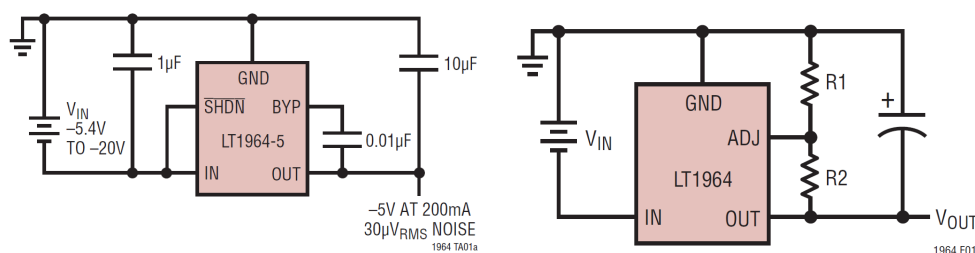
Obr. 3.6: Typické zapojení lineárního stabilizátoru kladného napětí LT1962 pro pevné a nastavitelné výstupní napětí od 1,22 V až 20 V [Převzato z [22]].

Cena stabilizátoru LT1962 ke dni 25. 3. 2012 je: 101,70 CZK/1 ks (cz.farnell.com).

3.7 Stabilizátor záporného napětí LT1964

Tento stabilizátor má rozsah vstupního napětí od $-1,9\text{ V}$ do -20 V , pevné výstupní napětí je -5 V , dále lze regulovat výstupní napětí v rozmezí od $-1,22\text{ V}$ do -20 V podle rovnice 5.24, kde V_{OUT} je výstupní regulované napětí, I_{ADJ} je vyrovnávací proud, který je typicky 30 nA při teplotě 25°C . Velikost rezistoru R_1 by měla být nižší než $250\text{ k}\Omega$ z důvodu minimalizace chyb výstupního napětí způsobených klidovým proudem I_{ADJ} . Maximální proudové zatížení je 200 mA . Šumové napětí tohoto stabilizátoru je $30\text{ }\mu\text{V}$ v pásmu 10 Hz až 100 kHz . Činitel potlačení zvlnění napájecího napětí PSRR je 54 dB na kmitočtu 120 Hz [23]. Typické schéma zapojení je na obr. 3.7. Velikost výstupního kondenzátoru by měla být minimálně $1\text{ }\mu\text{F}$ s velikostí ESR nižší než $3\text{ }\Omega$. Doporučená velikost výstupní kapacity je $10\text{ }\mu\text{F}$.

$$V_{OUT} = -1,22 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - I_{ADJ} R_2 \quad (3.6)$$



(a) Stabilizátor LT1964 s pevným výstupním napětím (b) Stabilizátor LT1964 s nastavitelným výstupním napětím

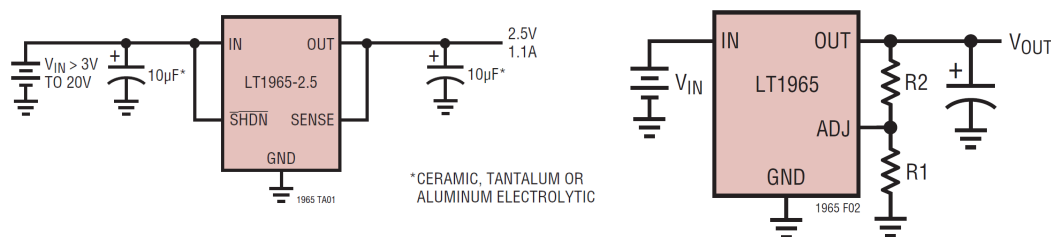
Obr. 3.7: Typické zapojení lineárního stabilizátoru záporného napětí LT1964 pro pevné výstupní napětí -5 V a nastavitelné výstupní napětí od $-1,22\text{ V}$ do -20 V [Převzato z [23]].

Cena stabilizátoru LT1964 ke dni 25. 3. 2012 je: $93.80\text{ CZK}/1\text{ ks}$ (cz.farnell.com).

3.8 Stabilizátor kladného napětí LT1965

Na vstup tohoto stabilizátoru lze přivést napětí o velikosti $1,8\text{ V}$ až 20 V . Výstupní napětí je $1,5\text{ V}$, $1,8\text{ V}$, $2,5\text{ V}$, $3,3\text{ V}$. Dále lze nastavit výstupní napětí v rozmezí od $1,2\text{ V}$ do $19,5\text{ V}$ pomocí odporového děliče podle rovnice 5.25, kde V_{OUT} je výstupní regulované napětí, I_{ADJ} je vyrovnávací proud, který je typicky $1,3\text{ }\mu\text{A}$ při teplotě 25°C . Velikost rezistoru R_1 by měla být menší než $12,1\text{ k}\Omega$ z důvodu minimalizace chyb výstupního napětí způsobených klidovým proudem I_{ADJ} . Maximální proudové zatížení tohoto lineárního stabilizátoru je $1,1\text{ A}$. Šumové napětí je $40\text{ }\mu\text{V}$ ve frekvenčním pásmu od 10 Hz do 100 kHz při použití výstupního kondenzátoru C_{OUT} o velikosti $10\text{ }\mu\text{F}$. Činitel zvlnění napájecího napětí PSRR je 75 dB na frekvenci 120 Hz [24]. Typické schéma zapojení je na obr. 3.8. Velikost výstupního kondenzátoru by měla být $10\text{ }\mu\text{F}$ s velikostí ESR nižší než $3\text{ }\Omega$.

$$V_{OUT} = 1,20 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} R_2 \quad (3.7)$$



(a) Stabilizátor LT1964 s pevným výstupním napětím (b) Stabilizátor LT1965 s nastavitelným výstupním napětím

Obr. 3.8: Typické zapojení lineárního stabilizátoru kladného napětí LT1965 pro pevné výstupní napětí 2,5 V a nastavitelné výstupní napětí od 1,20 V do 19,5 V [Převzato z [24]].

Cena stabilizátoru LT1965 ke dni 6. 4. 2012 je: 111 CZK/1 ks (cz.farnell.com).

3.9 Nízkošumový duální lineární stabilizátor LT3032

Tento duální stabilizátor má rozsah vstupního napětí od $\pm 2,3$ V do ± 20 V. Pevné výstupní napětí ± 5 V, ± 12 V a ± 15 V. Dále lze výstupní napětí regulovat v rozmezí $\pm 1,22$ V až ± 20 V podle rovnice 3.8 pro kladné výstupní napětí a podle rovnice 3.9 pro záporné výstupní napětí. I_{ADJP} je vyrovnávací proud kladné větve výstupního napětí o typické velikosti 30 nA, I_{ADJN} je vyrovnávací proud záporné větve výstupního napětí o typické velikosti -30 nA. V_{OUTP} je výstupní napětí kladné větve, V_{OUTN} je výstupní napětí záporné větve. Maximální proudové zatížení je ± 150 mA. Šumové napětí pro kladnou větev je $20 \mu\text{V}$ a pro zápornou větev je $30 \mu\text{V}$ v kmitočtovém pásmu 10 Hz až 100 kHz při použití výstupního kondenzátoru o kapacitě $10 \mu\text{F}$ viz obr. 3.9. Velikost činitele PSRR je 68 dB na kmitočtu 120 Hz [25].

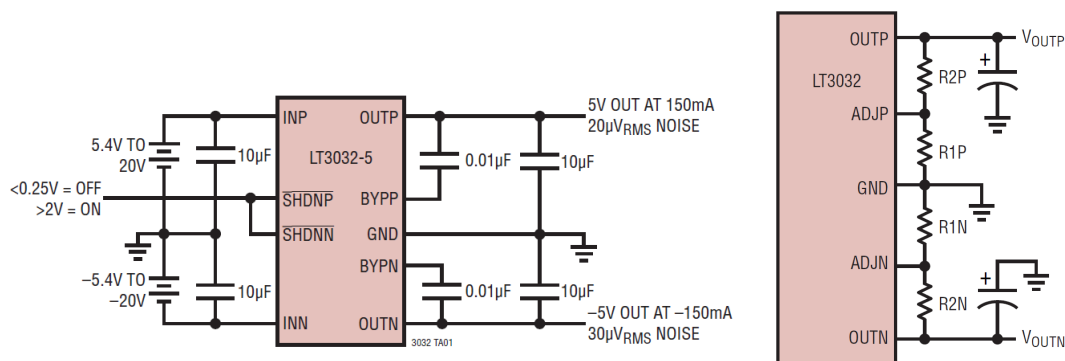
$$V_{OUTP} = 1,22 \left(1 + \frac{R_{2P}}{R_{1P}} \right) + I_{ADJP} R_{2P} \quad (3.8)$$

$$V_{OUTN} = -1,22 \left(1 + \frac{R_{2N}}{R_{1N}} \right) + I_{ADJN} R_{2N} \quad (3.9)$$

Cena stabilizátoru LT3032 ke dni 25. 3. 2012 je: 117,50 CZK/1 ks (cz.farnell.com).

3.10 Nízkošumový lineární stabilizátor kladného napětí LP2985A-50

Tento stabilizátor je určen pro použití v mobilních telefonech a přenosných počítačích. Výstupní napětí je pevně stanoveno na 5 V. Vstupní napětí je od 2,2 V do 16 V, maximální

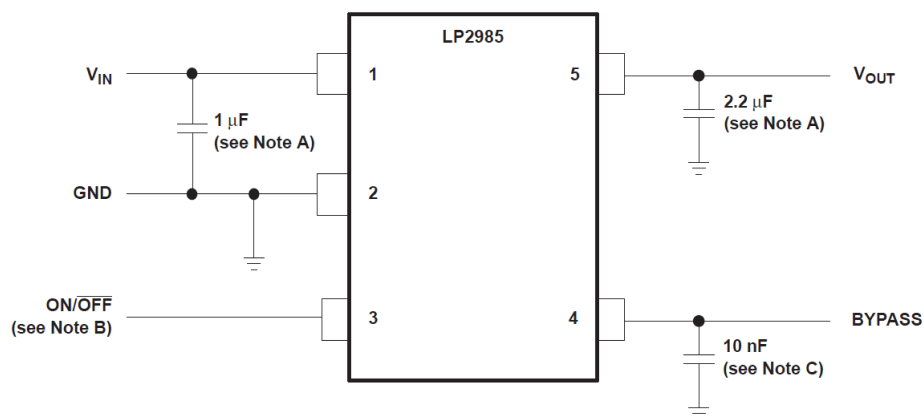


(a) Duální stabilizátor LT3032 s pevným výstupním napětím

(b) Duální stabilizátor LT3032 s nastavitelným výstupním napětím $\pm 1,22\text{ V}$ až $\pm 20\text{ V}$

Obr. 3.9: Typické zapojení duálního stabilizátoru napětí LT3032 pro pevné a nastavitelné výstupní napětí [Převzato z [25]]

proudové zatížení tohoto stabilizátoru je 150 mA. Šumové napětí je $30\ \mu\text{V}$. PSRR je 45 dB na kmitočtu 120 Hz při použití výstupního kondenzátoru s kapacitou $10\ \mu\text{F}$ obr. 5.22.



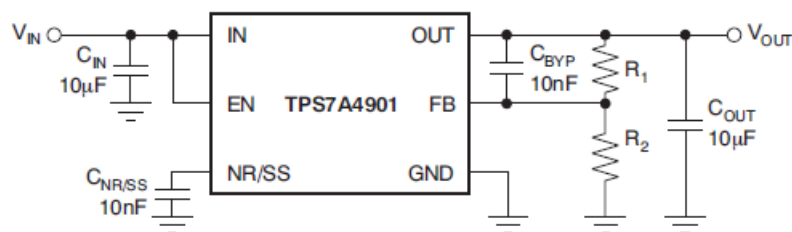
Obr. 3.10: Typické zapojení duálního stabilizátoru napětí LP2985A-50 [Převzato z [26]]

Cena stabilizátoru LP2985A-50 ke dni 25. 3. 2012 je: 37,70 CZK/1 ks (cz.farnell.com).

3.11 Nízkošumový lineární stabilizátor kladného napětí TPS7A4901

Vstupní napětí toho stabilizátoru je od 3 V do 36 V, výstupní napětí je nastavitelné v rozsahu od 1,194 V do 33 V s proudovým zatížením do 150 mA. Výstupní šumové napětí pro frekvenční rozsah 20 Hz až 20 kHz je $12,7\ \mu\text{V}$, pro rozsah 10 Hz až 10 kHz je šumové napětí $15,4\ \mu\text{V}$. Činitel potlačení zvlnění napájecího napětí PSRR je 72 dB na frekvenci 120 Hz [27] při použití výstupní kondenzátoru C_{OUT} s kapacitou $10\ \mu\text{F}$ podle obr. 3.11.

$$R_1 = R_2 \left(\frac{U_{OUT}}{U_{REF}} - 1 \right) \quad (3.10)$$



Obr. 3.11: Typické zapojení stabilizátoru kladného napětí TPS7A4901 pro maximalizaci činitele PSRR a minimalizaci šumového napětí [Převzato z [27]]

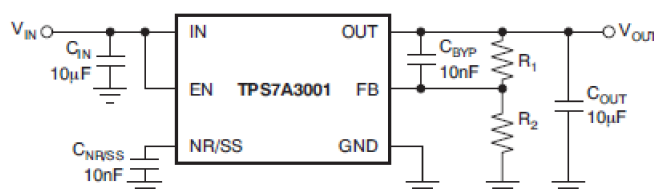
Na obr. 3.11 je typické zapojení stabilizátoru pro maximalizaci činitele PSRR a minimalizaci šumového napětí. Výstupní napětí lze nastavit podle rovnice 3.10 [27], kde U_{OUT} je výstupní napětí a U_{REF} je referenční napětí 1,194 V.

Cena stabilizátoru TPS7A4901 ke dni 25. 3. 2012 je: 94,4 CZK/1 ks (cz.farnell.com).

3.12 Nízkošumový lineární stabilizátor záporného napětí TPS7A3001

Rozsah vstupních napětí je od -3 V do -36 V, výstupní napětí lze nastavit v rozmezí $-1,18$ V až -33 V. Maximální proudové zatížení stabilizátoru je 200 mA. Výstupní šumové napětí stabilizátoru pro frekvenční rozsah 20 Hz až 20 kHz je $14 \mu\text{V}$, pro rozsah 10 Hz až 100 kHz je hodnota výstupního šumového napětí $15,1 \mu\text{V}$.

$$R_1 = R_2 \left(\frac{U_{OUT}}{U_{REF}} - 1 \right) \quad (3.11)$$



Obr. 3.12: Typické zapojení stabilizátoru záporného napětí TPS7A3001 pro maximalizaci činitele PSRR a minimalizaci šumového napětí [Převzato z [28]]

Činitel potlačení zvlnění napájecího napětí PSRR je 72 dB na frekvenci 120 kHz [28] při použití výstupního kondenzátoru C_{OUT} s kapacitou $10 \mu\text{F}$ viz obr 3.12.

Cena stabilizátoru TPS7A3001 ke dni 25. 3. 2012 je: 114 CZK/1 ks (cz.farnell.com).

3.13 Výběr lineárních stabilizátorů pro měření šumových parametrů

Pro měření šumových parametrů byly vybrány stabilizátory, které jsou běžně dostupné na českém trhu. Mezi tyto stabilizátory patří lineární stabilizátory kladného napětí s typovým označením 7805, 7815, 7818 a 7824, lineární stabilizátory záporného napětí typu 7905, 7915, 7918 a 7924, kde poslední dvojčíslí udává hladinu výstupního stabilizovaného napětí. Dalšími lineárními stabilizátory jsou stabilizátory kladného napětí s typovým označením 317 a stabilizátory záporného napětí s typovým označením 337, u kterých je možno nastavit výstupní napětí. Pro stabilizátory napěťových hladin ± 48 V a $+200$ V byl použit obvod řady 723 s výkonovým tranzistorem.

Mezi hlavní kritéria výběru nízkošumových stabilizátorů patřila hodnota výstupního šumového napětí, velikost činitele PSRR, velikost napěťové hladiny, proudová zatížitelnost stabilizátoru a cena.

Podle těchto parametrů byly vybrány pro měření šumových parametrů následující lineární stabilizátory LT1962, LT1964, LT1965 a ADP7104. Pomocí těchto stabilizátorů lze stabilizovat výstupní napěťové úrovně na ± 5 V, ± 15 V a ± 18 V s proudovým zatížením až 200 mA, popřípadě 1,1 A. Stabilizátory řady TPS7A4901 a TPS7A3001 lze nastavit výstupní napětí o velikosti až ± 24 V. Stabilizátor s velmi nízkou hladinou šumu reprezentuje integrovaný obvod s označením LP2985A-50 s výstupním napětím 5 V.

3.13.1 Porovnání lineárních stabilizátorů podle výstupní úrovně stabilizovaného napětí

V tabulkách 3.1 až 3.8 jsou stabilizátory rozděleny podle úrovně výstupního napětí. Tabulky udávají maximální dovolené napětí, které je možné přivést na vstup stabilizátoru, maximální proudové zatížení, činitel potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) měřený na frekvenci 120 Hz, efektivní hodnotu výstupního šumového napětí ve frekvenčním rozsahu 10 Hz až 100 kHz a cenu stabilizátoru.

V zapojení s integrovaným obvodem LM723 je výstupní proudové omezení závislé na použitém výkonovém tranzistoru.

TYP	$U_{IN_MAX}[V]$	$I_{MAX}[mA]$	$PSRR[dB]$	$U_{NOISE}[\mu V]$	$CENA[CZK]$
L7805	35	1000	68	200	6,90
LM317	40	1500	64	150	11,90
ADP7104	20	500	70	15	97
TPS7A4901	36	150	72	15,4	94,40
LT1965	20	1100	75	40	111
LT1962	20	300	65	20	101,70
LT3032	20	150	68	20	117,50
LP2985A-50	16	150	45	30	37,70

Tab. 3.1: Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím +5 V

TYP	$U_{IN_MAX}[V]$	$I_{MAX}[mA]$	$PSRR[dB]$	$U_{NOISE}[\mu V]$	$CENA[CZK]$
L7905	-35	1000	60	100	6,90
LM337	-40	1500	77	150	11,90
TPS7A3001	-36	200	72	15,1	114
LT1964	-20	200	54	30	93,80
LT3032	-20	150	68	30	117,50

Tab. 3.2: Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím -5 V

TYP	$U_{IN_MAX}[V]$	$I_{MAX}[mA]$	$PSRR[dB]$	$U_{NOISE}[\mu V]$	$CENA[CZK]$
L7815	35	1000	60	600	6,90
LM317	40	1500	64	450	11,90
ADP7104	20	500	60	65	97
TPS7A4901	36	150	72	15,4	94,40
LT1965	20	1100	75	40	111
LT1962	20	300	65	20	101,70
LT3032	20	150	68	20	117,50

Tab. 3.3: Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím +15 V

TYP	$U_{IN_MAX}[V]$	$I_{MAX}[mA]$	$PSRR[dB]$	$U_{NOISE}[\mu V]$	$CENA[CZK]$
L7915	-35	1000	60	250	6,90
LM337	-40	1500	77	450	11,90
TPS7A3001	-36	200	72	15,1	114
LT1964	-20	200	54	30	93,80
LT3032	-20	150	68	30	117,50

Tab. 3.4: Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím -15 V

TYP	$U_{IN_MAX}[V]$	$I_{MAX}[mA]$	$PSRR[dB]$	$U_{NOISE}[\mu V]$	$CENA[CZK]$
L7818	35	1000	59	720	6,90
LM317	40	1500	64	540	11,90
ADP7104	20	500	60	65	97
TPS7A4901	36	150	72	15,4	94,40
LT1965	20	1100	75	40	111
LT1962	20	300	65	20	101,70
LT3032	20	150	68	20	117,50

Tab. 3.5: Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím +18 V

TYP	$U_{IN_MAX}[V]$	$I_{MAX}[mA]$	$PSRR[dB]$	$U_{NOISE}[\mu V]$	$CENA[CZK]$
L7918	-35	1000	60	300	6,90
LM337	-40	1500	77	540	11,90
TPS7A3001	-36	200	72	15,1	114
LT1964	-20	200	54	30	93,80
LT3032	-20	150	68	30	117,50

Tab. 3.6: Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím -18 V

TYP	$U_{IN_MAX}[V]$	$I_{MAX}[mA]$	$PSRR[dB]$	$U_{NOISE}[\mu V]$	$CENA[CZK]$
L7824	40	1000	56	960	6,90
LM317	40	1500	64	720	11,90
TPS7A4901	36	150	72	15,4	94,40

Tab. 3.7: Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím +24 V

TYP	$U_{IN_MAX}[V]$	$I_{MAX}[mA]$	$PSRR[dB]$	$U_{NOISE}[\mu V]$	$CENA[CZK]$
L7924	-40	1000	60	400	6,90
LM337	-40	1500	77	720	11,90
TPS7A3001	-36	200	72	15,1	114

Tab. 3.8: Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím -24 V

TYP	U_{OUT}	$U_{IN_MAX}[V]$	$I_{MAX}[mA]$	$PSRR[dB]$	$U_{NOISE}[\mu V]$	$CENA[CZK]$
LM723	+48 V	40	-	86	120	11,90
LM723	-48 V	-40	-	86	120	11,90
LM723	+200 V	40	-	86	500	11,90

Tab. 3.9: Srovnávací tabulka lineárních stabilizátorů s výstupním napětím +48 V, -48 V a +200 V

4

Návrh a optimalizace napěťového stabilizátoru

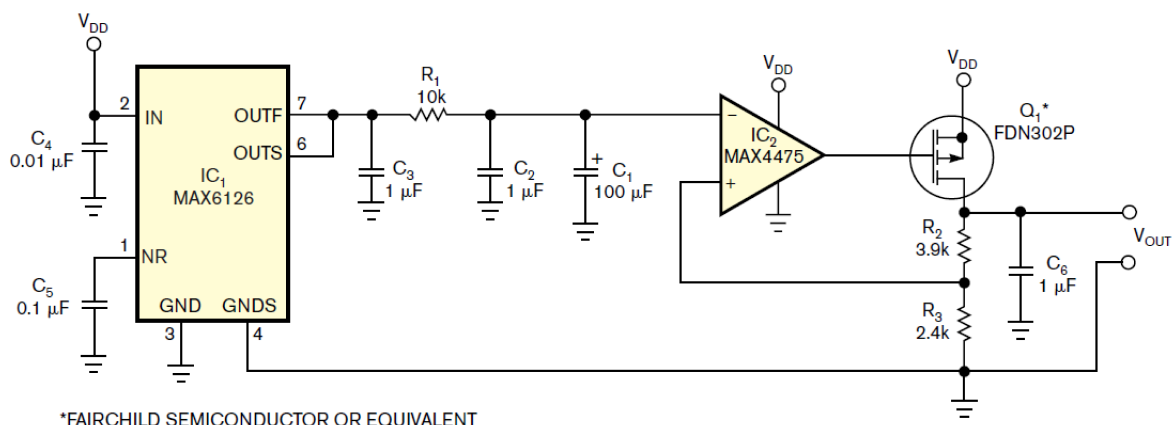
Jako předloha pro návrh stabilizátoru byl použit článek „Ultra-low-noise low-dropout regulator achieves $6\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ noise floor“ společnosti MAXIM [29], ve kterém autor popisuje nízkošumový lineární stabilizátor složený z diskretních součástek. Tento stabilizátor se skládá z napěťové reference, chybového zesilovače a tranzistoru řízeného elektrickým polem. Cílem optimalizace provedené v diplomové práci bylo vytvořit nízkošumový stabilizátor pro napěťové hladiny 5 V, 15 V a 18 V s co nejmenší velikostí výstupního šumového napětí jako alternativu k nízkošumovým monolitickým stabilizátorům.

4.1 Napěťový stabilizátor složený z diskretních součástek s ultra nízkým šumovým napětím

Tento stabilizátor je složen z napěťové reference MAX6126, filtru typu dolní propust se zlomovým kmitočtem 0,16 Hz, chybového zesilovače MAX4475, který reguluje výstupní napětí FET tranzistoru FDN302P. Velikost výstupního napětí je nastavena odporovým děličem složeným z rezistorů R_2 a R_3 obr. 4.1 podle rovnice 4.2, kde V_{OUT} je výstupní regulované napětí. Konstanta 2,048 je výstupní referenční napětí z napěťové reference MAX6126. Napájecí napětí je 5 V.

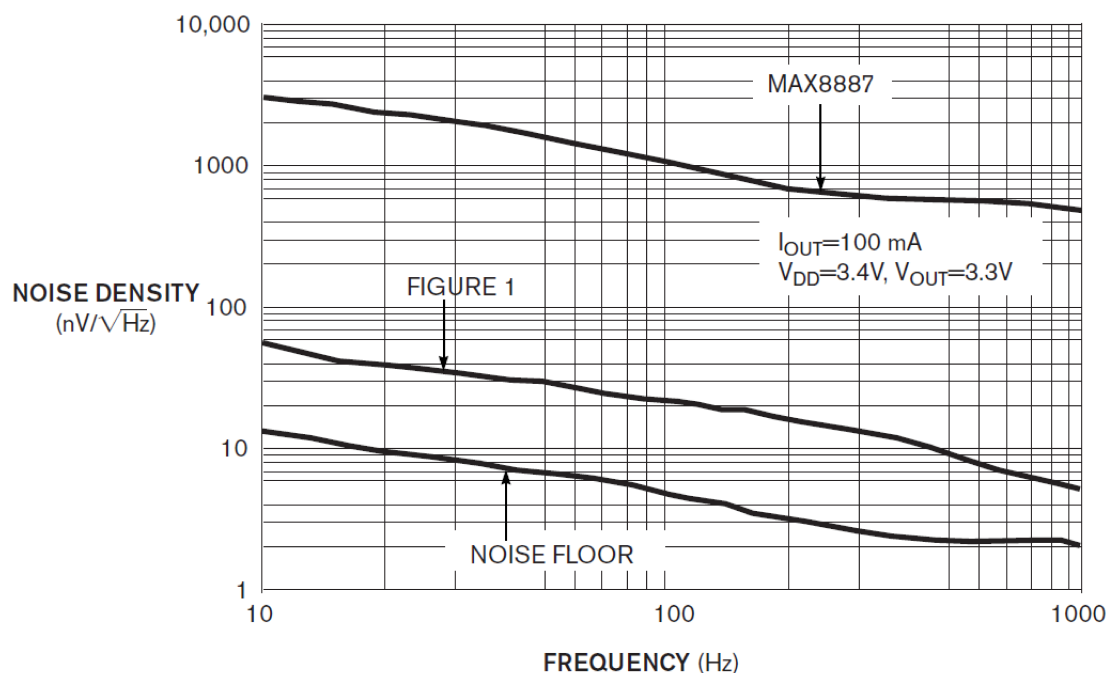
$$R_2 = R_3 \left(\frac{V_{OUT}}{2,048} - 1 \right) \quad (4.1)$$

Toto zapojení dosahuje podle autora efektivní hodnoty výstupního šumového napětí 6 nV na frekvenci 1 kHz podle obr. 4.2. Tato spektrální hustota efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu stabilizátoru složeného z diskretních součástek je podle průběhu na obrázku 4.2 o 38 dB nižší než je průběh šumového napětí u monolitického stabilizátoru MAX8887. Na stabilizátor MAX8887 lze přivést vstupní napětí v rozsahu 2,5 V až 5,5 V, výstupní napětí je 3,3 V a efektivní hodnota šumového napětí je $42\ \mu\text{V}$ ve frekvenčním



Obr. 4.1: Zapojení diskretního stabilizátoru výstupního napětí 5 V [Převzato z [29]]

pásmu 10 Hz až 100 kHz, velikost činitele potlačení napájecího napětí (PSRR) je 60 dB na frekvenci 120 Hz.



Obr. 4.2: Spektrální hustota efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu stabilizátoru složeného z diskretních součástek v porovnání s monolitickým stabilizátorem MAX8887 [Převzato z [29]]

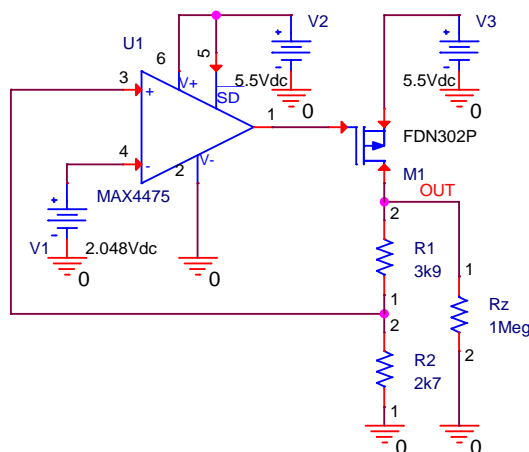
Křivka označená *FIGURE1* na obrázku 4.2 reprezentuje průběh spektrální hustoty efektivní hodnoty výstupního šumového napětí stabilizátoru složeného z diskretních součástek podle obrázku 4.1.

Maximální napětí U_{SD} MOSFET tranzistoru FDN302P je 20 V. Napájecí napětí chybového zesilovače MAX4475 se pohybuje od 2,7 V do 5,5 V. Jako vstupní napětí pro napěťovou referenci MAX6126 lze použít také 5 V.

Cena celého zapojení ke dni 13. 4. 2012 je: 292,50 CZK/1 ks (cz.farnell.com), toho cena napěťové reference MAX6126 je: 212 CZK/1 ks, cena chybového zesilovače MAX4475 je: 65 CZK/1 ks a cena FET tranzistoru FDN302P je: 15,50 CZK/1 ks.

4.1.1 Modelování parametrů stabilizátoru složeného z diskretních součástek

Ověření funkce obvodu a jeho analýza byla provedena v programu PSPICE. Schéma zapojení použitého pro ověření funkce obvodu a k analýze efektivní hodnoty výstupního šumového napětí je na obr. 4.3. Výstupní napětí je nastaveno pomocí odporového děliče R_1 a R_2 ze standardizované řady E12. Výstupní napětí zapojení stabilizátoru dle obrázku 4.3 je 5,006 V.



Obr. 4.3: Schéma zapojení v programu PSPICE pro ověření funkce obvodu a šumovou analýzu

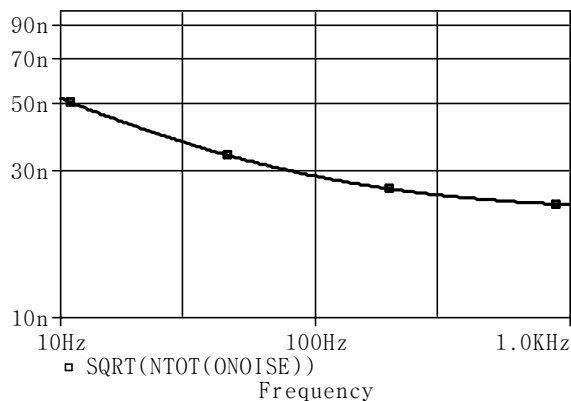
Spektrální hustota efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu stabilizátoru je na obr. 4.4. Šumové napětí je na obrázku 4.2, do tohoto průběhu se nezapočítávají šumové parametry napěťové reference MAX6126. Napěťová reference je v obrázku 4.3 nahrazena zdrojem stejnosměrného napětí V1 o velikosti 2,048 V. Napájecí napětí chybového zesilovače V2 a napětí V3 na tranzistoru M1 je 5,5 V.

Pro stabilizaci vyšších napěťových hladin je nutno použít jiný typ polem řízeného tranzistoru a operačního zesilovače s vyšším napájecím napětím.

Výstupní napětí lze nastavit pomocí odporového děliče R_1 a R_2 podle rovnice 4.2

$$U_{OUT} = U_{ref} \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad [V] \quad (4.2)$$

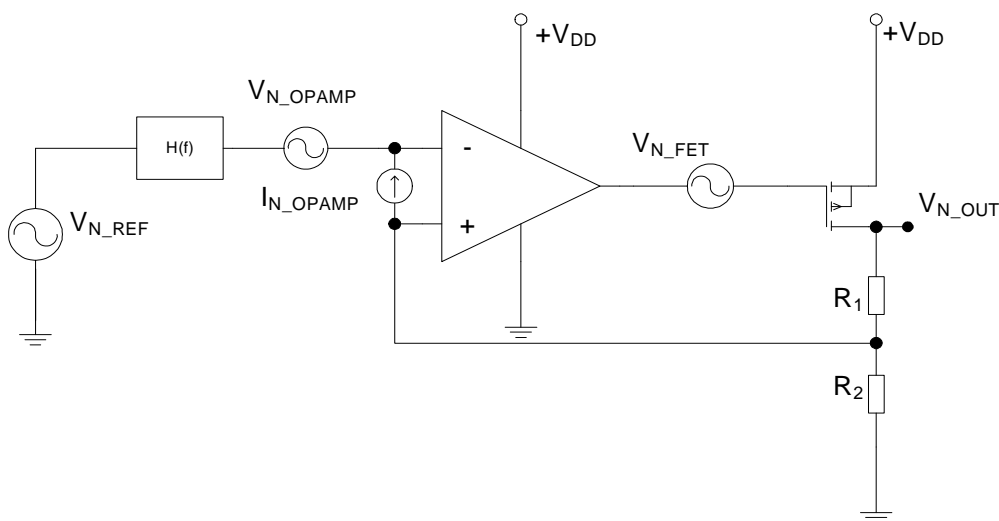
kde U_{ref} je napětí z napěťové reference (2,048 V), U_{OUT} je výstupní stabilizované napětí celého zapojení.



Obr. 4.4: Spektrální hustota efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu stabilizátoru dle obrázku 4.3 ve frekvenčním rozsahu 10 Hz až 1 kHz

4.1.2 Šumový model stabilizátoru složeného z diskretních součástek

Šumový model stabilizátoru složeného z diskretních součástek je na obrázku 4.5, výpočet ekvivalentního šumového napětí udává rovnice 4.3.



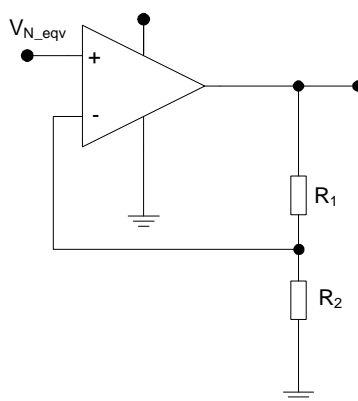
Obr. 4.5: Šumový model lineárního stabilizátoru složeného z diskretních součástek

$$V_{N_EQV}^2 = \int_{f_1}^{f_2} \left((V_{N_REF} H(f))^2 + V_{N_OPAMP}^2 + \left(I_{N_OPAMP} \frac{R_1 R_2}{R_2 + R_3} \right)^2 + 4kTB \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) df \quad [V^2/Hz] \quad (4.3)$$

$$V_{N_EQV} = \sqrt{V_{N_EQV}^2} \quad [V/\sqrt{Hz}] \quad (4.4)$$

Rovnice 4.3 popisuje spektrální hustotu ekvivalentního vstupního šumu celého zapojení lineárního stabilizátoru složeného z diskretních součástek viz obr. 4.5 přepočtenou na vstup chybového zesilovače. $V_{N_EQV}^2$ je kvadrát ekvivalentního šumového napětí, které se vypočítá jako integrál přes frekvenční pásmo (od f_1 do f_2) z jednotlivých výkonových šumových příspěvků od součástek v zapojení. V_{N_REF} je šumové napětí od napěťové reference, $H(f)$ je přenosová funkce RC filtru viz obr. 4.1. V_{N_OPAMP} je ekvivalentní šumové napětí operačního zesilovače přepočtené na vstup, I_{N_OPAMP} je ekvivalentní proudový příspěvek operačního zesilovače přepočtený na vstup chybového zesilovače. Šumové napětí FET tranzistoru V_{N_FET} se neuplatňuje, je potlačeno zpětnovazební smyčkou. Posledním parametrem, který se v zapojení uplatňuje je tepelný šum rezistorů ve zpětné vazbě. Výpočet ekvivalentní efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu stabilizátoru v kmitočtovém intervalu od f_1 do f_2 udává rovnice 4.4.

$$V_{N_OUT} = A \cdot V_{N_EQV} \quad (4.5)$$



Obr. 4.6: Zapojení pro výpočet zisku chybového zesilovače stabilizátoru

Výstupní šum celého zapojení lineárního stabilizátoru z diskretních součástek se vypočte podle rovnice 4.5, kde A je zisk bezšumového chybového zesilovače, který se určí z rovnice 4.6 podle obrázku 4.6.

$$A = \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad (4.6)$$

Na obrázku 4.7 je uvedeno schéma zapojení nízkošumového lineárního stabilizátoru složeného z diskretních součástek pro měření zatěžovací charakteristiky, efektivního šumového napětí na výstupu a ztrátového výkonu. Rezistor R_3 reprezentuje efektivní hodnotu šumového napětí napěťové reference MAX6126 na frekvenčním rozsahu 100 kHz. Tento rezistor je vypočten podle rovnice 4.7

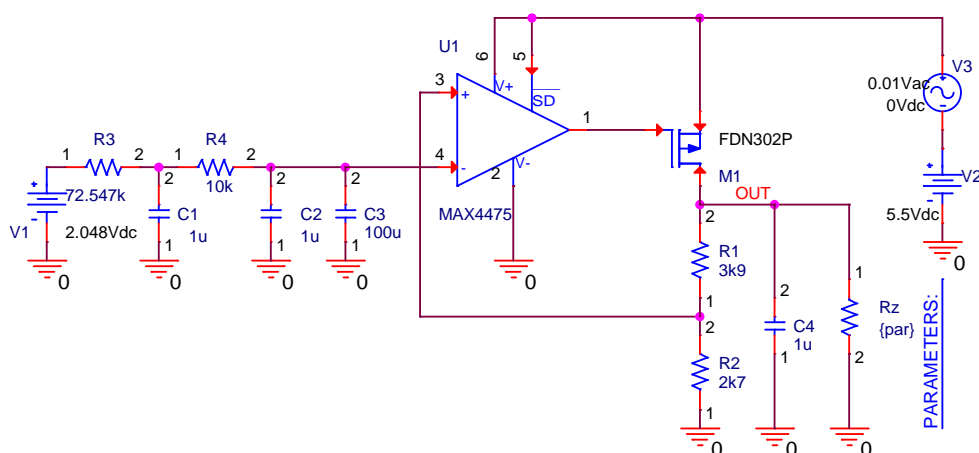
$$R_3 = \frac{U_{N_MAX6126}^2}{4kTB} \quad (4.7)$$

kde k je Boltzmannova konstanta, T je teplota v Kelvinech a B je šířka pásma v Hz. $U_{N_MAX6126}$ je efektivní hodnota šumového napětí napěťové reference MAX6126 s výstupním napětím 2,048 V. $U_{N_MAX6126}$ je 11 μ V na kmitočtu 100 kHz při použití kondenzátoru

C_5 viz obr. 4.1 pro redukcí šumového napětí o kapacitě 100 nF. Výrobce napěťové reference neudává šumové napětí pro vyšší frekvenční pásmo, v tomto případě bude zaveden zjednodušující předpoklad, že spektrum šumu je bílé, kmitočtově nezávislé až do 100 kHz, což prakticky zcela neodpovídá realitě. Při šumové analýze bude šum napěťové reference modelován šumícím rezistorem, jehož šumový výkon přibližně odpovídá šumu napěťové reference MAX6126. Výsledná hodnota rezistoru R_3 je 72,547 k Ω .

4.1.3 Simulace zatěžovací charakteristiky a šumových parametrů lineárního stabilizátoru složeného z diskretních součástek

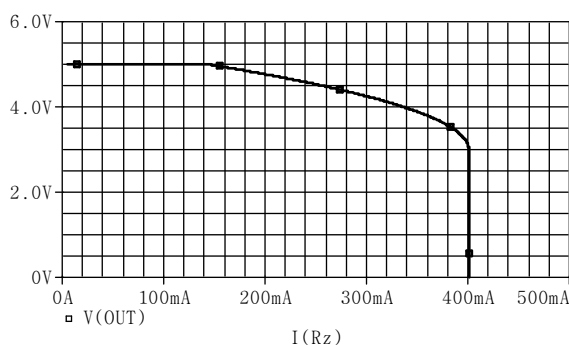
Napětí z napěťové reference MAX6126 je filtrováno filtrem typu dolní propust (R_4 , C_2 , C_3) se zlomovým kmitočtem 0,16 Hz, který potlačí vyšší frekvenční složky šumu napěťové reference dle zapojení na obrázku 4.3.



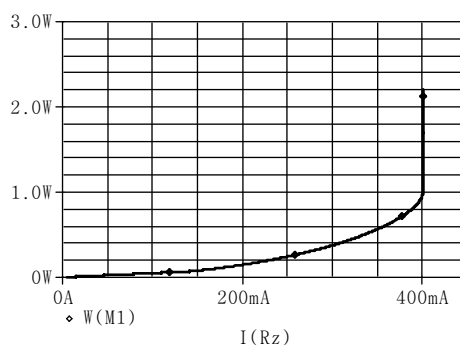
Obr. 4.7: Schéma zapojení pro měření zatěžovací charakteristiky, efektivního šumového napětí, činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) a ztrátového výkonu stabilizátoru

Na obrázku 4.8 je průběh zatěžovací charakteristiky nízkošumového lineárního stabilizátoru složeného z diskretních součástek. Tento stabilizátor udržuje úroveň výstupního napětí do zatěžovacího proudu 141 mA. Velikost výstupního napětí je 5,0064 V. Maximální proud, kterým lze tento obvod zatížit je 400 mA. Ztrátový výkon na tranzistoru M1 při proudu 124,27 mA je 62,7 mW. Maximální hodnota ztrátového výkonu na tranzistoru M1 při zatěžovacím proudu 400 mA je 1,38 W.

Na obrázku 4.9 je uveden průběh pro měření efektivní hodnoty výstupního šumového napětí a frekvenční průběh činitele PSRR. Efektivní hodnota ve frekvenčním pásmu 100 kHz je 85,267 μ V. Pro měření činitele potlačení zvlnění napájecího napětí je nutné na

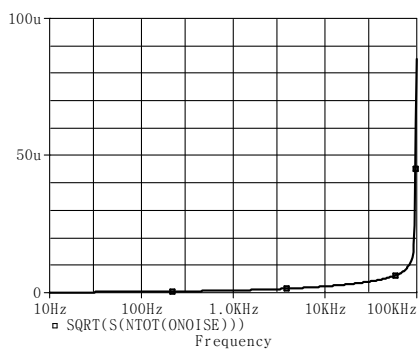


(a) Zatěžovací charakteristika

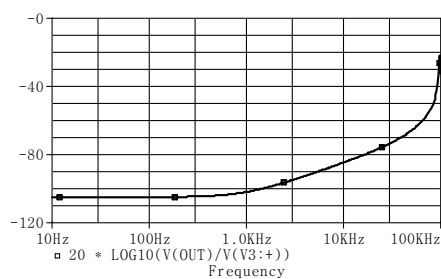


(b) Ztrátový výkon na tranzistoru

Obr. 4.8: Zatěžovací charakteristika lineárního stabilizátoru složeného z diskretních součástek od firmy MAXIM a ztrátový výkon na tranzistoru FDN302P



(a) Průběh efektivní hodnoty výstupního šumového napětí



(b) Frekvenční závislost činitele potlačení zvlňení napájecího napětí (PSRR)

Obr. 4.9: Průběh efektivní hodnoty výstupního napětí a frekvenční charakteristika činitele PSRR nízkošumového stabilizátoru napětí

napájení stabilizátoru přivést harmonický signál (zdroj $V_3 = 10\text{ mV}$). Velikost činitele potlačení napájecího napětí (PSRR) na frekvenci 120 Hz je 104,8 dB. Na frekvenci 1 kHz je velikost PSRR 101,9 dB.

Tento lineární stabilizátor napětí lze použít pro nízkošumové aplikace se vstupním napětím omezeným napájením operačního zesilovače na maximálně 5,5 V [29] s požadavkem na maximální proudové zatížení 141 mA viz obr. 4.8. Ztrátový výkon na tranzistoru při proudu 141 mA je nižší než 0,1 W, proto toto zapojení nemusí být chlazeno.

4.2 Optimalizace stabilizátoru složeného z diskretních součástek

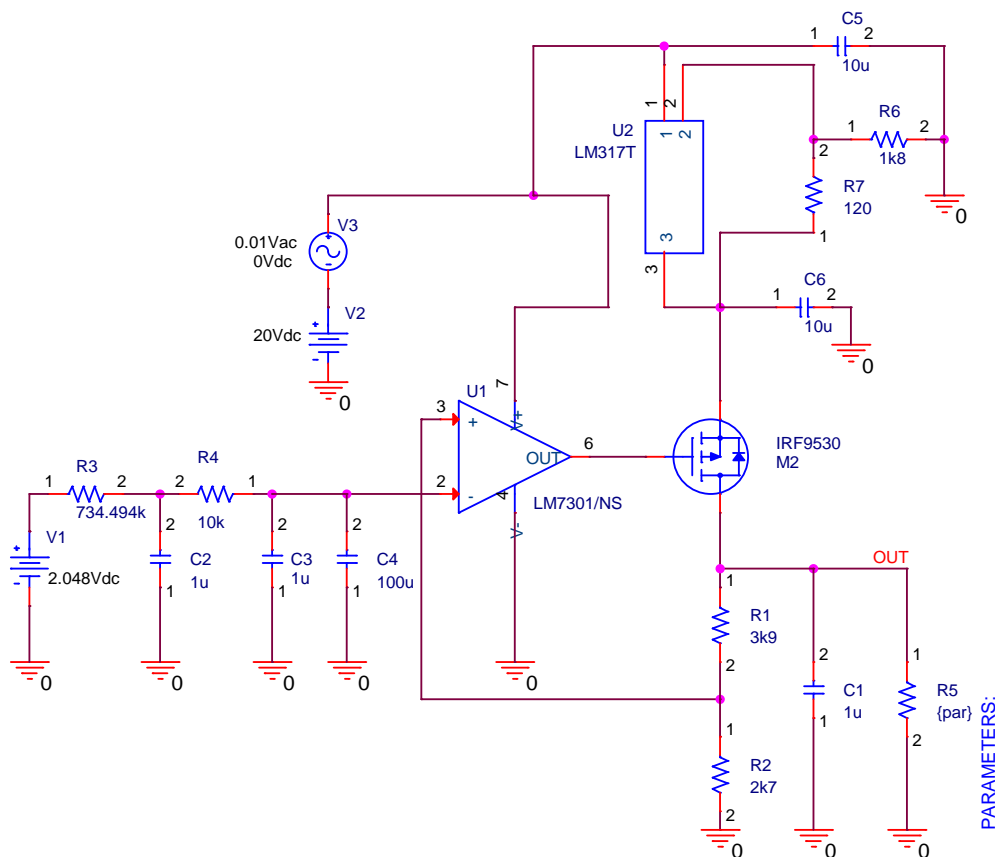
Optimalizované zapojení pro běžně dostupné součástky na českém trhu pro napětí 5 V je na obrázku 4.10. Optimalizace spočívala v nalezení co nejlevnějších součástek tak, aby mělo celé zapojení co nejnižší efektivní hodnotu výstupního šumového napětí a co nejvyšší činitel PSRR. Toto zapojení pro simulaci v programu PSPICE se skládá z chybového operačního zesilovače LM7301 [30], který na svém výstupu dosahuje hodnot napětí shodných s napájecím napětím (rail-to-rail), MOSFET tranzistoru IRF9530N a odporového děliče. Zdroj referenčního napětí V_2 má velikost 2,048 V, napájecí napětí pro operační zesilovač a napětí U_{SD} tranzistoru řízeného polem je 20 V. Toto napětí bylo zvoleno s ohledem na možnosti napájení chybového zesilovače, který musí mít maximální velikost výstupního napětí shodnou s napájecím napětím (rail-to-rail) pro možnost úplného uzavření tranzistoru M1 při regulaci výstupního napětí viz obr. 4.10. Napětí U_{SD} tranzistoru IRF9530N je až 100 V, maximální proud tranzistorem je 14 A, tranzistor má odpor $R_{DS(ON)}$ 0,2 Ω , maximální výkonové zatížení tohoto tranzistoru je 79 W [31]. Pro toto zapojení je použita napěťová reference LM4040, která má efektivní velikost výstupního šumového napětí ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz 35 μV . Podle rovnice 4.7 je hodnota rezistoru R_3 734,494 k Ω , tento rezistor reprezentuje efektivní hodnotu šumového napětí napěťové reference LM4040.

Napěťový stabilizátor složený z diskretních součástek podle obrázku 4.3 má výstupní efektivní hodnotu šumového napětí 85,267 μV na kmitočtovém pásmu 100 kHz při napájecím napětí 5,5 V, průběh je uveden na obrázku 4.9. Stabilizátor složený z diskretních součástek podle obrázku 4.10 má efektivní hodnotu šumového napětí 12,49 μV na kmitočtovém pásmu 100 kHz při napájecím napětí 20 V, průběh je na obrázku 4.12 (a).

Cena operačního zesilovače LM7301 ke dni 16.4.2012 je 60,61 CZK/1 ks (cz.farnell.com), cena MOSFET tranzistoru IRF9530N kde dni 16.4.2012 je 19,60 CZK/1 ks (ges.cz).

Tyto součástky lze použít na rozdíl od součástek doporučených v článku [29] pro výstupní stabilizované napětí 5 V, 15 V a 18 V, operační zesilovač lze napájet napětím až 22 V.

Podle rovnice 4.2 je hodnota rezistoru $R_1 = 3,9\text{ k}\Omega$ pro požadované stabilizované výstupní napětí 5 V. Pro výstupní napětí 15 V je hodnota rezistoru $R_1 = 17\text{ k}\Omega$ a pro výstupní



Obr. 4.10: Zapojení nízkošumového stabilizátoru napětí složeného z diskretních součástek dostupných na českém trhu pro vstupní napětí 5 V pro měření efektivní hodnoty výstupního šumového napětí, činitele PSRR a ztrátového výkonu stabilizátoru

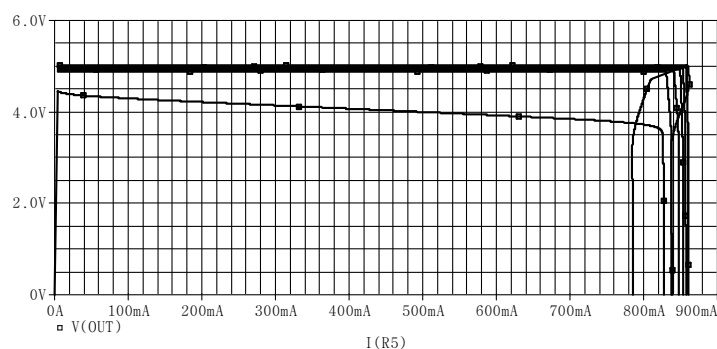
napětí 18 V je hodnota rezistoru $R_1 = 21 \text{ k}\Omega$. Napájecí napětí bylo zvoleno 20 V.

Proudové omezení je realizováno pomocí lineárního stabilizátoru LM317T, který pomocí rezistorů R_6 a R_7 nastavuje výstupní napětí na 18 V podle rovnice 3.1. Stabilizátor LM317T omezuje výstupní proud celého obvodu na 1 A.

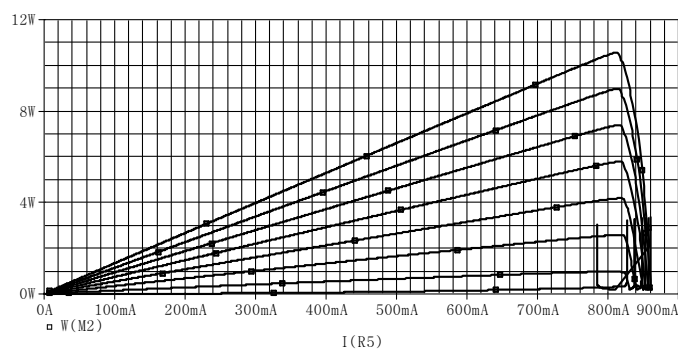
Napěťový zdroj V_3 je umístěn za napájecí zdroj pro měření činitele zvlnění napájecího napětí.

4.2.1 Stabilizátor s výstupním napětím +5 V z diskrétních součástek

Stabilizátor je zapojen podle schéma na obrázku 4.10. Odporový dělič R_1 a R_2 je nastaven podle rovnice 4.2. Zatěžovací charakteristika zapojení a výkonová ztráta na tranzistoru je na obrázku 4.11. Výkonová ztráta na regulačním tranzistoru pro uvažované maximální proudové zatížení 1 A je 15,8 W viz obr. 4.11 pro napájecí napětí 20 V. Jako parametr bylo zvoleno napájecí napětí V_2 , které se postupně zvyšuje od 2 V s inkrementem 2 V až do napětí 20 V.



(a) Zatěžovací charakteristika



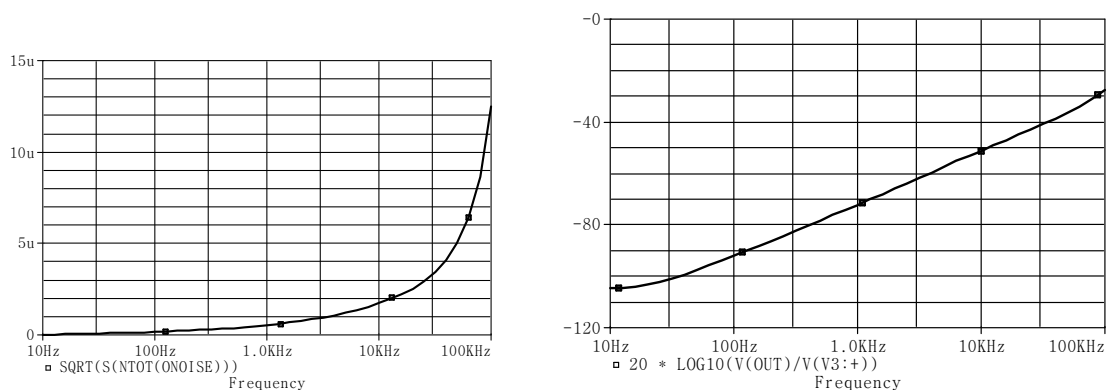
(b) Ztrátový výkon na tranzistoru IRF9530N

Obr. 4.11: Zatěžovací charakteristika pro zapojení stabilizátoru s OZ LM7301 (a) a výkonová ztráta na tranzistoru IRF9530N (b) při nastaveném výstupním napětí +5 V

Průběhy v grafech na obrázku 4.11 postupně znázorňují zatěžovací charakteristiku a ztrátový výkon na tranzistoru při napájecím napětí, které je 2 V až do hodnoty napájecího

napětí 20 V. Průběhy pro nejnižší hodnotu napájecího napětí nekorrespondují s ostatními průběhy.

Velikost efektivní hodnoty šumového napětí stabilizátoru složeného z diskretních součástek s výstupním napětím nastaveným na +5 V v pásmu 10 Hz až 100 kHz je 12,519 μV viz obr. 4.12. Velikost činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) na kmitočtu 120 Hz je -90,629 dB a na kmitočtu 1 kHz je PSRR -72,209 dB viz obr. 4.12. Schéma zapojení pro měření činitele PSRR je na obrázku 4.10.



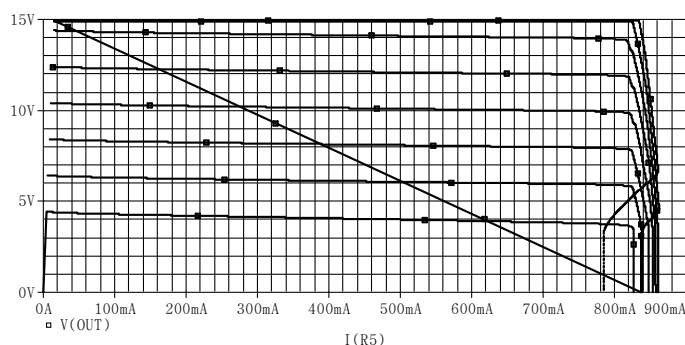
(a) Efektivní hodnota šumového napětí ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz

(b) Činitel potlačení zvlnění napájecího napětí

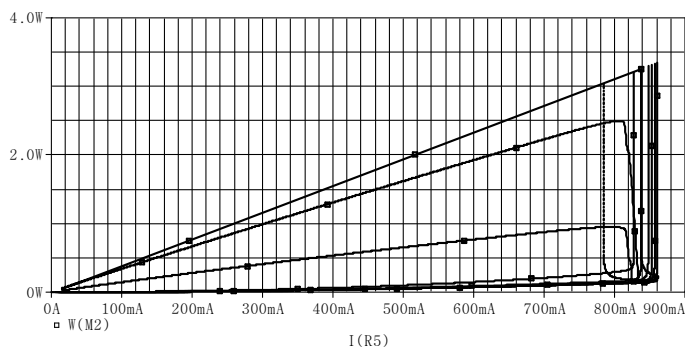
Obr. 4.12: Frekvenční závislost efektivní hodnoty šumového napětí a činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) při nastaveném výstupním napětí stabilizátoru +5 V

4.2.2 Stabilizátor s výstupním napětím +15 V z diskretních součástek

Stabilizátor je zapojen podle schéma na obrázku 4.10. Odporový dělič R_1 a R_2 je nastaven podle rovnice 4.2. Zatěžovací charakteristika zapojení a výkonová ztráta na tranzistoru je na obrázku 4.13. Výkonová ztráta na regulačním tranzistoru pro uvažované maximální proudové zatížení 1 A je 5,38 W viz obr. 4.13 při vstupním napětí 20 V. Jako parametr bylo zvoleno napájecí napětí V_2 , které se postupně zvyšuje od 2 V s inkrementem 2 V až do napětí 20 V.



(a) Zatěžovací charakteristika

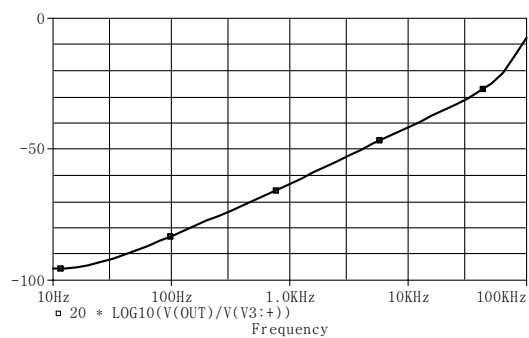
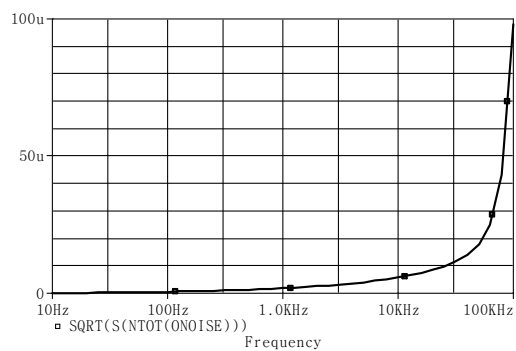


(b) Ztrátový výkon na tranzistoru IRF9530N

Obr. 4.13: Zatěžovací charakteristika pro zapojení stabilizátoru s OZ LM7301 (a) a výkonová ztráta na tranzistoru IRF9530N (b) při nastaveném výstupním napětí +15 V

Průběhy v grafech na obrázku 4.13 postupně znázorňují zatěžovací charakteristiku a ztrátový výkon na tranzistoru při napájecím napětí, které je 2 V až do hodnoty napájecího napětí 20 V. Průběhy pro nejnižší hodnotu napájecího napětí nekorespondují s ostatními průběhy.

Velikost efektivní hodnoty šumového napětí stabilizátoru složeného z diskretních součástek s výstupním napětím nastaveným na +15 V v pásmu 10 Hz až 100 kHz je 95,639 μV viz obr. 4.14. Velikost činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) na kmitočtu 120 Hz je -81,636 dB a na kmitočtu 1 kHz je PSRR -63,131 dB viz obr. 4.14. Schéma zapojení pro měření činitele PSRR je na obrázku 4.10.



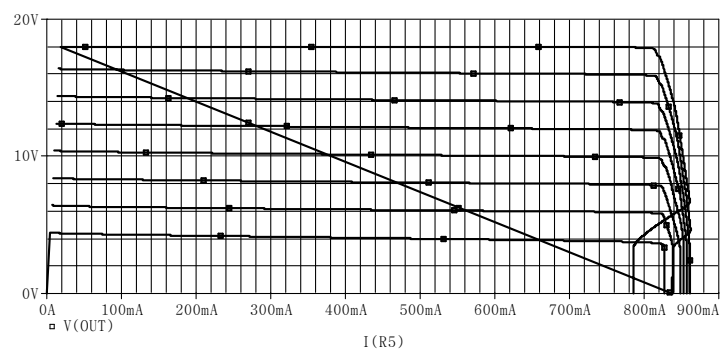
(a) Efektivní hodnota šumového napětí ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz

(b) Činitel potlačení zvlnění napájecího napětí

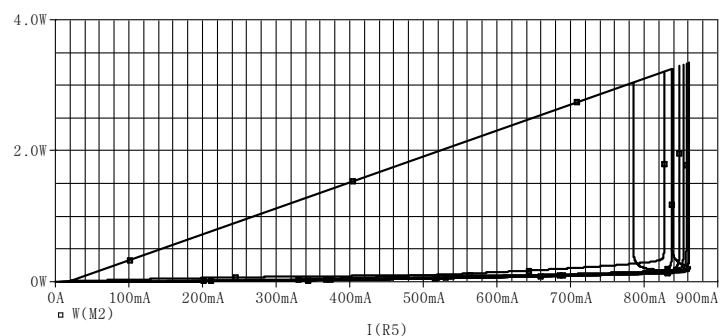
Obr. 4.14: Frekvenční závislost efektivní hodnoty šumového napětí a činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) při nastaveném výstupním napětí stabilizátoru +15 V

4.2.3 Stabilizátor s výstupním napětím +18 V z diskretních součástek

Stabilizátor je zapojen podle schéma na obrázku 4.10. Odporový dělič R_1 a R_2 je nastaven podle rovnice 4.2. Zatěžovací charakteristika zapojení a výkonová ztráta na tranzistoru je na obrázku 4.15. Výkonová ztráta na regulačním tranzistoru pro uvažované maximální proudové zatížení 1 A je 2,09 W viz obr. 4.15 při vstupním napětí 20 V. Jako parametr bylo zvoleno napájecí napětí V_2 , které se postupně zvyšuje od 2 V s inkrementem 2 V až do napětí 20 V.



(a) Zatěžovací charakteristika

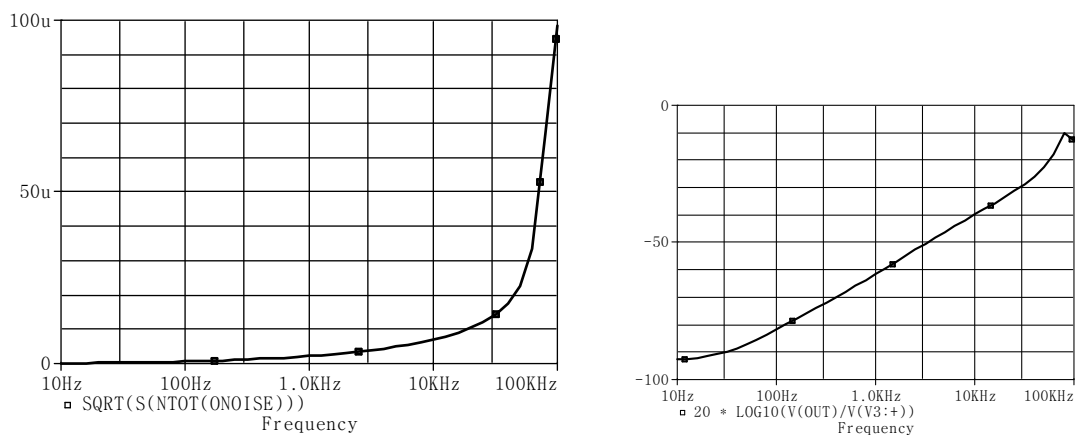


(b) Ztrátový výkon na tranzistoru IRF9530N

Obr. 4.15: Zatěžovací charakteristika pro zapojení stabilizátoru s OZ LM7301 (a) a výkonová ztráta na tranzistoru IRF9530N (b) při nastaveném výstupním napětí +18 V

Průběhy v grafech na obrázku 4.15 postupně znázorňují zatěžovací charakteristiku a ztrátový výkon na tranzistoru při napájecím napětí, které je 2 V až do hodnoty napájecího napětí 20 V. Průběhy pro nejnižší hodnotu napájecího napětí nekorrespondují s ostatními průběhy.

Velikost efektivní hodnoty šumového napětí stabilizátoru složeného z diskretních součástek s výstupním napětím nastaveným na +18 V v pásmu 10 Hz až 100 kHz je 98,658 μV viz obr. 4.16. Velikost činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) na kmitočtu 120 Hz je -80 dB a na frekvenci 1 kHz je PSRR -61,567 dB viz obr. 4.16. Schéma zapojení pro měření činitele PSRR je na obrázku 4.10.



(a) Efektivní hodnota šumového napětí ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz (b) Činitel potlačení zvlnění napájecího napětí

Obr. 4.16: Frekvenční závislost efektivní hodnoty šumového napětí a činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) při nastaveném výstupním napětí stabilizátoru +18 V

4.2.4 Výsledky optimalizace stabilizátoru složeného z diskretních součástek

Lineární stabilizátor z diskretních součástek lze použít pro napěťové hladiny +5 V, +15 V a +18 V podle zadání diplomové práce.

Stabilizátor s výstupním napětím +5 V má efektivní hodnotu výstupního šumového napětí ve frekvenčním rozsahu 10 Hz až 100 kHz $12,497 \mu\text{V}$, činitel potlačení zvlnění napájecího napětí PSRR na frekvenci 120 Hz je $-90,629 \text{ dB}$.

Stabilizátor s výstupním napětím +15 V má efektivní hodnotu výstupního šumového napětí ve frekvenčním rozsahu 10 Hz až 100 kHz $98,085 \mu\text{V}$, činitel potlačení zvlnění napájecího napětí PSRR na frekvenci 120 Hz je $-81,636 \text{ dB}$.

Stabilizátor s výstupním napětím +18 V má efektivní hodnotu výstupního šumového napětí ve frekvenčním rozsahu 10 Hz až 100 kHz $94,771 \mu\text{V}$, činitel potlačení zvlnění napájecího napětí PSRR na frekvenci 120 Hz je -80 dB .

Tyto hodnoty efektivního šumového napětí a činitele potlačení zvlnění napájecího napětí jsou nižší než hodnoty monolitických stabilizátorů řady 78xx, a řady 317 a blíží se svými parametry nízkošumovým stabilizátorům ADP7104, TPS7A4901, LT1962 a LT1965 viz tabulky 3.1, 3.3 a 3.5.

Pro praktickou realizaci lineárního stabilizátoru bylo vybráno zapojení podle článku [29] a dále zapojení s výstupním napětím +18 V. Jako napěťová reference byla zvolena u obou zapojení reference LM4040 s referenčním napětím 2,048 V.

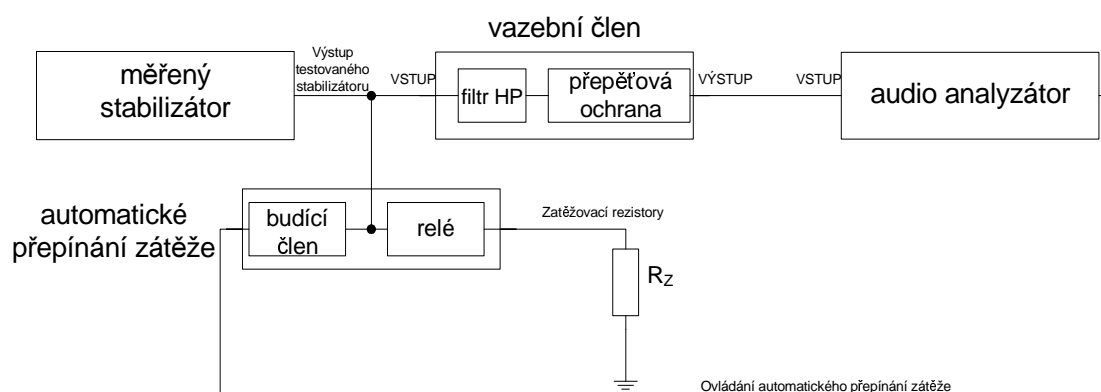
Součástky potřebné pro sestavení těchto stabilizátorů byly dodány se zpožděním, moduly těchto stabilizátorů se nepodařilo z tohoto důvodu oživit.

5

Návrh přípravků pro měření lineárních stabilizátorů napětí

Tato kapitola se zabývá návrhem a konstrukcí přípravků použitých pro měření efektivní hodnoty výstupního šumového napětí stabilizátorů, činitele potlačení zvlnění napájecího napětí a činitele zvlnění výstupního napětí. Mezi tyto přípravky patří přípravek vazebního členu, přípravek pro automatické skokové přepínání zátěže a moduly zatěžovacích rezistorů pro měřené lineární stabilizátory.

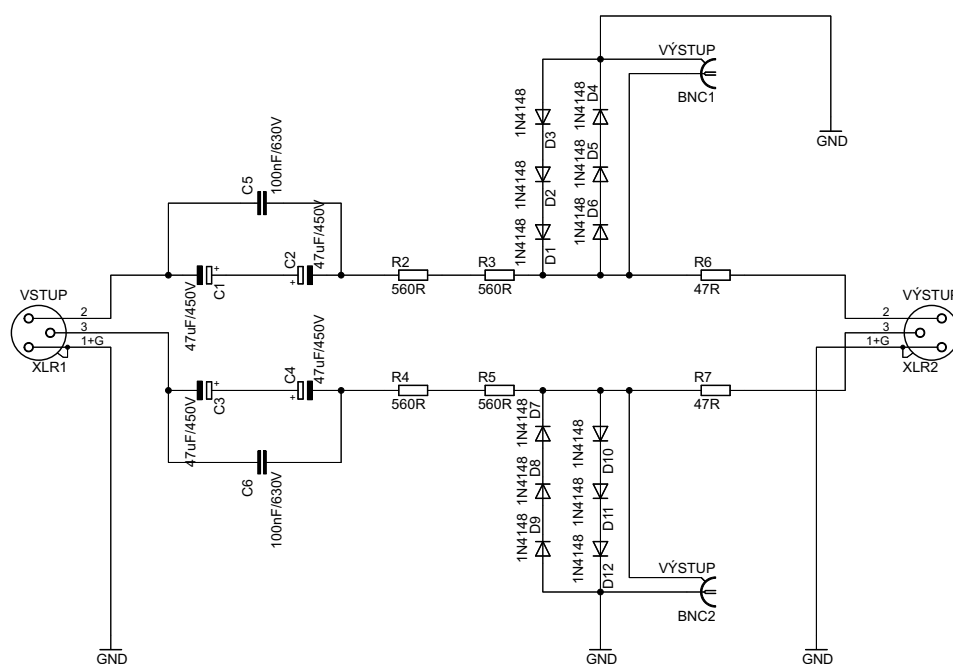
Parametry napěťových stabilizátorů jsou měřeny pomocí měřicího řetězce viz obrázek 5.1. Výstup testovaného stabilizátoru je připojen k vazebnímu členu, který odfiltruje stejnosměrnou složku signálu z testovaného stabilizátoru. Výstup stabilizátoru je zároveň připojen k modulu pro automatické přepínání zátěže, do kterého jsou připojeny moduly zatěžovacích rezistorů, které zatíží výstup stabilizátoru proudem 100 mA, 200 mA, 500 mA a 700 mA. Modul pro automatické přepínání zátěže je řízen pomocí TTL logiky na výstupu audio analyzátoru [2].



Obr. 5.1: Blokové schéma měřicího řetězce obsahující napěťový zdroj s lineárním stabilizátorem, vazební člen a měřicí analyzátor

5.1 Návrh vazebního členu

Vazební člen umožňuje propojení měřeného zdroje s lineárním stabilizátorem a s audio analyzátozem Audio Precision AP SYS2722 (obr. 5.1). Tento člen je konstruován jako symetrický obvod připojený přes konektory XLR k měřenému zdroji a analyzátoru. Na vstupu vazebního členu je filtr typu horní propust, mezní frekvence byla zvolena 0,066 Hz dle rov. 5.6, z důvodu potlačení stejnosměrné složky. Vazební člen plní funkci ochrany vstupu analyzátoru AP SYS2722 se vstupní symetrickou impedancí: $R_Z = 200 \text{ k}\Omega/95 \text{ pF}$.



Obr. 5.2: Schéma zapojení vazebního členu

Hodnoty součástí vazebního členu jsou uvedeny v tabulce A.1. R_Z je hodnota vstupní impedance analyzátoru AP SYS2722. Filtr typu horní propust vazebního členu je složen z rezistorů a kondenzátorů:

$$R = R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_Z = 202334 \Omega \quad (5.1)$$

$$C_{1,2,5} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + C_5 \quad (5.2)$$

$$C_{3,4,6} = \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4} + C_6 \quad (5.3)$$

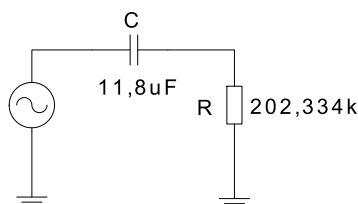
$$C = \frac{C_{1,2,5} \cdot C_{3,4,6}}{C_{1,2,5} + C_{3,4,6}} \quad (5.4)$$

Z rov. 5.1 a rov. 5.4 jsou hodnoty kondenzátoru a rezistoru tvořící filtr typu horní propust (viz obr. 5.3): $R = 202,334 \text{ k}\Omega$ a $C = 11,8 \mu\text{F}$.

Výpočet mezní frekvence filtru typu dolní propust 5.3:

$$\tau = RC \quad (5.5)$$

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = 0,066 \text{ Hz} \quad (5.6)$$

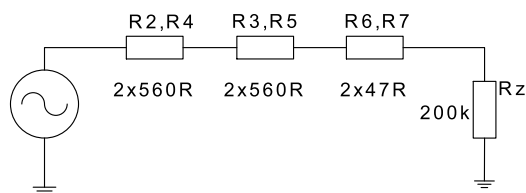


Obr. 5.3: Celkové hodnoty rezistorů a kondenzátorů vazebního členu pro funkci dolní propusti

Ochranné diody D_{1-12} omezují vstupní napětí na hodnotu $\max \pm 2,1 \text{ V}$. Rezistory R_6 a R_7 slouží jako další ochrana vstupu analyzátoru Audio Precision při přerušení ochranných diod D_{1-12} . BNC1 a BNC2 konektory (obr. 5.2) jsou vyvedeny z vazebního členu pro připojení k osciloskopu nebo spektrálnímu analyzátoru z důvodu možnosti sledování vysokých frekvencí vstupního signálu v jednotlivých větvích vazebního členu.

5.1.1 Výpočet amplitudové chyby vazebního členu

Amplitudová chyba obvodu je způsobena napěťovým děličem, který je složen z rezistorů na obrázku 5.4. Toto zapojení vychází z úvahy připojeného výstupu měřeného stabilizátoru proti zemi ke vstupu vazebního členu. Zapojení vazebního členu je symetrické, a to z důvodu snahy o symetrizaci celého měřicího řetězce až k měřenému objektu.



Obr. 5.4: Zapojení rezistorů pro výpočet amplitudové chyby (zjednodušeno pro nesymetrické zapojení)

Vztah mezi vstupním a výstupním napětím je následovný:

$$U_{OUT} = U_{IN} \frac{R_Z}{R_Z + (R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7)} = 0,98846 \quad (5.7)$$

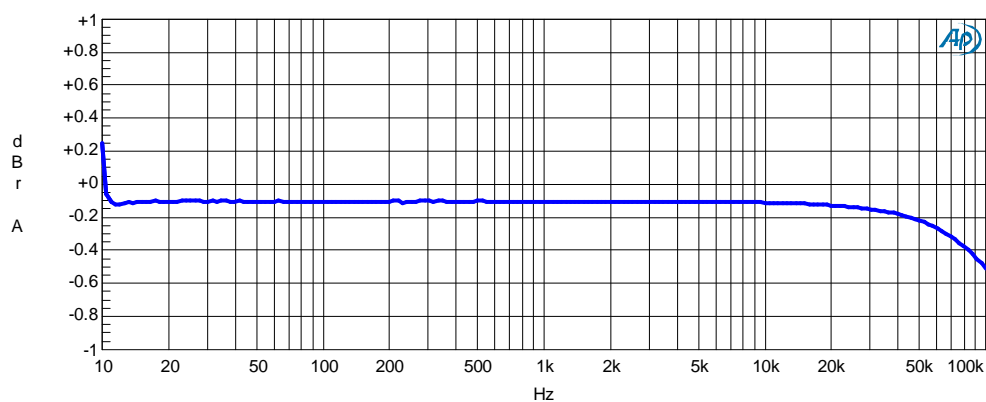
$$L = 20 \log \left| \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right| = 20 \log |0,98846| = 0,1 \text{ dB} \quad (5.8)$$

Amplitudová chyba vyjádřená jako útlum vstupního signálu vůči výstupnímu signálu je 0,1 dB.

Na obrázku 5.5 je uvedena frekvenční charakteristika útlumu vazebního členu.

Audio Precision

05/16/12 21:13:52



Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment
1	1	Blue	Solid	3	Anr.Level A	Left	

frekvenci_charka.at27

Obr. 5.5: Frekvenční charakteristika útlumu vazebního členu ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz

5.1.2 Výpočet šumu rezistorů vazebního členu

Rezistor je součástka produkující bílý šum. Spektrální výkonová hustota šumu rezistoru je konstantní pro celé kmitočtové spektrum.

Teoretický výpočet efektivní hodnoty šumového napětí na rezistoru udává rovnice 5.9:

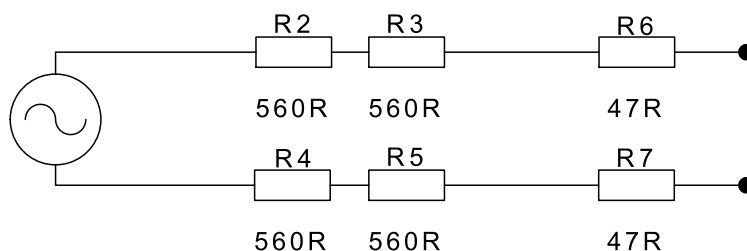
$$u_{NOISE} = \sqrt{4kTBR} \quad [V/\sqrt{Hz}] \quad (5.9)$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

T je teplota v K

B je šířka pásma v Hz, ve kterém je rezistor používán

R je nominální hodnota odporu v Ω .



Obr. 5.6: Schéma zapojení rezistorů vazebního členu pro výpočet celkového šumového napětí rezistorů vazebního členu

Hodnoty šumu rezistorů jsou počítány pro tři různé šířky frekvenčního pásma. Pásmo $B_1 = 20 \text{ kHz}$ bylo zvoleno s ohledem na šířku audio pásma. Pásmo $B_2 = 100 \text{ kHz}$ je pásmo udávané výrobcí lineárních stabilizátorů pro měření PSRR. Pásmo $B_3 = 500 \text{ kHz}$ udává frekvenční rozsah audio analyzátoru AP SYS2722 [2].

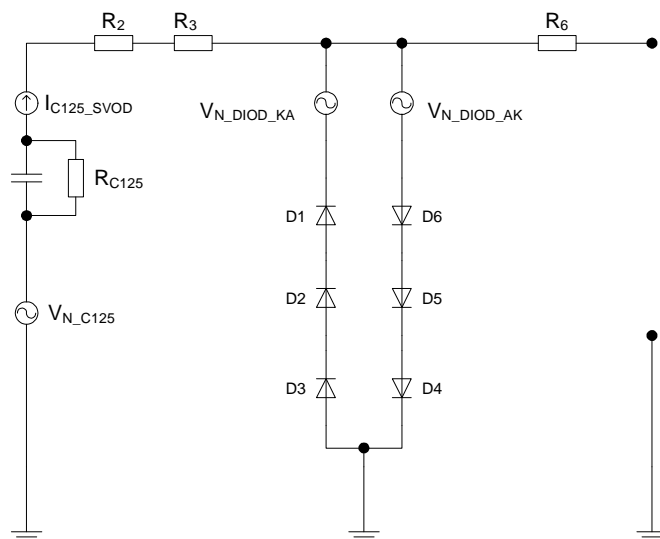
Tabulka 5.1 udává teplotní šum rezistorů použitých ve vazebním článku pro teplotu 27°C .

$R[\Omega]$	560R	47R
$U_{R20kHz} [\mu V/\sqrt{Hz}]$	0,43	0,12
$U_{R100kHz} [\mu V/\sqrt{Hz}]$	0,96	0,27
$U_{R500kHz} [\mu V/\sqrt{Hz}]$	2,15	0,62

Tab. 5.1: Výpočet jednotlivých šumových napětí použitých rezistorů pro šířku pásma $B_1 = 20 \text{ kHz}$, $B_2 = 100 \text{ kHz}$ a $B_3 = 500 \text{ kHz}$ pro teplotu 27°C

5.1.3 Výpočet celkového šumového napětí jedné větve vazebního členu

Výpočet celkového šumového napětí jedné větve vazebního členu udává rovnice ??



Obr. 5.7: Šumový model jedné větve vazebního členu

V_{N_C125} udává šumové napětí způsobené vlastní kapacitou kondenzátorů C_1 , C_2 a C_5 viz obr. 5.2 podle rovnice 5.10 [4], kde k je Boltzmannova konstanta, T je teplota v Kelvinech a C je kapacita kondenzátoru. Pro celkovou kapacitu v jedné větvi vazebního členu vychází efektivní hodnota šumového napětí 13,29 nV podle rovnice 5.10. Rezistor R_{C125} představuje svodový odpor kondenzátoru C_{125} , na kterém byl naměřen svodový proud $60,2 \mu\text{A}$ při působení napětí o velikosti 450 V. Svodový proud se rozděluje a teče do vstupu analyzátoru, který má vstupní impedanci $200 \text{ k}\Omega$, do kterého teče $10,5 \mu\text{A}$ a na proud tekoucí přes diody. V_{N_DIOD} je šumové napětí ochranných diod protékaných proudem $49,7 \mu\text{A}$ pro trojici diod podle orientace napětí.

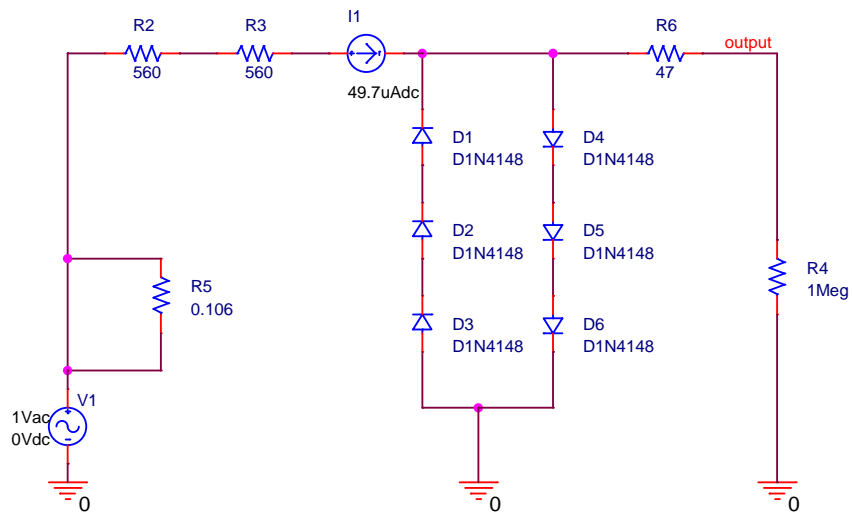
$$U_{N_{kap}} = \sqrt{\frac{kT}{C}} = \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 302,15}{23,6 \cdot 10^{-6}}} = 13,3 \text{ nV} \quad (5.10)$$

Obrázek 5.8 znázorňuje zapojení v programu PSPICE pro simulaci efektivní hodnoty výstupního šumového napětí jedné větve vazebního členu 5.9. Rezistor R_5 reprezentuje šumové napětí kondenzátorů C_1 , C_2 a C_5 , zdroj $I1$ reprezentuje stejnosměrný proud protékaný antiparalelním zapojením trojice diod D_{1-6} .

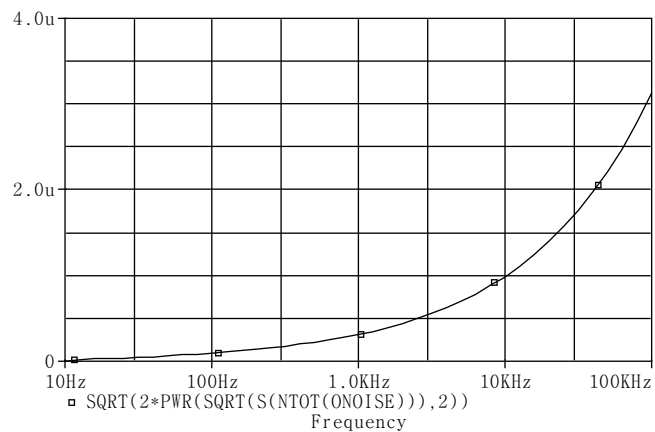
Velikost rezistoru R_5 se vypočítá podle rovnice 5.9, kde u_{NOISE} je šumové napětí podle rovnice 5.10. Rezistor R_5 má potom hodnotu $0,106 \Omega$.

Celková efektivní hodnota šumového napětí jedné větve vazebního členu ve frekvenčním pásmu 100 kHz podle obrázku 5.9 je $3,1229 \mu\text{V}$.

Měřená efektivní hodnota pomocí analyzátoru AP SYS 2722 je $2,3 \mu\text{V}$ ve frekvenčním pásmu 80 kHz a $5,8 \mu\text{V}$ ve frekvenčním pásmu 500 kHz.



Obr. 5.8: Zdroje šumového napětí jedné větve vazebního členu

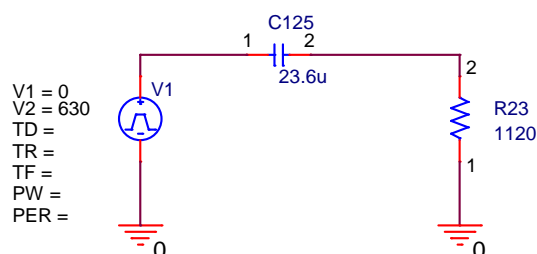


Obr. 5.9: Efektivní hodnota výstupního šumového napětí obou větví vazebního členu v závislosti na šířce pásma

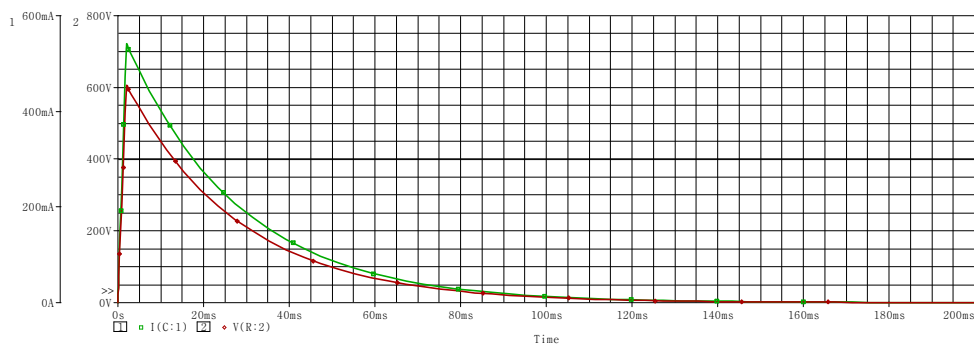
5.1.4 Výpočet mezních parametrů vazebního členu

Mezní parametry představují maximální stejnosměrné napětí, přivedené na vstup, které nezničí součástky vstupního filtru v obvodu vazebního členu. Elektrolytické kondenzátory zapojené v každé větvi do série jsou dimenzovány každý na 450V. Napětí a kondenzátorech C_1 , C_2 a C_3 , C_4 může být až 900 V (2 x 450 V) v případě stejných svodů kondenzátorů, ale kondenzátory C_5 a C_6 jsou dimenzovány na napětí 630 V. Jako testovací signál byl použit impuls o amplitudě 630 V obr. 5.11. Toto napětí prochází přes kondenzátory C_1 , C_2 a C_5 , rezistory R_2 a R_3 v jedné větvi vazebního členu a uzavírá se přes ochranné diody D_4 až D_6 pro kladný impuls nebo D_1 až D_3 pro záporný impuls do země obr. 5.2. Celková kapacita jedné větve vazebního členu pro výpočet přechodového děje C_{125} je $23,6 \mu\text{F}$ podle rov. 5.2 a odpor R_{23} je 1120Ω podle rovnice 5.11.

$$R_{23} = R_2 + R_3 = 1120 \Omega \quad (5.11)$$



Obr. 5.10: Testovací impuls pro přechodový děj



Obr. 5.11: Průběhy stejnosměrného napětí a nabíjecího proudu na kondenzátoru C na obr. 5.10 při působení skokového signálu o amplitudě 630 V

Přechodový děj odezní za dobu 140 ms. Špičková hodnota proudu vazebním členem je 542 mA, napětí na kondenzátorech při přechodovém ději je 607 V. Použité ochranné diody D_{1-12} jsou dimenzovány na špičkový proud 4 A po dobu $1 \mu\text{s}$, trvalý povolený proud diod je 200 mA. Mezní hodnoty napětí a proudu vazebního členu jsou 607 V a 542 mA. Tyto hodnoty nemohou na vazebním členu nastat, došlo by k jeho poškození.

Útlum vazebního členu je 0,1 dB. Přechodový děj při použití napěťového impulsu o velikosti 630 V na vazebním členu trvá po dobu 140 ms, špičková krátkodobá hodnota proudu

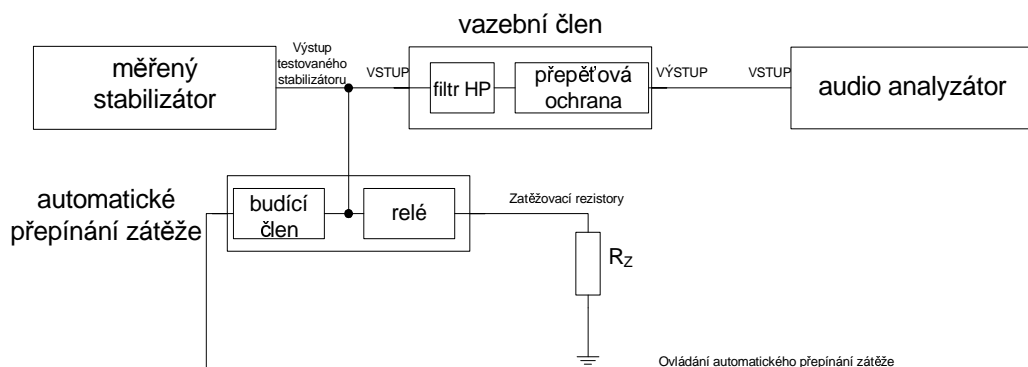
je 542 mA, tato hodnota je nižší než udávaný krátkodobý proud diodou 1N4148, který je 1 A po dobu 1 μ s. Špička napětí na kondenzátorech C_1 , C_2 a C_5 při působení přechodového děje je 607 V. Tyto hodnoty při krátkodobém působení mohou poškodit vazební člen.

5.1.5 Realizace zapojení vazebního členu

Celý obvod je stíněn v krabici z duralového profilu (obr. A.1). Krabice pro plošný spoj má rozměr 100,3 mm pro zasunutí plošného spoje (obr. A.2), nad plošným spojem je cca 35 mm pro součástky. Sériové kondenzátory, pro oddělení stejnosměrné složky, mají výšku 36 mm, proto je v návrhu desky plošného spoje ponechána mezera s rozlitou zemní plochou pro ohyb kondenzátorů. U posledního rozměru se počítá s rezervou pro upevnění XLR a BNC konektorů na čelní, případně zadní panel. BNC konektory jsou použity pro sledování průběhu signálu na osciloskopu při vysokých frekvencích vstupního signálu, se kterými již analyzátor nepracuje. Kondenzátory C_5 a C_6 viz obrázek 5.2 potlačují nárůst impedance elektrolytických kondenzátorů ($C_1 - C_4$) se vzrůstajícím kmitočtem.

Pro připojení konektorů jsou použity kontaktní třípinové lišty, svorkovnice JP1 pro připojení vstupního XLR konektoru, JP2 pro výstupní XLR. Svorkovnice JP3 a JP4 připojuje BNC konektory pro každou symetrickou větev obr. A.3.

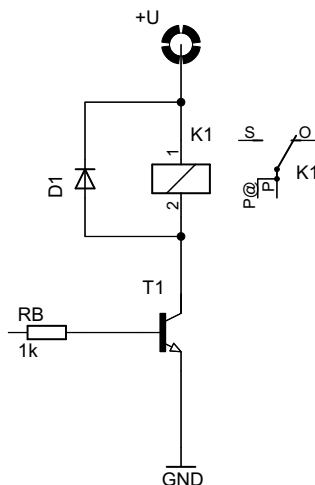
5.2 Automatické přepínání zátěže testovaného lineárního stabilizátoru napětí



Obr. 5.12: Blokové schéma automatického přepínání zátěže pro testovaný stabilizátor napětí

Automatické přepínání zátěže je řešeno pomocí tranzistoru, který budí napěťovou cívku relé napětím 5 V TTL logika. Celé buzení cívky relé je ovládáno pomocí přídavného multifunkčního modulu DCX127 pro audio analyzátor AP SYS2722. Tento modul umožňuje řízení výstupů pomocí softwaru společnosti Audio Precision APWIN. V modulu DCX127 je využit výstup AUX, který je osazen 9-ti pinovým konektorem standardizace DB9 obr. A.4. Do přípravku pro automatické přepínání zátěže lze připojit a přepínat až 8 různých zatěžovacích modulů obr. B.37 - B.54.

5.2.1 Návrh budiče relé automatizovaného přepínání zátěže



Obr. 5.13: Zapojení budiče relé pro spínání zátěže lineárního stabilizátoru napětí

Pro ovládání zátěže byla použita relé s napětím cívky 5 V viz obrázek 5.13. Relé spínají proud až 3 A a napětí 120 V. Tato relé jsou ovládána pomocí TTL úrovní. Požadovaný spínací proud cívkou relé je 100 mA a proud, který jsou schopny dodat TTL výstupy modulu DCX127 je 5 mA. Požadovaného spínacího proudu je dosaženo pomocí budiče, který se skládá z rezistoru R_1 a tranzistoru T_1 . Požadovaný proudový zisk h_{FE} tranzistoru T_1 podle rovnice 5.12, je 20.

$$h_{FE} = \frac{I_{C_{poz}}}{I_{LS-TTL}} = \frac{0,1}{0,005} = 20 \quad (5.12)$$

kde $I_{C_{poz}}$ je požadovaný proud kolektorem tranzistoru a I_{LS-TTL} je proud, který je schopen dodat TTL výstup modulu DCX127.

$$I_B = \frac{I_{C_{poz}}}{h_{FE}} = \frac{0,1}{20} = 5 \text{ mA} \quad (5.13)$$

Rovnice 5.13 udává hodnotu proudu do báze tranzistoru.

$$R_B = \frac{U_B}{I_B} = \frac{4,5}{0,005} = 900 \Omega \quad (5.14)$$

V rovnici 5.14 pro výpočet rezistoru R_B do báze tranzistoru T_1 je U_B napětí v sepnutém stavu logiky LS-TTL (4,5 V).

Odpor báze tranzistoru je 900Ω z rov. 5.14, $R_B = 1 \text{ k}\Omega$ (standardizovaná řada E12). Pro dostatečné splnění požadovaného proudového zisku h_{FE} byl vybrán NPN tranzistor 2N2222A.

5.2.2 Popis zapojení automatického přepínání zátěže testovaného lineárního stabilizátoru napětí

Schéma zapojení je na obrázku A.4, tento modul je propojen s audio analyzátozem pomocí kabelu s 9-ti pinovými konektory standardizace DB9. Pin č. 9 v konektoru DB9 viz obrázek A.4 je zemním vodičem, ostatní piny (č. 1 - 8) jsou LS-TTL výstupy z přídatného modulu DCX127. Tyto výstupy používají LS-TTL logiku, napětí v sepnutém stavu je 4,5 V, maximální proud je 5 mA. Pomocí těchto pinů přes rezistory 1 k Ω a tranzistory 2N2222A jsou ovládána relé, která spínají moduly zatěžovacích rezistorů obr. B.37 - B.54. Cívka relé je napájena napětím +5V z vnějšího stejnosměrného zdroje napětí. Cívka relé je přemostěna ochrannou diodou v závěrném směru, která potlačuje spínací přepětí. Moduly zatěžovacích rezistorů jsou na obr. A.4 znázorněny zatěžovacími rezistory RZ . Na obr. A.5 je deska plošného spoje a na obr. A.6 je rozmístění součástek modulu pro automatické přepínání zátěže testovaného lineárního stabilizátoru napětí.

5.3 Zatěžovací moduly testovaného lineárního stabilizátoru napětí

Zatěžovací moduly byly sestavovány pro zatížení lineárních stabilizátorů napětí o jmenovitých hodnotách ± 5 V, ± 15 V, ± 18 V, ± 24 V, ± 48 V a +200 V. Pro každou hodnotu napětí byly vytvořeny zatěžovací moduly pro proudové zatížení 50 mA, 100 mA, 200 mA, 500 mA a 700 mA.

5.4 Návrh chlazení lineárních stabilizátorů napětí

Moduly lineárních stabilizátorů napětí byly navrženy pro univerzální přípravek lineárního napěťového zdroje s možností symetrického výstupního napětí viz obr. 5.14. Z důvodu použití tohoto přípravku pro stabilizátory s různým výstupním napětím vzniká na lineárních stabilizátorech o jmenovitém napětí ± 5 , ± 15 a ± 18 V ztrátový výkon, který musí být chlazen dostatečně dimenzovaným chladičem.

5.4.1 Výpočet chladiče lineárního stabilizátoru o jmenovitém napětí ± 5 V

Ztrátový výkon P_{TOT} je výkon, který vzniká úbytkem napětí na stabilizátoru podle rovnice 5.15.

$$P_{TOT} = (U_C - U_{stab})I_{MAX} \quad (5.15)$$

U_C je napětí na filtračním kondenzátoru lineárního zdroje obr. 5.14. Toto napětí pro navržený přípravek lineárního zdroje je 34,2 V dle rovnice 5.16. U_{stab} je výstupní napětí

stabilizátoru a I_{MAX} je maximální povolený proud stabilizátorem.

$$U_C = 1,05\sqrt{2}U_{SEK} - 2U_D \quad (5.16)$$

Rovnice 5.16 je převzata z [3]. U_{SEK} je napětí na sekundární straně transformátoru, použitý transformátor má sekundární napětí 24 V. Konstantou 1,05 uvažujeme vliv kolísání sítě 5 %, napětí U_D reprezentuje úbytek na diodách usměrňovacího můstku (2 x 0,7 V). Ztrátový výkon P_{TOT} pro napěťový stabilizátor $\pm 5V$ s maximálním povoleným proudem 1 A je 29,2 W.

$$\vartheta_j - \vartheta_a \geq (R_{THCJ} + R_{THCR} + R_{THRA})P_{TOT} \quad (5.17)$$

Rovnice 5.17 je převzata z [3]. ϑ_j je teplota přechodu stabilizátoru (150°C pro křemíkový čip), ϑ_a je teplota okolí (30°C), R_{THCJ} je tepelný odpor mezi čipem a pouzdem stabilizátoru (3°C/W), R_{THCR} je tepelný odpor mezi pouzdem stabilizátoru a chladičem, zde je uvažována izolační Kaptonová podložka (0,07°C/W) a R_{THRA} je tepelný odpor mezi chladičem a okolím.

Pro stabilizátor o jmenovitém výstupním napětí $\pm 5V$ je tepelný odpor chladiče $R_{THRA} \leq 1,039^\circ\text{C}/\text{W}$.

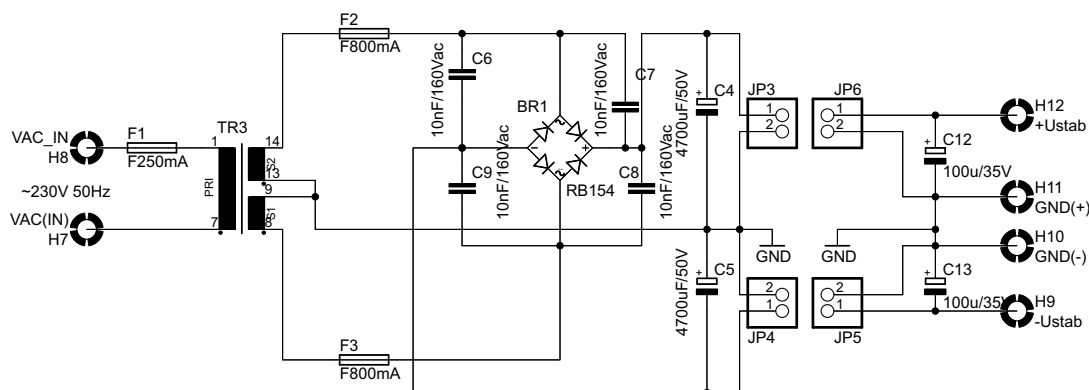
Pro tento stabilizátor je hodnota potřebného tepelného odporu chladiče nejnepříznivější, proto je uvažován chladič s touto hodnotou tepelného odporu i pro ostatní lineární stabilizátory napětí s vyššími napěťovými hladinami ($\pm 15V$, $\pm 18V$, $\pm 24V$, $\pm 48V$ a $+200V$).

Tepelný odpor chladiče pro stabilizátor o výstupním napětí $\pm 15V$ je maximálně 3,18°C/W, pro stabilizátor $\pm 18V$ je maximálně 4,33°C/W a pro stabilizátor $\pm 24V$ je maximálně 8,69°C/W. Pro stabilizátory s vyšším napětím se ztrátový výkon z rovnice 5.15 snižuje a není potřeba tyto stabilizátory chladit přidavným chladičem.

Stabilizátory o jmenovitém výstupním napětí $\pm 5V$, $\pm 15V$ a $\pm 18V$ je potřeba chladit chladičem s tepelným odporem 1,039°C/W. Pro vyšší výstupní napětí stabilizátorů není potřeba používat externí chladič.

5.5 Základna modulu napěťového zdroje pro měření lineárních stabilizátorů

Celé zapojení na obr. 5.14 je konstruováno jako symetrický napájecí zdroj s možností připojení modulu stabilizátoru pro kladnou a zápornou větev s maximálním proudovým zatížením 0,7 A. Napětí na vstupu stabilizátoru (svorkovnice JP3 a JP4) je podle rovnice 5.16 34,2 V.



Obr. 5.14: Schéma zapojení modulu základny lineárního zdroje

5.5.1 Popis zapojení základny modulu napěťového zdroje

Obvodové zapojení viz obr. 5.14 je převzato z [11] a doplněno o součástky podle potřeby výměnných modulů stabilizátorů. V obvodu je použit transformátor TR3 se symetrickým sekundárním obvodem (2 x 24 V 35 VA), který lze zatížit proudem až 0,73 A v každé větvi. Kondenzátory C_6 až C_9 zabraňují vysokofrekvenčnímu vyzařování diod usměrňovacího můstku BR1 do měřicího řetězce obr. 5.12. Elektrolitické kondenzátory C_4 a C_5 slouží k filtraci signálu za usměrňovacím můstkem. Do svorkovnic JP3 a JP6 lze umístit modul měřeného stabilizátoru kladného napětí, do svorkovnic JP4 a JP5 lze umístit modul měřeného stabilizátoru záporného napětí. Elektrolitické kondenzátory C_{12} a C_{13} slouží pro snížení výstupní impedance napájecího zdroje. [11].

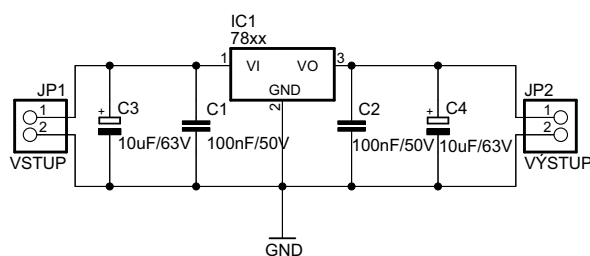
Osazovací plán DPS základny modulu napěťového zdroje je na obr. A.7. Zapojení DPS základny modulu napěťového zdroje je na obr. A.8.

5.6 Měřicí moduly lineárních napěťových stabilizátorů

Tyto moduly se skládají ze zapojení dané napěťového stabilizátoru podle doporučení výrobce. Moduly lze rozdělit na moduly pro kladné a záporné výstupní stabilizované napětí pro základnu zdroje s transformátorem se symetrickým výstupním napětím. Za filtračními kondenzátory je napětí 30,8 V, které je vstupním napětím těchto modulů. Moduly jsou sestavené z klasických stabilizátorů a také moderních stabilizátorů největších světových výrobců elektronických součástek o velikostech výstupních napětí dle zadání diplomové práce. Desky plošných spojů těchto modulů jsou vyrobeny jako oboustranné z důvodu minimalizace rozměrů jednotlivých modulů a umístění přípojovacích konektorů k základně napěťového zdroje.

5.6.1 Moduly stabilizátorů 7805, 7815, 7818 a 7824

Tyto moduly mají shodné schéma zapojení obr. 5.15. Tyto stabilizátory stabilizují vstupní napětí o velikosti až 40 V na hodnotu +5 V, +15 V, +18 V a +24 V. Jednotlivé moduly se skládají ze stabilizátoru IC1, kondenzátoru C_1 pro zvýšení stability stabilizátoru a doporučeného výstupního kondenzátoru C_2 , který plní funkci vyhlazení výstupního stabilizovaného napětí. Návrh desky plošného spoje a osazovací plán je na obr. B.1.

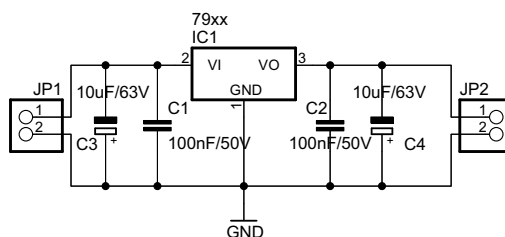


Obr. 5.15: Schéma zapojení modulu pro stabilizátory kladného napětí 7805, 7815, 7818 a 7824

Tyto typy stabilizátorů dovolují hodnotu výstupního proudu až 1 A při nastavených hodnotách výstupního kladného napětí +5 V, +15 V, +18 V a +24 V podle typu stabilizátoru.

5.6.2 Moduly stabilizátorů 7905, 7915, 7918 a 7924

Tyto moduly mají shodné schéma zapojení obr. 5.16. Tyto stabilizátory stabilizují vstupní napětí o velikosti až 40 V na hodnotu -5 V, -15 V, -18 V a -24 V. Tyto moduly jsou složeny ze stabilizátoru IC1, kondenzátoru C_1 , který zvyšuje stabilitu stabilizátoru a kondenzátoru C_2 doporučeného výrobcem pro vyhlazení stabilizovaného průběhu napětí. Návrhy desky plošného spoje a osazovací plán je na obr. B.2.



Obr. 5.16: Schéma zapojení modulu pro stabilizátory záporného napětí 7905, 7915, 7918 a 7924

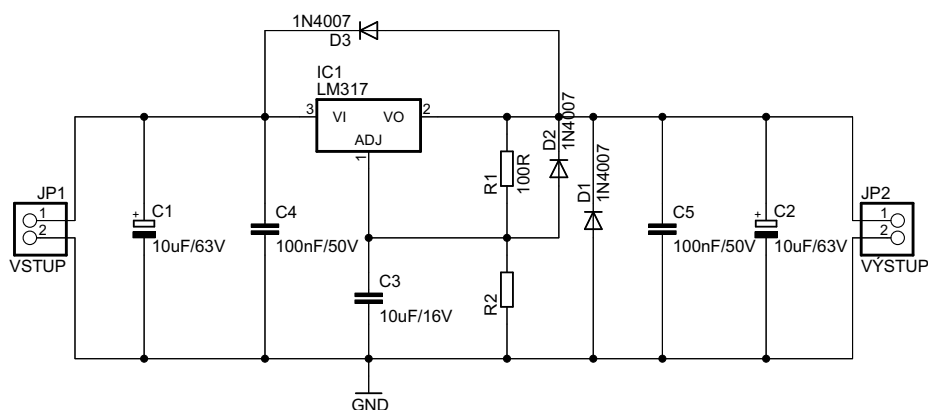
Tyto typy stabilizátorů dovolují hodnotu výstupního proudu až 1 A při nastavených hodnotách výstupního záporného napětí -5 V, -15 V, -18 V a -24 V podle typu stabilizátoru.

5.6.3 Moduly stabilizátorů řady 317

Schéma zapojení pro tyto moduly je na obr. 5.17. Moduly napěťových stabilizátorů řady 317 pro výstupní stabilizované napětí +5 V, +15 V, +18 V a +24 V se od sebe odlišují pouze velikostí rezistoru R_2 , který lze vypočítat podle rovnice 5.18. Velikost proudu I_{ADJ} je typicky 50 μA .

$$U_{VYSTUP} = U_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} R_2 \quad (5.18)$$

Referenční napětí obvodu řady 317 je 1,25 V, hodnota rezistoru R_1 byla zvolena 100 Ω . Pro výstupní napětí +5 V je hodnota rezistoru R_2 300 Ω , pro napětí +15 V je R_2 1,1 k Ω , pro napětí +18 V je hodnota R_2 1340 Ω a pro výstupní stabilizované napětí je hodnota rezistoru R_2 1820 Ω .



Obr. 5.17: Schéma zapojení modulu pro stabilizátory kladného napětí +5 V, +15 V, +18 V a +24 V řady 317

Kondenzátor C_1 , který má výrobcem doporučenou hodnotu kapacity, zvyšuje stabilitu celého obvodu. Napěťovým děličem R_1 a R_2 lze nastavit výstupní stabilizované napětí od hodnoty vnitřní reference 1,25 V až do 36 V. Napětí na svorkovnici VSTUP nesmí přesáhnout 40 V. Diody D_1 plní funkci ochranné diody pro případ prepólování výstupních svorek napěťového stabilizátoru H11 a H12 nebo H10 a H9 na obr. 5.14. Kondenzátor C_2 vyhlazuje průběh výstupního napětí. Kondenzátor C_3 vylepšuje zvlnění stabilizátoru a činitel PSRR. Kondenzátory C_4 , C_5 zajišťují frekvenční oddělení [12]. Ochranné diody D_2 a D_3 zabraňují při zkratu výstupních svorek vybíjení kondenzátorů přes nízkoimpedanční cesty integrovaného obvodu 317 a také vybíjení kondenzátoru C_3 do výstupních svorek [13].

Tyto typy stabilizátorů dovolují hodnotu výstupního proudu až 1,5 A při nastavených hodnotách výstupního kladného napětí +5 V, +15 V, +18 V a +24 V.

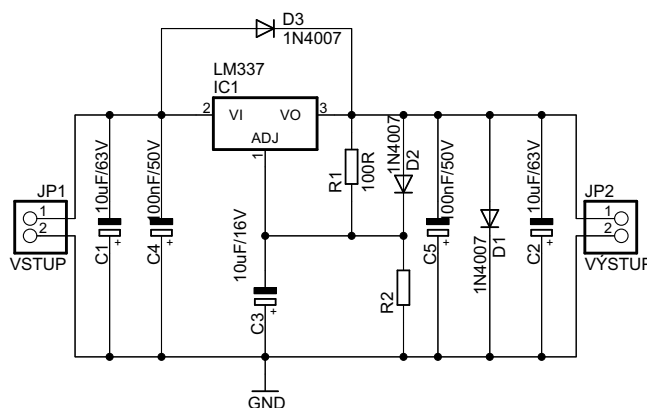
Zapojení desek plošných spojů těchto modulů a osazovací plány jsou na obr. B.3 až B.6.

5.6.4 Moduly stabilizátorů řady 337

Moduly napěťových stabilizátorů řady 337 pro stabilizaci záporných napětí -5 V , -15 V , -18 V a -24 V se od sebe odlišují poměrem napěťového děliče R_1 a R_2 na obr. 5.18. Výrobce doporučuje hodnotu rezistoru R_1 $100\ \Omega$. Velikost rezistoru pro záporná výstupní napětí se vypočítá podle rovnice 5.19, kde U_{REF} je vnitřní referenční napětí obvodu 337, které je $1,25\text{ V}$. Velikost proudu I_{ADJ} je typicky $50\ \mu\text{A}$.

$$U_{VYSTUP} = U_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} R_2 \quad (5.19)$$

Na VSTUP těchto modulů lze přivést maximální napětí 40 V . Hodnoty rezistoru R_2 pro výstupní napětí -5 V , -15 V , -18 V a -24 V jsou $300\ \Omega$, $1100\ \Omega$, $1340\ \Omega$ a $1820\ \Omega$.



Obr. 5.18: Schéma zapojení modulu pro stabilizátory záporného napětí -5 V , -15 V , -18 V a -24 V řady 337

Kondenzátor C_1 zvyšuje stabilitu celého obvodu. Tantalové kondenzátory C_3 a C_4 , které jsou v SMD provedení pro možnost připojení v blízkosti vývodů stabilizátoru 337, zvyšují stabilitu celého obvodu. Napěťovým děličem R_1 a R_2 lze nastavit výstupní stabilizované napětí od hodnoty vnitřní reference $1,25\text{ V}$ až do 36 V . Dioda D_1 plní funkci ochranné diody pro případ přepólování výstupních svorek napěťového stabilizátoru H11 a H12 nebo H10 a H9 na obr. 5.14. Výstupní kondenzátor C_2 vyhlazuje průběh výstupního napětí. Kondenzátor C_5 vylepšuje zvlnění stabilizátoru a činitel PSRR celého obvodu. Ochranné diody D_2 a D_3 zabraňují při zkratu výstupních svorek vybíjení kondenzátorů přes nízkoimpedanční cesty integrovaného obvodu 317 a také vybíjení kondenzátoru C_5 do výstupních svorek [14].

Tyto typy stabilizátorů dovolují hodnotu výstupního proudu až $1,5\text{ A}$ při nastavených hodnotách výstupního záporného napětí -5 V , -15 V , -18 V a -24 V .

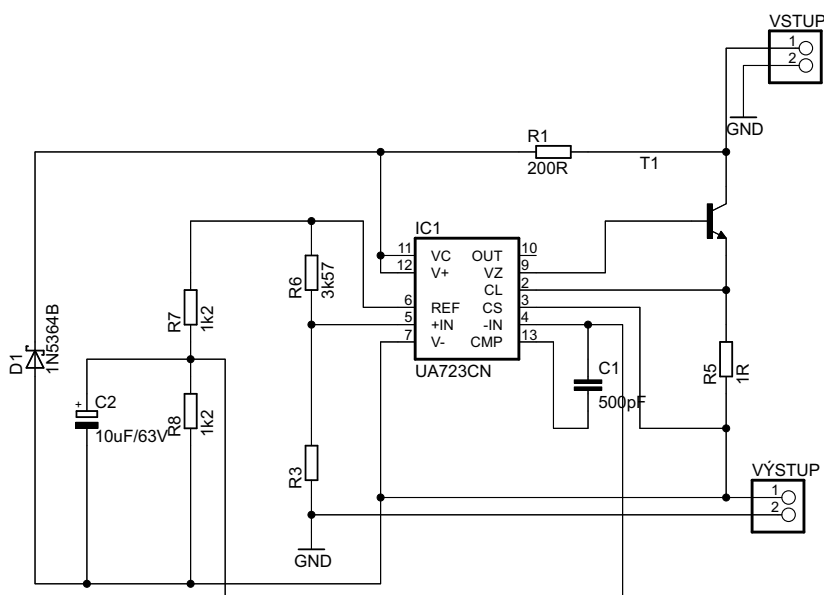
Zapojení desek plošných spojů těchto modulů a osazovací plány jsou na obr. B.7 až B.10.

5.6.5 Moduly stabilizátorů pro výstupní napětí +48 V a +200 V

Tyto moduly napěťových stabilizátorů jsou konstruovány podle doporučeného zapojení výrobce obvodu 723 společně s NPN tranzistorem. Na vstup tohoto obvodu lze přivést napětí o maximální hodnotě 40 V. Velikost výstupního napětí tohoto obvodu určuje poměr odporového děliče R_3 a R_6 podle rov. 5.20.

$$U_{VYSTUP} = \frac{U_{REF}}{2} \frac{R_3 - R_6}{R_6} \quad (5.20)$$

Rezistor R_6 3,57 k Ω je doporučený výrobcem. Zapojení těchto modulů je na obr. 5.19. Pro výstupní napětí +48 V podle rovnice 5.20 vychází velikost rezistoru R_3 51,5 k Ω zaokrouhlené pro odporovou řadu E12. Pro výstupní napětí +200 V je potřeba rezistoru R_3 o velikosti 204 k Ω .



Obr. 5.19: Schéma zapojení modulu pro stabilizátory kladného napětí +48 V a +200 V pomocí obvodu 723 a NPN tranzistoru

Zapojení desek plošných spojů a osazovací plány těchto modulů jsou na obr. B.11 a obr. B.12.

Výstupní napětí modulu +48 V je 47,49 V podle rovnice 5.20. Výstupní proud je až 0,7 A s ohledem na použitý transformátor. Výstupní napětí modulu +200 V je 200,71 V, podle rovnice 5.20. Výstupní proud je až 0,7 A s ohledem na použitý transformátor.

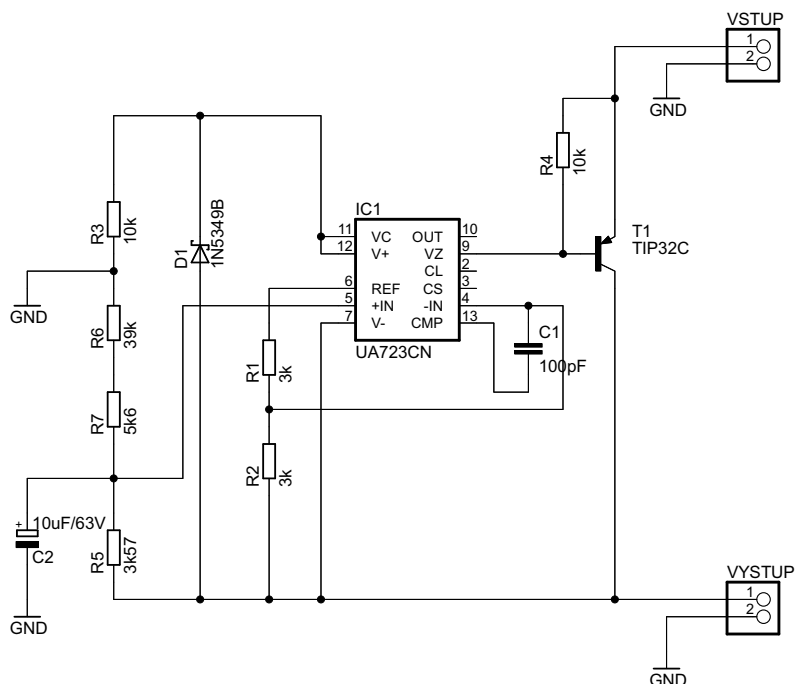
5.6.6 Modul stabilizátoru pro výstupní napětí -48 V

Tento modul obr. 5.20 napěťového stabilizátoru jsou konstruovány podle doporučeného zapojení výrobce obvodu 723 společně s PNP tranzistorem TIP 127. Na vstup tohoto

obvodu lze přivést napětí o maximální hodnotě 40 V. Velikost výstupního napětí tohoto obvodu určuje poměr odporového děliče složeného z rezistorů R_6 , R_7 a R_5 podle rov. 5.21.

$$U_{VYSTUP} = \frac{U_{REF}}{2} \frac{R_6 + R_7 + R_5}{R_5} \quad (5.21)$$

Pro záporné výstupní napětí -48 V je velikost rezistorů 39 k Ω pro rezistor R_6 a $5,6$ k Ω pro rezistor R_7 z rov. 5.21, tyto rezistory mají celkovou impedanci $44,6$ k Ω . Kondenzátor C_2 zvyšuje činitel PSRR a snižuje zvlnění výstupního regulovaného napětí.



Obr. 5.20: Schéma zapojení modulu pro stabilizátor záporného napětí -48 V pomocí obvodu 723 a PNP tranzistoru

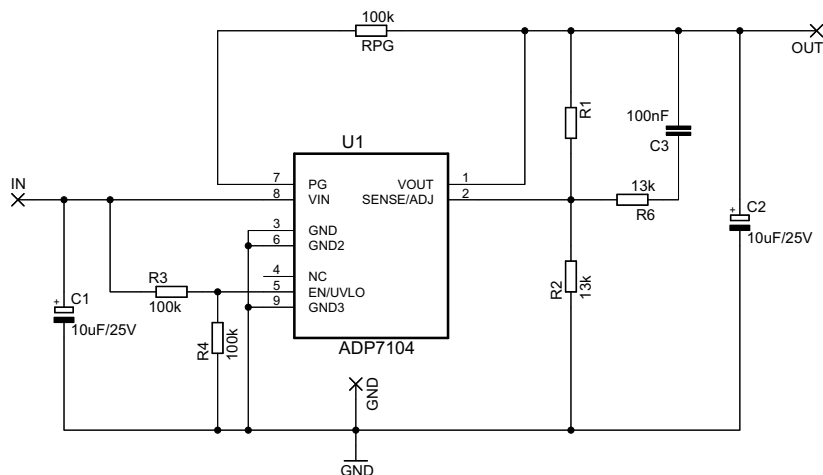
Zapojení desky plošného spoje a osazovací plán je na obrázku B.13. Výstupní napětí tohoto modulu je $-48,24$ V podle rovnice 5.21 maximální proudové zatížení modulu je 100 mA.

5.7 Moduly nízkošumových napěťových stabilizátorů

Tyto moduly jsou konstruovány s ohledem na co nejnižší výstupní šumové napětí. V návrhu desek plošných spojů byla zahrnuta doporučená uspořádání součástek podle výrobce stabilizátoru.

5.7.1 Moduly stabilizátoru ADP7104

Schéma zapojení je na obrázku 5.21, kde poměr velikosti odporů v odporovém děliči složeném z rezistorů R_1 a R_2 udává výstupní napětí celého zapojení podle rovnice 5.22.



Obr. 5.21: Schéma zapojení lineárního nízkošumového stabilizátoru napětí ADP7104

Rezistor R_2 je nastaven na hodnotu 13 k Ω . Rezistor R_1 pro nastavené výstupní napětí 5 V má hodnotu 40,2 k Ω . Pro výstupní napětí 15 V má rezistor R_1 hodnotu 146 k Ω a pro výstupní napětí 18 V je hodnota rezistoru R_1 178 k Ω podle rovnice 5.22.

$$U_{OUT} = 1,22 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (5.22)$$

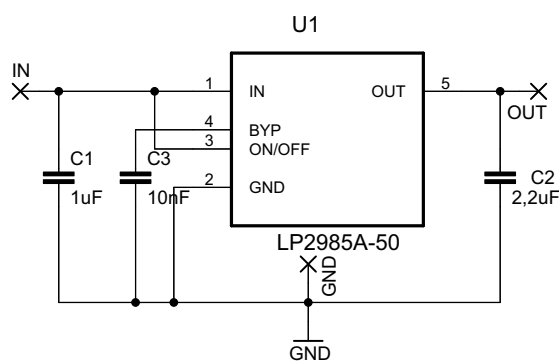
U_{OUT} je výstupní napětí, 1,22 je hodnota referenčního napětí stabilizátoru ADP7104.

Rezistory R_3 a R_4 tvoří dělič pro vstup „ENABLE“, kterým lze odpojit výstup stabilizátoru, v tomto zapojení není tento vstup využit a je připojen na vstupní napětí stabilizátoru. Rezistor R_6 společně s kondenzátorem C_3 zamezují průchodu střídavé složky chybového zesilovače stabilizátoru ADP7104 na výstupní svorky. Kondenzátor C_1 snižuje citlivost celého zapojení na uspořádání desky plošného spoje. Výstupní kondenzátor C_2 zamezuje průchodu střídavé složky na výstupní svorky. Rezistor RPG je externí rezistor, který je připojen na svorku PG (POWER GOOD) pro kontrolu správného výstupního napětí, proudového omezení a teploty stabilizátoru [21].

Rozvržení součástek a propojení na desce plošného spoje (DPS) je na obrázcích B.14 až B.16. Seznam součástek je uveden v tabulce B.7.

5.7.2 Modul stabilizátoru LP2985A-50

Tento nízkošumový stabilizátor má nastavené výstupní napětí 5 V. Schéma zapojení je na obrázku 5.22.



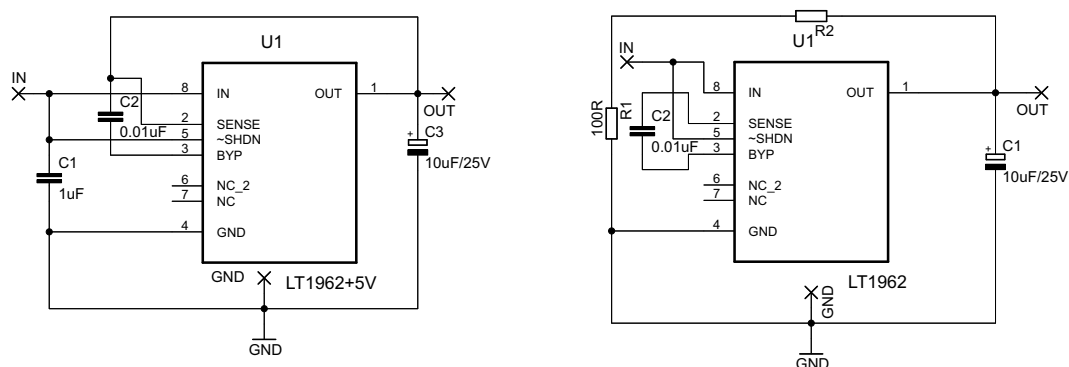
Obr. 5.22: Schéma zapojení stabilizátoru LP2985A-50

Vstupní keramický kondenzátor C_1 má kapacitu $1\ \mu\text{F}$ doporučenou výrobcem. Výstupní kondenzátor má minimální kapacitou $2,2\ \mu\text{F}$, používá se pro zvýšení stability přechodové odezvy stabilizátoru. Kondenzátor C_3 o velikosti $10\ \text{nF}$ snižuje hodnotu výstupního šumového napětí. Tato hodnota je doporučena výrobcem [26].

Rozvržení součástek a propojení na desce plošného spoje (DPS) je na obrázku B.17. Seznam součástek je uveden v tabulce B.8.

5.7.3 Moduly stabilizátoru LT1962

Pro výstupní napětí o velikosti $5\ \text{V}$ lze využít přednastavený výstup stabilizátoru. Výstupní napětí $15\ \text{V}$ a $18\ \text{V}$ lze nastavit pomocí odporového děliče složeného z rezistorů R_1 a R_2 podle rovnice 5.23.



(a) Schéma zapojení stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím $5\ \text{V}$

(b) Schéma zapojení stabilizátoru LT1962 pro výstupní napětí $15\ \text{V}$ a $18\ \text{V}$

Obr. 5.23: Schéma zapojení lineárního nízkošumového stabilizátoru LT1962

Schéma zapojení obrázku 5.23 (a) obsahuje vstupní kondenzátor C_1 , výstupní konden-

zátor C_3 a kondenzátor pro potlačení výstupního šumového napětí C_2 podle doporučení výrobce [22]. Seznam součástek pro výstupní napětí 5 V je uveden v tabulce B.9

$$U_{OUT} = 1,22 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} R_2 \quad (5.23)$$

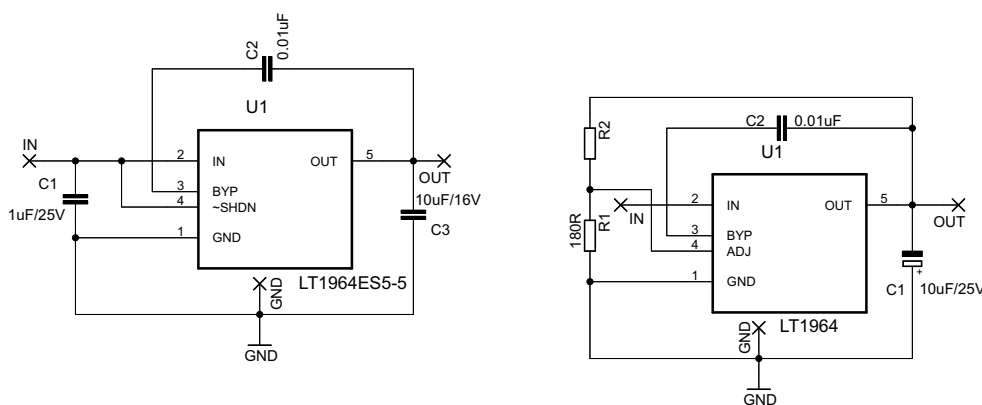
U_{OUT} je nastavené výstupní napětí, 1,22 je referenční napětí stabilizátoru a I_{ADJ} udává velikost vyrovnávacího proudu, který je 30 nA.

Schéma zapojení pro nastavení výstupního napětí 15 V a 18 V je na obrázku 5.23 (b). Výstupní napětí lze nastavit pomocí odporového děliče složeného z rezistorů R_1 a R_2 podle rovnice 5.23. Rezistor R_1 má hodnotu 100 Ω . Rezistor R_2 pro výstupní napětí 15 V má hodnotu 1130 Ω a pro výstupní napětí 18 V má hodnotu 1370 Ω . Výstupní kondenzátor C_1 zamezuje průchodu střídavé složky na výstupní svorky. Kondenzátor pro potlačení výstupního šumového napětí C_2 je připojen mezi svorky BYP a SENSE.

Rozvržení součástek a propojení na desce plošného spoje (DPS) je na obrázcích B.19 a B.20. Seznam součástek je uveden v tabulce B.10.

5.7.4 Moduly stabilizátoru LT1964

Pro výstupní napětí o velikosti -5 V lze využít přednastavený výstup stabilizátoru. Výstupní napětí -15 V a -18 V lze nastavit pomocí odporového děliče složeného z rezistorů R_1 a R_2 podle rovnice 5.24.



(a) Schéma zapojení stabilizátoru LT1964 s výstupním napětím -5 V (b) Schéma zapojení stabilizátoru LT1964 pro výstupní napětí -15 V a -18 V

Obr. 5.24: Schéma zapojení lineárního nízkošumového stabilizátoru záporného napětí LT1964

Schéma zapojení obrázku 5.24 (a) obsahuje vstupní kondenzátor C_1 , výstupní kondenzátor C_3 a kondenzátor pro potlačení výstupního šumového napětí C_2 podle doporučení výrobce [23]. Seznam součástek je uveden v tabulce B.11

$$U_{OUT} = -1,22 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - I_{ADJ} R_2 \quad (5.24)$$

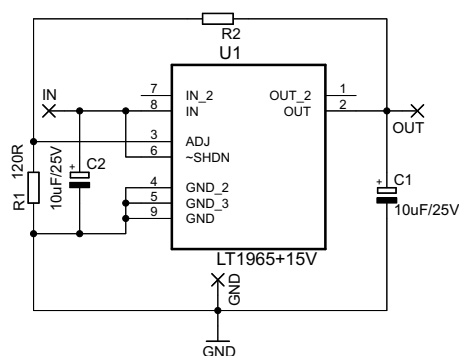
U_{OUT} je nastavené výstupní napětí, 1,22 je referenční napětí stabilizátoru a I_{ADJ} udává velikost vyrovnávacího proudu, který je 30 nA.

Schéma zapojení pro nastavení výstupního napětí -15 V a -18 V je na obrázku 5.24 (b). Výstupní napětí lze nastavit pomocí odporového děliče složeného z rezistorů R_1 a R_2 podle rovnice 5.23. Rezistor R_1 má hodnotu $180\ \Omega$. Rezistor R_2 pro výstupní napětí -15 V má hodnotu $2\text{ k}\Omega$ a pro výstupní napětí -18 V má hodnotu $2470\ \Omega$. Výstupní kondenzátor C_1 zamezuje průchodu střídavé složky na výstupní svorky. Kondenzátor pro potlačení výstupního šumového napětí C_2 je připojen mezi svorky BYP a SENSE.

Rozvržení součástek a propojení na desce plošného spoje (DPS) je na obrázcích B.22 a B.23. Seznam součástek je uveden v tabulce B.12.

5.7.5 Moduly stabilizátoru LT1965

Schéma zapojení je na obrázku 5.25, kde poměr velikosti odporu v odporovém děliči složeném z rezistorů R_1 a R_2 udává výstupní napětí celého zapojení podle rovnice 5.25.



Obr. 5.25: Schéma zapojení lineárního nízkošumového stabilizátoru napětí LT1965

Rezistor R_1 pro výstupní napětí 5 V je nastaven na hodnotu $1\text{ k}\Omega$. Rezistor R_2 pro nastavené výstupní napětí 5 V má hodnotu $3160\ \Omega$.

Rezistor R_1 pro výstupní napětí 15 V a 18 V je nastaven na hodnotu $120\ \Omega$. Pro výstupní napětí 15 V má rezistor R_2 hodnotu $1382\ \Omega$ a pro výstupní napětí 18 V je hodnota rezistoru R_2 $1682\ \Omega$ podle rovnice 5.25.

$$U_{OUT} = 1,22 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} R_2 \quad (5.25)$$

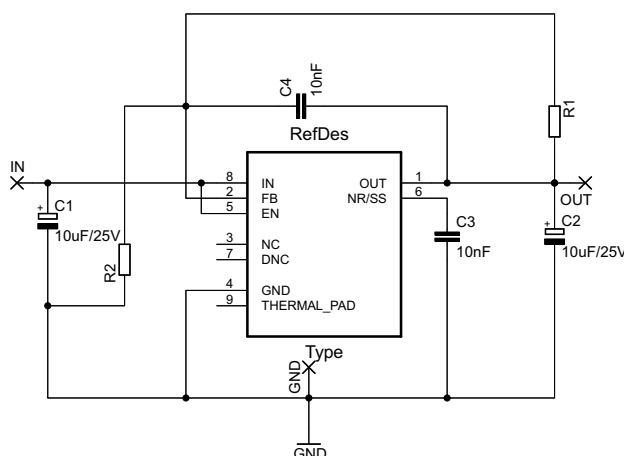
U_{OUT} je nastavené výstupní napětí, 1,22 je referenční napětí stabilizátoru a I_{ADJ} udává velikost vyrovnávacího proudu, který je $1,3\ \mu\text{A}$.

Výstupní kondenzátor C_1 zamezuje průchodu střídavé složky na výstupní svorky stabilizátoru [24]. Vstupní kondenzátor C_2 snižuje citlivost zapojení na uspořádání desky plošného spoje (DPS).

Rozvržení součástek a propojení na desce plošného spoje (DPS) je na obrázcích B.25 až B.26. Seznam součástek je uveden v tabulce B.13.

5.7.6 Moduly stabilizátoru TPS7A3001

Schéma zapojení je na obrázku 5.26, kde poměr velikosti odporu v odporovém děliči složeném z rezistorů R_1 a R_2 udává výstupní napětí celého zapojení podle rovnice 5.26.



Obr. 5.26: Schéma zapojení lineárního nízkošumového stabilizátoru záporného napětí TPS7A3001

Hodnota rezistoru R_2 pro výstupní napětí -5 V a -15 V je $120\ \Omega$. Rezistor R_1 pro výstupní napětí -5 V má velikost $390\ \Omega$ a pro výstupní napětí -15 V je hodnota R_1 $1400\ \Omega$ podle rovnice 5.26.

Pro výstupní napětí -18 V je rezistor R_2 $62\ \Omega$ a rezistor R_1 je $882\ \Omega$ podle rovnice 5.26. Hodnota rezistoru R_2 pro výstupní napětí -24 V je $100\ \Omega$, rezistor R_1 má hodnotu $1930\ \Omega$.

$$R_1 = R_2 \left(\frac{U_{OUT}}{U_{REF}} - 1 \right) \quad (5.26)$$

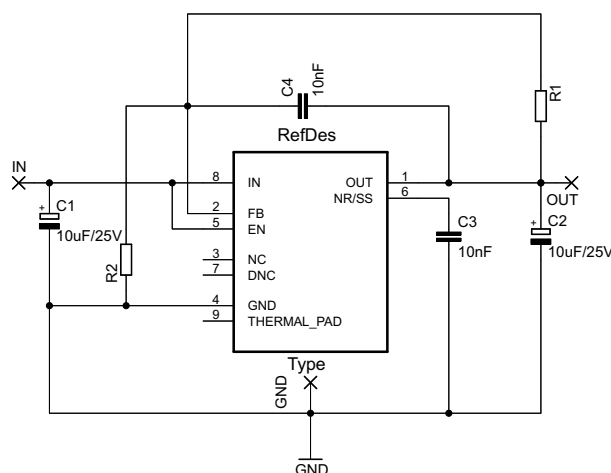
U_{OUT} je výstupní napětí stabilizátoru a U_{REF} je vnitřní reference stabilizátoru o velikosti $-1,184\text{ V}$.

Vstupní kondenzátor C_1 doporučený výrobcem [28] zamezuje průchodu střídavé složky na vstupní svorky stabilizátoru. Výstupní kondenzátor C_2 snižuje citlivost zapojení na uspořádání desky plošného spoje (DPS). Kondenzátory C_3 a C_4 snižují hodnotu výstupního šumového napětí stabilizátoru.

Rozvržení součástek a propojení na desce plošného spoje (DPS) je na obrázcích B.27 až B.30. Seznam součástek je uveden v tabulce B.14.

5.7.7 Moduly stabilizátoru TPS7A4901

Schéma zapojení je na obrázku 5.27, kde poměr velikosti odporu v odporovém děliči složeném z rezistorů R_1 a R_2 udává výstupní napětí celého zapojení podle rovnice 5.27.



Obr. 5.27: Schéma zapojení lineárního nízkošumového stabilizátoru kladného napětí TPS7A4901

Hodnota rezistoru R_2 pro výstupní napětí 5 V je 470 Ω , rezistor R_1 má velikost 1,5 k Ω . Pro výstupní napětí 15 V je hodnota rezistoru R_2 100 Ω a R_1 má podle rovnice 5.27 velikost 1156 Ω .

Pro výstupní napětí 18 V je rezistor R_2 68 Ω a rezistor R_1 je 1 k Ω podle rovnice 5.27. Hodnota rezistoru R_2 pro výstupní napětí 24 V je 100 Ω , rezistor R_1 má hodnotu 1910 Ω .

$$R_1 = R_2 \left(\frac{U_{OUT}}{U_{REF}} - 1 \right) \quad (5.27)$$

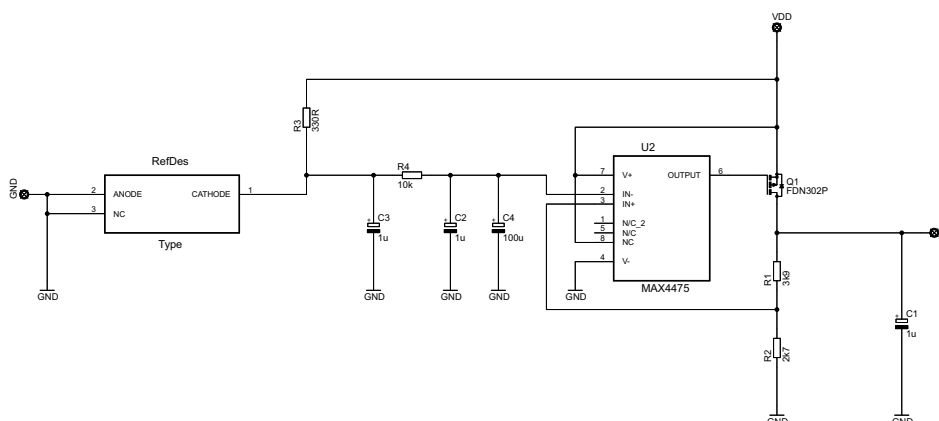
U_{OUT} je výstupní napětí stabilizátoru a U_{REF} je vnitřní reference stabilizátoru o velikosti 1,194 V.

Vstupní kondenzátor C_1 doporučený výrobcem [27] zamezuje průchodu střídavé složky na vstupní svorky stabilizátoru. Výstupní kondenzátor C_2 snižuje citlivost zapojení na uspořádání desky plošného spoje (DPS). Kondenzátory C_3 a C_4 snižují hodnotu výstupního šumového napětí stabilizátoru.

Rozvržení součástek a propojení na desce plošného spoje (DPS) je na obrázcích B.31 až B.34. Seznam součástek je uveden v tabulce B.15.

5.7.8 Lineární nízkošumový stabilizátor složený z diskretních součástek s výstupním napětím +5 V

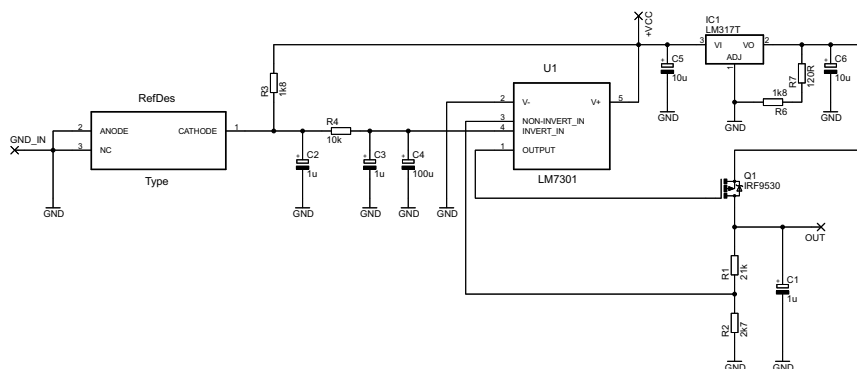
Tento stabilizátor je navržen podle kapitoly 4. Schéma zapojení je na obrázku 5.28. Návrh desky plošného spoje a osazovací plán je na obrázku B.35. Použité součástky jsou v tabulce B.16.



Obr. 5.28: Schéma zapojení stabilizátoru z diskretních součástek s výstupním napětím 5 V

5.7.9 Lineární nízkošumový stabilizátor složený z diskretních součástek s výstupním napětím +18 V

Stabilizátor je navržen podle kapitoly 4. Schéma zapojení je na obrázku 5.29. Návrh desky plošného spoje a osazovací plán je na obrázku B.36. Použité součástky jsou v tabulce B.17.



Obr. 5.29: Schéma zapojení stabilizátoru z diskretních součástek s výstupním napětím 18 V

6

Automatizované měření šumových parametrů lineárních stabilizátorů

Automatizované měření šumových parametrů lineárních stabilizátorů provádí kód v Matlabu. Celý kód je rozdělen na hlavní část MAIN, ve které jsou předávány konstanty jednotlivým funkcím a dále jsou prováděny veškeré výpočty přes vložené funkce. Jednotlivé funkce jsou popsány dále v textu.

Kód měří ze zadaného WAV měřeného souboru efektivní hodnotu šumového napětí na zvolené šířce frekvenčního pásma a dále měří činitel zvlnění měřeného průběhu. Na obrázku 6.1 je uveden zjednodušený blokový diagram kódu pro výpočet efektivní hodnoty šumového napětí a činitele zvlnění.

6.1 Testovací signál

Kód byl testován pomocí signálů ze souborů 1.wav a 2.wav. Soubor 1.wav je reálně naměřený signál o kmitočtu 1 kHz pomocí analyzátoru Audio Precision a soubor 2.wav je šumový signál naměřený po odpojení zdroje signálu 1 kHz.

Programem MAIN byla naměřena efektivní hodnota šumového napětí na frekvenčním rozsahu 20 Hz až 22 kHz 889 nV, analyzátor AP SYS2722 změřil tuto hodnotu jako 830 nV.

6.2 Funkce pro výpočet FFT transformace

Přepis kódu pro funkci `fft_transform.m` je uveden v příloze E.3, vývojový diagram této funkce je uveden na obrázku D.2. Funkce načte soubor `Soub` zadaný uživatelem v hlavním programu MAIN, dále zadaný frekvenční krok `frekv_krok` a zadané procentní překrytí Hannových oken `Prekryti`.

V další části funkce `fft_transform.m` je provedeno čtení souboru pomocí funkce `wavread`, dále je proveden výpočet počtu vzorků FFT transformace ze zadaného frekvenčního kroku pro funkci `f_krok.m`.

6.2.1 Funkce pro výpočet frekvenčního kroku

Funkce `f_krok.m` porovnává zadaný frekvenční krok a s ním spojený počet vzorků FFT podle rovnice 6.1.

$$f_krok = \frac{F_S}{N_FFT} \quad (6.1)$$

kde F_S je vzorkovací frekvence měřeného souboru a N_FFT je počet vzorků FFT transformace.

Pomocí `for` cyklu je načítán postupně vektor mocniny 2, který je porovnáván se zadaným počtem vzorků FFT. Pokud je zadaný počet vzorků FFT nižší než aktuální index `for` cyklu, zaokrouhlí se nahoru, jinak vypíše počet vzorků aktuálního indexu. Pokud je vypočtený počet vzorků FFT jiný než zadaný, vytiskne se nový frekvenční krok, v opačném případě se vytiskne zadaný frekvenční krok. Přepis kódu je uveden v příloze E.1, vývojový diagram kódu je uveden na obrázku D.1 (a).

6.2.2 Překryv Hannových oken, FFT, průměrování

V další části funkce `fft_transform.m` se provádí výpočet FFT transformace a její průměrování s použitím Hannových oken a zvoleného procentního překryvu těchto oken. Podle zadaného překryvu `Prekryti` je výpočet rozdělen do tří sekcí, a to pro překryv 0 %, 100 % a překryv mezi 0 % a 100 %.

Pokud je překryv Hannových oken 0 %, dojde k rozdělení vzorků časového signálu souboru `Soub` na úseky o velikosti počtu vzorků FFT transformace `N_FFT` a oříznutí posledních vzorků, pokud není počet časových vzorků celočíselným násobkem počtu vzorků FFT. Dále se rozdělené skupiny vzorků přenásobí Hannovým oknem a provede se FFT. Po FFT transformaci se provede korekce energie, která byla změněna aplikací Hannova okna. Korekční konstanta pro Hannovo okno je 0,8165. Po FFT transformaci se provede zkrácení vektoru na polovinu z důvodu snazší manipulace s daty, funkce `fft()` generuje vektor, který je symetrický přes polovinu vzorkovacího kmitočtu. Složky zkráceného vektoru jsou vynásobeny dvěma pro zamezení redukce energie ve spektru. Unikátní (Nyquistovy) složky spektra jako je stejnosměrný signál nebo poslední vzorek vektoru, pokud je zadaný počet vzorků lichý, jsou děleny dvěma pro zachování energie signálu ve spektru. V tomto případě je stejnosměrná složka spektra filtrována vazebním členem, tudíž se zde neuplatňuje.

Dále je provedeno průměrování vektorů FFT transformace aritmetickým průměrem s předchozím vektorem (kromě prvního vektoru).

Pokud uživatel zadá překryv oken 100 %, provede se výpočet FFT pouze pro prvních `N_FFT` vzorků časového signálu jako v předchozím případě. V tomto případě není prováděno průměrování vzorků.

Když je uživatelem zadaný procentní překryv mezi 0 % a 100 %, je přepočten překryv (`prekryv2`) na počet vzorků `N_FFT`. Krok překryvu `krok` společně s offsetem `offset` určí

míru překrytí Hannových oken vektorů časového signálu. Dále je provedena prealokace pro zrychlení následujícího `for` cyklu, který čítá do velikosti `offset`. Je vytvořena matice o velikosti `N_FFT` x `délka offset`, do které jsou ve `for` cyklu vkládány vektory se zadaným překryvem a násobeny Hannovým oknem. Poté je provedena FFT transformace a průměrování jak bylo popsáno výše.

6.3 Funkce pro výpočet činitele zvlnění

Funkce `cin_zvl.m` provede výpočet činitele zvlnění z časového signálu `wav` souboru. Dále je provedeno normování koeficientů `wav` souboru podle kalibračního souboru `KalibSoubor`. Je nalezena efektivní hodnota časového průběhu kalibračního souboru `Xmean` podle rovnice 6.2.

$$Xmean = \sqrt{\frac{\sum X^2}{length(X)}} \quad (6.2)$$

kde X je časový vektor kalibračního souboru `KalibSoubor` a $length(X)$ udává počet vzorků v kalibračním `wav` souboru.

Dále je proveden výpočet kalibrační konstanty k , která se vypočítá podle rovnice 6.3

$$k = \frac{Uinef}{kv.Xmean} \quad (6.3)$$

kde $Uinef$ je efektivní hodnota kalibračního napětí a kv je napěťová citlivost vstupu analyzátoru při měření kalibračního souboru `KalibSoubor`.

Na časový průběh měřícího souboru `MerSoubor` je aplikován mediánový filtr, který zprůměruje možné zákmity v časovém signálu. Takto upravené časové vzorky jsou násobeny napěťovou citlivostí vstupu $kvmer$ analyzátoru při měření měřeného souboru `MerSoubor` a kalibrační konstantou k získanou z kalibračního souboru `KalibSoubor`.

Dále je provedeno nalezení maximální a minimální výchylky časového průběhu a výpočet napětí špička-špička (U_{P-P}). Činitel zvlnění je určen pomocí rovnice 6.4.

$$cinitel_zvl = \frac{U_{P-P}}{U} 100 [\%] \quad (6.4)$$

kde U je efektivní hodnota stabilizovaného napětí.

Přepis kódu je uveden v příloze E.2, vývojový diagram kódu pro výpočet činitele zvlnění je uveden na obrázku D.1 (c).

6.4 Funkce pro výpočet potlačení harmonických násobků kmitočtu 50 Hz

Funkce `potlac_50.m` potlačí podle zadání uživatele 0 až 20 harmonických násobků síťového kmitočtu 50 Hz pomocí funkce `findpeaks()` a nahradí tento signál průměrnou

hodnotou signálu ve vzdálenosti ± 2 koeficientů kolem frekvence (binu) pro 50 Hz a jejích násobků.

Funkce `findpeaks()` vyhledává lokální maximum (odstranění „Leakage efektu“) na určitém intervalu daném součtem frekvenčního kroku a poloviny měřeného binu (`PocBin`). Setřídí vektor lokálních maxim signálu (`SORTSTR`) od nejvyššího po nejnižší pomocí příkazu `descent`. Tato funkce vrací pouze polohu lokálního maxima, velikosti maxim nejsou potřeba, proto je tato hodnota přiřazena do prázdného vektoru označeného symbolem `[~]`.

Spektrum signálu s odstraněnými násobky frekvence 50 Hz je vykresleno do grafu společně se spektrem původního signálu s brumovými složkami (násobky kmitočtu 50 Hz).

Ve funkci `potlac_50.m` je vypočítávána energie spektra signálu bez brumových složek (až osmi násobků frekvence 50 Hz) jako odmocnina ze součtu kvadrátu frekvenčních složek spektra.

Přepis kódu je uveden v příloze E.4, vývojový diagram této funkce je uveden na obrázku D.1 (b).

6.5 Hlavní soubor kódu automatizovaného měření šumových parametrů

`MAIN` je hlavní soubor, ve kterém uživatel zadá kalibrační soubor `KalibSoubor`, měřící soubor `MerSoubor`, požadovanou počáteční a koncovou frekvenci a frekvenci pro výpočty. U koncové frekvence musí uživatel tuto frekvenci zadat o maximální velikosti $F_S/2$ než je vzorkovací frekvence `wav` souboru s měřeným signálem. Dále uživatel zadá z obrazovky požadovaný frekvenční krok. Velikost frekvenčního kroku je omezena počáteční frekvencí. Uživatel zadává také procentní překrytí Hannových oken, efektivní velikost výstupního napětí stabilizátoru pro výpočet zvlnění. Velikost kalibračního napětí a napěťovou citlivost pro zadaný soubor, rozsah energie každého binu `Span` a počet až osmi harmonických násobků síťového kmitočtu, které chce uživatel odfiltrovat z výsledného spektra. V tomto souboru jsou volány všechny pomocné funkce.

6.5.1 Koeficienty

V této části jsou vytvořeny koeficienty pro počáteční a koncovou frekvenci, dále pro zadanou frekvenci pro měření parametrů na jedné frekvenci, dále výpočet binu frekvence sítě a nastavení frekvenční osy pro zobrazení výsledných průběhů.

6.5.2 Kalibrace měřeného souboru

Nejdříve se provede FFT transformace časového vektoru kalibračního souboru `KalibSoubor` pomocí funkce `fft_transform.m`. Výstupem této funkce je vektor frekvenčních složek `Y_kalib`. Z tohoto vektoru se vypočítá efektivní hodnota podle rovnice 6.5.

$$Y_{effkalib} = \sqrt{\frac{\sum Y_{kalib}(StartBin : EndBin)^2}{N}} \quad (6.5)$$

kde N je počet vzorků vektoru Y_{kalib} v rozmezí $StartBin$ až $EndBin$.

Efektivní hodnota se následně použije pro výpočet kalibrační konstanty podle rovnice 6.6.

$$k = \frac{U_{inef}}{kv \cdot Y_{effkalib}} \quad (6.6)$$

kde, U_{inef} je vstupní efektivní hodnota napětí kalibračního souboru.

V další části kódu se provede výpočet efektivní hodnoty měřeného souboru **MerEf** podle rovnice 6.5 a vypočítá se efektivní hodnota vstupního napětí měřeného souboru podle rovnice 6.7.

$$U_{inmer} = k \cdot kvmer \cdot MerEf \quad (6.7)$$

kde k je kalibrační konstanta vypočtená v rovnici 6.6, $kvmer$ je napěťová citlivost vstupu přístroje při měření měřeného souboru a $MerEf$ je efektivní hodnota spektra měřeného souboru **MerSoubor**.

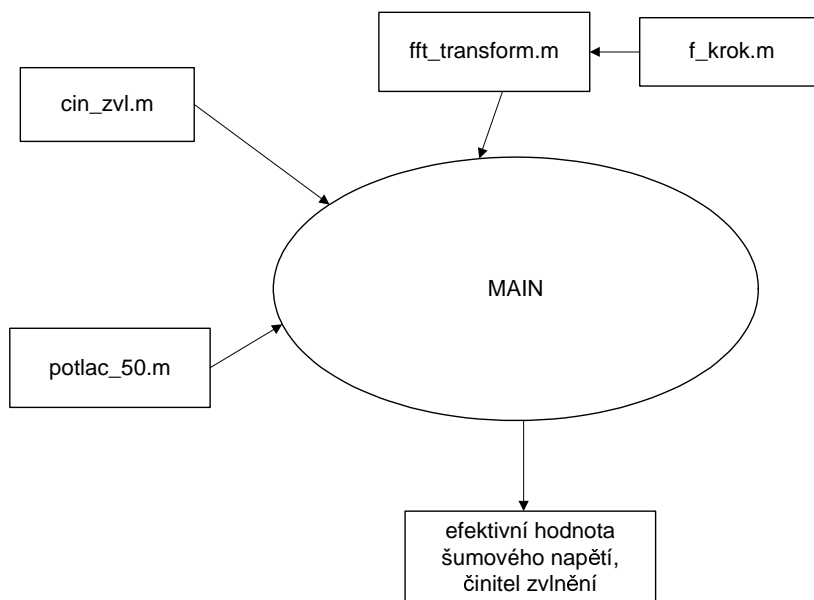
6.5.3 Vyhledání maxima pro zvolený kmitočet

Funkce `findpeaks()` vyhledává lokální maximum (odstranění „Leakage efektu“) na určitém intervalu, setřídí vektor lokálních maxim signálu (*SORTSTR*) od nejvyššího po nejnižší pomocí příkazu *descent*. Tato funkce vrací pouze polohu lokálního maxima, velikosti maxim nejsou potřeba, proto je tato hodnota přiřazena do prázdného vektoru `[~]`.

Do proměnné **MerBinVektor** je uložen vektor, ve kterém je maximum umístěno uprostřed. Délka vektoru je ovlivněna proměnnou **Span**, kterou zadává uživatel na začátku skriptu. Proměnná **Span** zajišťuje, že bude použita energie, která odpovídá energii měřeného signálu pro využití v dalších výpočtech.

V této části přebírá hlavní soubor **MAIN** funkci pro potlačení až osmi násobků harmonických složek frekvence 50 Hz.

Přepis kódu hlavního souboru **MAIN** je uveden v příloze E.5, vývojový diagram je na obrázku D.3.



Obr. 6.1: Blokový diagram měřícího algoritmu

7

Výsledky měření šumových parametrů lineárních stabilizátorů napětí

Dostupné lineární stabilizátory napětí byly měřeny měřícím řetězcem podle obrázku 5.1. Lineární stabilizátory byly zatěžovány proudem 0 mA až 700 mA podle nominálních hodnot jednotlivých stabilizátorů. Jednotlivé zatěžovací odpory byly vybírány pomocí bloku automatického přepínání zátěže viz obr. 5.1. Naměřené průběhy z audio analyzátoru ve formátu WAV byly zpracovány pomocí kódu MAIN, ve kterém byly určeny parametry: efektivní hodnota výstupního šumového napětí ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz a činitel zvlnění výstupního napětí.

Kód MAIN byl nastaven následovně:

- Počáteční frekvence: 10 Hz,
- koncová frekvence: 100 kHz,
- frekvenční krok: 0,5 Hz,
- překryv Hannových oken: 0%,
- rozsah energie každého binu (Span): 10,
- počet potlačených násobků síťového kmitočtu: 20,
- kalibrační soubor: sinusový průběh o frekvenci 1 kHz a efektivní hodnotě 1 V ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz

Z audio analyzátoru byly pro kontrolu odečítány efektivní hodnoty šumového napětí na dvou kmitočtových rozsazích, na rozsahu 80 kHz a 500 kHz. V grafických znázornění spektra šumu jsou průběhy měřené na jednotlivých stabilizátorech bez zátěže a se zátěží 100 mA, která je použitelná pro zatížení všech typů testovaných stabilizátorů. Průběhy

byly měřeny ve frekvenčním pásmu do 100 kHz a ve frekvenčním pásmu 10 kHz. V pásmu 10 kHz je FFT počítáno s vyšším rozlišením, při kterém jsou názornější brumové složky spektra signálu. Efektivní hodnoty šumových napětí vypočtených pomocí kódu v Matlabu byly počítány pro signál s brumovými složkami a pro signál, ve kterém bylo vyklíčováno dvacet harmonických násobků kmitočtu sítě 50 Hz. Efektivní šumové napětí počítané pomocí kódu je počítáno pro frekvenční rozsah 10 Hz až 100 kHz.

Nízkošumové stabilizátory byly měřeny pouze v šesti exemplářích z důvodu vysoké ceny nízkošumových stabilizátorů.

7.1 Lineární stabilizátory kladného napětí

7.1.1 Stabilizátor 7805

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA, 100 mA, 200 mA, 500 A a 700 mA. Velikost efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu tohoto stabilizátoru ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz vypočtená kódem v programu Matlab pro zatěžovací proud 0 mA je $26,56 \mu\text{V}$, činitel zvlnění tohoto stabilizátoru je 0,0031 %. Pro zatěžovací proud 100 mA je efektivní hodnota napětí $155,73 \mu\text{V}$, činitel zvlnění je 0,0169 %. Pokud je v kódu aktivováno potlačení dvaceti harmonických násobků síťového kmitočtu, klesne efektivní hodnota šumového napětí pro zatěžovací proud 0 mA na $9,68 \mu\text{V}$ a pro zatěžovací proud 100 mA na $37,37 \mu\text{V}$ viz obrázek C.2. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.1. Proudová zátěž 700 mA nebyla u tohoto stabilizátoru změřena z důvodu velkého zahřívání stabilizátoru a sepnutí tepelné pojistky. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru 7805 je na obrázku C.1 (a).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	$23,32 \mu\text{V}$	$27,1 \mu\text{V}$
100 mA	$152,6 \mu\text{V}$	$153,1 \mu\text{V}$
200 mA	$252,8 \mu\text{V}$	$252,8 \mu\text{V}$
500 mA	$637 \mu\text{V}$	$637 \mu\text{V}$

Tab. 7.1: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7805 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.1.2 Stabilizátor 7815

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA, 100 mA, 200 mA, 500 mA a 700 mA. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.2. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru 7815 je na obrázku ?? (b).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	82,76 μV	86,2 μV
100 mA	197,7 μV	197,7 μV
200 mA	353,6 μV	353,6 μV
500 mA	720 μV	727,3 μV
700 mA	1100 μV	1100 μV

Tab. 7.2: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7815 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.1.3 Stabilizátor 7818

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA, 100 mA, 200 mA a 500 mA. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.3. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru 7818 je na obrázku C.3 (a).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	23,6 μV	26,2 μV
100 mA	104,6 μV	105,8 μV
200 mA	149,6 μV	149,6 μV
500 mA	235,1 μV	235,1 μV

Tab. 7.3: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7818 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.1.4 Stabilizátor 7824

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA, 100 mA, 200 mA, 500 mA a 700 mA. Velikost efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu tohoto stabilizátoru ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz vypočtená kódem v programu Matlab pro zatěžovací proud 0 mA je 50,16 μV , činitel zvlnění tohoto stabilizátoru je 0,0017 %. Pro zatěžovací proud 100 mA je efektivní hodnota napětí 119,75 μV , činitel zvlnění je 0,0041 %. Pokud je v kódu aktivováno klíčování dvaceti harmonických násobků síťového kmitočtu, klesne efektivní hodnota šumového napětí pro zatěžovací proud 0 mA na 33,62 μV a pro zatěžovací proud 100 mA na 87,52 μV viz obrázek C.4. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio

analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.4. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru 7824 je na obrázku C.3(b).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	45,38 μV	49,51 μV
100 mA	110,7 μV	112 μV
200 mA	152,9 μV	152,9 μV
500 mA	241,6 μV	241,6 μV
700 mA	271,7 μV	271,7 μV

Tab. 7.4: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7824 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.1.5 Stabilizátor LM317 s výstupním napětím +5 V

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA, 100 mA, 200 mA, 500 A a 700 mA. Velikost efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu tohoto stabilizátoru ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz vypočtená kódem v programu Matlab pro zatěžovací proud 0 mA je 49,79 μV , činitel zvlnění tohoto stabilizátoru je 0,007 %. Pro zatěžovací proud 100 mA je efektivní hodnota napětí 123,54 μV , činitel zvlnění je 0,0146 %. Pokud je v kódu aktivováno potlačení dvaceti harmonických násobků síťového kmitočtu, klesne efektivní hodnota šumového napětí pro zatěžovací proud 0 mA na 26,76 μV a pro zatěžovací proud 100 mA na 41,68 μV viz obrázek C.6. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.5. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +5 V je na obrázku C.5 (a).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	45,52 μV	47,14 μV
100 mA	113,6 μV	115,3 μV
200 mA	176,5 μV	178,7 μV
500 mA	297,1 μV	297,1 μV
700 mA	346,1 μV	346,1 μV

Tab. 7.5: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +5 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.1.6 Stabilizátor LM317 s výstupním napětím +15 V

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA, 100 mA, 200 mA, 500 mA a 700 mA. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.6. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +15 V je na obrázku C.5 (b).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	47,94 μV	49,72 μV
100 mA	105,4 μV	106,2 μV
200 mA	153,2 μV	153,2 μV
500 mA	208,7 μV	208,7 μV
700 mA	209,1 μV	209,1 μV

Tab. 7.6: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +15 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.1.7 Stabilizátor LM317 s výstupním napětím +18 V

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA, 100 mA, 200 mA a 500 mA. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.7. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +18 V je na obrázku C.7 (a).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	54,44 μV	56,04 μV
100 mA	103,3 μV	105,1 μV
200 mA	140,5 μV	140,5 μV
500 mA	185,6 μV	185,6 μV

Tab. 7.7: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +18 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.1.8 Stabilizátor LM317 s výstupním napětím +24 V

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA, 100 mA, 200 mA, 500 mA a 700 mA. Velikost efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu tohoto stabilizátoru ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz vypočtená kódem v programu Matlab pro zatěžovací proud 0 mA je 62,57 μV , činitel zvlnění tohoto stabilizátoru je 0,0021 %. Pro zatěžovací proud 100 mA je efektivní hodnota napětí 101,88 μV , činitel zvlnění je 0,0033 %. Při aktivaci potlačení dvaceti harmonických násobků síťového kmitočtu, klesne efektivní hodnota šumového

napětí pro zatěžovací proud 0 mA na $41,58 \mu\text{V}$ a pro zatěžovací proud 100 mA na $52 \mu\text{V}$ viz obrázek C.8. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.8. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +18 V je na obrázku C.7 (b).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	$45,52 \mu\text{V}$	$47,14 \mu\text{V}$
100 mA	$113,6 \mu\text{V}$	$115,3 \mu\text{V}$
200 mA	$176,5 \mu\text{V}$	$178,7 \mu\text{V}$
500 mA	$297,1 \mu\text{V}$	$297,1 \mu\text{V}$
700 mA	$346,1 \mu\text{V}$	$346,1 \mu\text{V}$

Tab. 7.8: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +24 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.1.9 Stabilizátor LT1962 s výstupním napětím +5 V

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA a 100 mA. Velikost efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu tohoto stabilizátoru ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz vypočtená kódem v programu Matlab pro zatěžovací proud 0 mA je $109,78 \mu\text{V}$, činitel zvlnění tohoto stabilizátoru je 0,0158 %. Pro zatěžovací proud 100 mA je efektivní hodnota napětí $109,03 \mu\text{V}$, činitel zvlnění je 0,0164 %. Pokud je v kódu aktivováno potlačení dvaceti harmonických násobků síťového kmitočtu, klesne efektivní hodnota šumového napětí pro zatěžovací proud 0 mA na $55,43 \mu\text{V}$ a pro zatěžovací proud 100 mA na $58,34 \mu\text{V}$ viz obrázek C.10. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.9. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím +5 V je na obrázku C.9 (a).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	$99,64 \mu\text{V}$	$99,64 \mu\text{V}$
100 mA	$104,9 \mu\text{V}$	$104,9 \mu\text{V}$

Tab. 7.9: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím +5 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.1.10 Stabilizátor LT1965 s výstupním napětím +15 V

Tento stabilizátor byl měřen jako nezatížený. Při zatížení neuměrně vzrostla efektivní hodnota šumového napětí, proto nebyl tento stabilizátor zatěžován. Velikost efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu tohoto stabilizátoru ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz vypočtená kódem v programu Matlab pro zatěžovací proud 0 mA je $135,95 \mu\text{V}$,

činitel zvlnění tohoto stabilizátoru je 0,089%. Pokud je v kódu aktivováno potlačení dvaceti harmonických násobků síťového kmitočtu, je efektivní hodnota šumového napětí pro zatěžovací proud 0 mA na 135,65 μV viz obrázek C.11. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce ???. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru LT1965 s výstupním napětím +15 V je na obrázku C.9 (b).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	120,6 μV	130,4 μV

Tab. 7.10: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím +15 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.1.11 Stabilizátor TPS7A4901 s výstupním napětím +24 V

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA a 100 mA. Velikost efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu tohoto stabilizátoru ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz vypočtená kódem v programu Matlab pro zatěžovací proud 0 mA je 145,17 μV , činitel zvlnění tohoto stabilizátoru je 0,0044%. Pro zatěžovací proud 100 mA je efektivní hodnota napětí 144,82 μV , činitel zvlnění je 0,0041%. Pokud je v kódu aktivováno potlačení dvaceti harmonických násobků síťového kmitočtu, je efektivní hodnota šumového napětí pro zatěžovací proud 0 mA 80,53 μV a pro zatěžovací proud 100 mA je tato hodnota 77,84 μV viz obrázek C.12. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.11. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru TPS7A4901 s výstupním napětím +24 V je na obrázku C.9 (c).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	139,5 μV	147,5 μV
100 mA	124,8 μV	124,8 μV

Tab. 7.11: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru TPS7A4901 s výstupním napětím +24 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.2 Lineární stabilizátory záporného napětí

7.2.1 Stabilizátor 7905

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA, 100 mA, 200 mA, 500 A a 700 mA. Velikost efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu tohoto stabilizátoru ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz vypočtená kódem v programu Matlab pro zatěžovací proud 0 mA je 27,41 μV , činitel zvlnění tohoto stabilizátoru je 0,0054%. Pro zatěžovací proud 100 mA

je efektivní hodnota napětí $53,91 \mu\text{V}$, činitel zvlnění je $0,0090\%$. Pokud je v kódu aktivováno potlačení dvaceti harmonických násobků síťového kmitočtu, je efektivní hodnota šumového napětí pro zatěžovací proud 0 mA $27,05 \mu\text{V}$ a pro zatěžovací proud 100 mA je $53,64 \mu\text{V}$ viz obrázek C.14. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.12. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru 7905 je na obrázku C.13 (a).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	$23,88 \mu\text{V}$	$25,71 \mu\text{V}$
100 mA	$40,47 \mu\text{V}$	$84,33 \mu\text{V}$
200 mA	$41,56 \mu\text{V}$	$92,29 \mu\text{V}$
500 mA	$42,8 \mu\text{V}$	$102 \mu\text{V}$
700 mA	$54,49 \mu\text{V}$	$104,9 \mu\text{V}$

Tab. 7.12: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7905 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.2.2 Stabilizátor 7915

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA , 100 mA , 200 mA , 500 A a 700 mA . Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.13. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru 7915 je na obrázku C.13 (b).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	$31,26 \mu\text{V}$	$33,75 \mu\text{V}$
100 mA	$157 \mu\text{V}$	$157,4 \mu\text{V}$
200 mA	$221,4 \mu\text{V}$	$233 \mu\text{V}$
500 mA	$421 \mu\text{V}$	$421 \mu\text{V}$
700 mA	$435 \mu\text{V}$	$435 \mu\text{V}$

Tab. 7.13: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7915 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.2.3 Stabilizátor 7918

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA , 100 mA , 200 mA a 500 A . Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.14. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru 7918 je na obrázku C.15 (a).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	53,07 μV	70 μV
100 mA	195,1 μV	195,1 μV
200 mA	293,1 μV	293,1 μV
500 mA	528,3 μV	528,3 μV

Tab. 7.14: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7918 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.2.4 Stabilizátor 7924

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA, 100 mA, 200 mA, 500 A a 700 mA. Velikost efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu tohoto stabilizátoru ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz vypočtená kódem v programu Matlab pro zatěžovací proud 0 mA je 137,3 μV , činitel zvlnění tohoto stabilizátoru je 0,0053 %. Pro zatěžovací proud 100 mA je efektivní hodnota napětí 287,25 μV , činitel zvlnění je 0,0112 %. Při aktivovaném potlačení dvaceti harmonických násobků síťového kmitočtu, je efektivní hodnota šumového napětí pro zatěžovací proud 0 mA 130 μV a pro zatěžovací proud 100 mA je 283,85 μV viz obrázek C.16. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.15. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru 7924 je na obrázku C.15 (b).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	116,1 μV	121,9 μV
100 mA	262,9 μV	274,1 μV
200 mA	296,3 μV	301,9 μV
500 mA	442,8 μV	461,3 μV
700 mA	694,8 μV	694,8 μV

Tab. 7.15: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru 7924 měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.2.5 Stabilizátor LM337 s výstupním napětím -5 V

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA, 100 mA, 200 mA a 500 mA. Pro proudové zatížení 700 mA se nepodařilo změřit efektivní hodnotu šumového napětí z důvodu nárůstu teploty stabilizátoru a snížení výstupního napětí pomocí teplotní ochrany integrovaného obvodu. Velikost efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu tohoto stabilizátoru ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz vypočtená kódem v programu Matlab pro zatěžovací proud 0 mA je 94,73 μV , činitel zvlnění tohoto stabilizátoru je 0,0186 %. Pro zatěžovací proud 100 mA je efektivní hodnota napětí 112 μV , činitel zvlnění je 0,0201 %. Při aktivaci

potlačení dvaceti harmonických násobků síťového kmitočtu, je efektivní hodnota šumového napětí pro zatěžovací proud 0 mA $90 \mu\text{V}$ a pro zatěžovací proud 100 mA je $104 \mu\text{V}$ viz obrázek C.18. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.16. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -5 V je na obrázku C.17 (a).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	$86,93 \mu\text{V}$	$92,33 \mu\text{V}$
100 mA	$102 \mu\text{V}$	$105,6 \mu\text{V}$
200 mA	$114,9 \mu\text{V}$	$120,8 \mu\text{V}$
500 mA	$177,2 \mu\text{V}$	$177,2 \mu\text{V}$

Tab. 7.16: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -5 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.2.6 Stabilizátor LM337 s výstupním napětím -15 V

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA, 100 mA, 200 mA, 500 A a 700 mA. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.17. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -15 V je na obrázku C.17 (b).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	$61,72 \mu\text{V}$	$66,49 \mu\text{V}$
100 mA	$74,33 \mu\text{V}$	$85,45 \mu\text{V}$
200 mA	$94,4 \mu\text{V}$	$105,3 \mu\text{V}$
500 mA	$177,6 \mu\text{V}$	$177,6 \mu\text{V}$
700 mA	$242,7 \mu\text{V}$	$242,7 \mu\text{V}$

Tab. 7.17: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -15 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.2.7 Stabilizátor LM337 s výstupním napětím -18 V

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA, 100 mA, 200 mA a 500 A. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.18. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -18 V je na obrázku C.19 (a).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	78,05 μV	78,21 μV
100 mA	101,6 μV	108,7 μV
200 mA	148,8 μV	154,3 μV
500 mA	321,5 μV	321,5 μV

Tab. 7.18: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -18 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.2.8 Stabilizátor LM337 s výstupním napětím -24 V

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA, 100 mA, 200 mA, 500 A a 700 mA. Velikost efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu tohoto stabilizátoru ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz vypočtená kódem v programu Matlab pro zatěžovací proud 0 mA je 92,53 μV , činitel zvlnění tohoto stabilizátoru je 0,0035 %. Pro zatěžovací proud 100 mA je efektivní hodnota napětí 138,45 μV , činitel zvlnění je 0,0045 %. Pro vyklíčování dvaceti harmonických násobků síťového kmitočtu, je efektivní hodnota šumového napětí pro zatěžovací proud 0 mA 79,12 μV a pro zatěžovací proud 100 mA je efektivní hodnota šumového napětí 85 μV viz obrázek C.20. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.19. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -24 V je na obrázku C.19 (b).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	90,3 μV	91,09 μV
100 mA	124,6 μV	124,6 μV
200 mA	199,7 μV	199,7 μV
500 mA	457,6 μV	457,6 μV
700 mA	649,8 μV	649,8 μV

Tab. 7.19: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -24 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.2.9 Stabilizátor LT1964 s výstupním napětím $-8,6\text{ V}$

Výstupní napětí stabilizátoru LT1964 bylo změřeno 8,6 V. Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA a 100 mA. Velikost efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu tohoto stabilizátoru ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz vypočtená kódem v programu Matlab pro zatěžovací proud 0 mA je 147,68 μV , činitel zvlnění tohoto stabilizátoru je 0,015 %. Pro zatěžovací proud 100 mA je efektivní hodnota napětí 594,7 μV , činitel zvlnění je 0,0678 %. Pokud je aktivováno potlačení dvaceti harmonických násobků síťového kmitočtu, je efektivní hodnota šumového napětí pro zatěžovací proud 0 mA 130,49 μV a

pro zatěžovací proud 100 mA je $592 \mu\text{V}$ viz obrázek C.22. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.20. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru LT1964 s výstupním napětím $-8,6 \text{ V}$ je na obrázku C.21 (a).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	$140,7 \mu\text{V}$	$140,7 \mu\text{V}$
100 mA	$549,3 \mu\text{V}$	$549,3 \mu\text{V}$

Tab. 7.20: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LT1964 s výstupním napětím $-8,6 \text{ V}$ měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.2.10 Stabilizátor LT1964 s výstupním napětím -18 V

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA a 100 mA . Velikost efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu tohoto stabilizátoru ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz vypočtená kódem v programu Matlab pro zatěžovací proud 0 mA je $31,32\ \mu\text{V}$, činitel zvlnění tohoto stabilizátoru je $0,0036\%$. Pro zatěžovací proud 100 mA je efektivní hodnota napětí $125\ \mu\text{V}$, činitel zvlnění je $0,0052\%$. Pokud je aktivováno vyklíčování dvaceti harmonických násobků síťového kmitočtu, je efektivní hodnota šumového napětí pro zatěžovací proud 0 mA $31,56\ \mu\text{V}$ a pro zatěžovací proud 100 mA je $72,1\ \mu\text{V}$ viz obrázek C.23. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.21. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru LT1964 s výstupním napětím -18 V je na obrázku C.21 (b).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	$25,51\ \mu\text{V}$	$42,14\ \mu\text{V}$
100 mA	$108,6\ \mu\text{V}$	$306,7\ \mu\text{V}$

Tab. 7.21: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru LT1964 s výstupním napětím -18 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

7.2.11 Stabilizátor TPS7A3001 s výstupním napětím -24 V

Tento stabilizátor byl zatěžován proudem 0 mA a 100 mA . Velikost efektivní hodnoty šumového napětí na výstupu tohoto stabilizátoru ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 100 kHz vypočtená kódem v programu Matlab pro zatěžovací proud 0 mA je $152,16\ \mu\text{V}$, činitel zvlnění tohoto stabilizátoru je $0,0047\%$. Pro zatěžovací proud 100 mA je efektivní hodnota napětí $546,6\text{ mV}$, činitel zvlnění je $14,11\%$. Pokud je aktivováno vyklíčování dvaceti harmonických násobků síťového kmitočtu, je efektivní hodnota šumového napětí pro zatěžovací proud 0 mA $80,1\ \mu\text{V}$ a pro zatěžovací proud 100 mA je $546,3\text{ mV}$ viz obrázek C.24. Efektivní hodnoty šumového napětí naměřené pomocí audio analyzátoru jsou uvedeny v tabulce 7.22. Průběh spektra šumového signálu stabilizátoru TPS7A300A s výstupním napětím -24 V je na obrázku C.21 (c).

Zatěžovací proud	frekvenční pásmo 80 kHz	frekvenční pásmo 500 kHz
0 mA	$198,5\ \mu\text{V}$	$198,5\ \mu\text{V}$
100 mA	930 mV	930 mV

Tab. 7.22: Tabulka efektivních hodnot šumového napětí stabilizátoru TPS7A3001 s výstupním napětím -24 V měřená pomocí audio analyzátoru pro různé zatěžovací proudy

8

Závěr

Analýza parametrů a měřících metod nízkošumových lineárních stabilizátorů byla provedena v kapitole 2. Podle těchto parametrů byl zkonstruován kód pro automatické měření efektivní hodnoty výstupního šumového napětí a činitele zvlnění na výstupu měřeného stabilizátoru.

Dále byla provedena optimalizace modulu lineárního stabilizátoru složeného z diskrétních součástek pro výstupní napětí +5 V, +15 V a +18 V. Optimalizace spočívala v nalezení efektivní hodnoty výstupního šumového napětí ve frekvenčním rozsahu 10 Hz až 100 kHz a velikosti činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR) na frekvenci 120 Hz, které se budou blížit hodnotám nízkošumových monolitických stabilizátorů.

Program pro automatizované měření šumových parametrů, navržený ve výpočetním prostředí Matlab, počítá činitel zvlnění měřeného průběhu a efektivní hodnotu tohoto průběhu v zadaném frekvenčním rozsahu. Je zde možnost vyklíčovat až dvacet harmonických násobků síťového kmitočtu 50 Hz.

Mezi šumové parametry také patří činitel potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR), který je ovšem obtížné měřit z důvodu potřeby speciálního širokopásmového transformátoru odolného vůči stejnosměrnému sycení a dále napěťového zdroje, který umožňuje modulaci střídavého signálu na stejnosměrné výstupní napětí. Z důvodu požadavku na co nejnižší cenu součástek použitých v diplomové práci nebyl tento parametr měřen.

Velikost efektivní hodnoty šumového napětí ve frekvenčním pásmu 100 kHz vazebního členu pro měření šumových parametrů je $3,1229 \mu\text{V}$, měřícím řetězcem podle obrázku 5.1 lze měřit efektivní hodnotu šumového napětí vyšší než je šumové napětí vazebního členu.

Pro další postup při měření šumových parametrů je vhodné zařadit měření činitele potlačení zvlnění napájecího napětí (PSRR), pro tento případ je v kódu pro automatizované měření připraveno vyhledání předem určeného kmitočtu (v případě PSRR 100 (120) Hz případně 1 kHz) a tuto hodnotu lze dále zpracovávat jako napěťovou hladinu.

Z naměřených hodnot efektivního šumového napětí vyplývá, že se efektivní šumové napětí zvyšuje se zvyšujícím se výstupním napětím a také se zvyšujícím se zatěžovacím proudem stabilizátoru. Činitel zvlnění roste se zvyšujícím se výstupním napětím a zatěžovacím proudem. Velikosti efektivních hodnot šumového napětí měřených stabilizátorů,

kteří byly počítány v Matlabu bez potlačení harmonických násobků síťového kmitočtu, vyšly podobně, jako hodnoty naměřené audio analyzátozem. Audio analyzátoz mĚří ve frekvenčním pásmu do 80 kHz nebo nad 500 kHz. Kód v Matlabu počítá s frekvenčním rozsahem od 10 Hz do 100 kHz, který používají výrobci stabilizátorů. Zde vznikly drobné nesrovnalosti ve vypočtených hodnotách efektivního šumového napětí.

Stabilizátory pro výstupní napětí ± 18 V jsou zatěžovány proudy 0 mA, 100 mA, 200 mA a 500 mA. Ze strany výrobce plošných spojů došlo k pochybení a modul zatěžovacího odporu pro proud 700 mA při napětí 18 V nebyl dodán.

Efektivní hodnota šumového napětí naměřená na modulech stabilizátorů 7805, 7905, LM317 +5V a LM337 -5V byla zvýšena o tepelný šum z důvodu velkého ztrátového výkonu těchto stabilizátorů způsobeného napětím na filtračních kondenzátorech základny napěťového zdroje pro možnost napájení modulů stabilizátorů s výstupním napětím až 24 V.

Při použití funkce vyklíčování dvaceti harmonických násobků síťového kmitočtu 50 Hz (brumových složek) se efektivní šumové napětí snížilo u stabilizátorů řady 78xx a LM317 přibližně na polovinu. Tyto stabilizátory jsou výrazně ovlivňovány brumovými složkami, a to až do kmitočtu 1 kHz. Stabilizátor záporného napětí 7905 byl při měření napájen pomocí stejnosměrného zdroje, protože modul základny napěťového zdroje měl příliš vysoké napětí pro vstup tohoto stabilizátoru. Napěťové stabilizátory záporného napětí řady 79xx a LM337 nejsou ovlivňovány brumovými složkami jako stabilizátory kladného napětí řady 78xx a LM317. U těchto stabilizátorů jsou naměřené efektivní hodnoty šumového napětí ve frekvenčním rozsahu 10 Hz až 100 kHz pro nízké hodnoty zatěžovacího proudu nižší než udávají výrobci. U vyšších hodnot zatěžovacího proudu se efektivní hodnoty šumových napětí zhoršují. Hodnoty činitele zvlnění jsou v řádech setin procent a zvyšují se při zvyšujícím se proudu zátěží.

Speciální nízkošumové stabilizátory byly při měření napájeny ze stejnosměrného zdroje napětí se vstupní hodnotou napětí v doporučeném rozsahu výrobce. U těchto stabilizátorů se funkce vyklíčování harmonických násobků kmitočtu 50 Hz téměř neprojevuje. Naměřené hodnoty efektivního šumového napětí na těchto stabilizátorech jsou rapidně vyšší než udávají výrobci. Toto je způsobeno tím, že měřené stabilizátory nebyly stíněny od okolních zdrojů rušení a byly napájeny ze stejnosměrného zdroje. Nízkošumové stabilizátory měřené výrobci jsou obvykle napájeny pouze z baterie a jsou dokonale odstíněny od okolních zdrojů rušení. Stínění při měření modulů nízkošumových stabilizátorů nebylo použito z důvodu dodržení co nejnižší ceny součástek použitých pro moduly stabilizátorů a měřicího řetězce. Tyto stabilizátory byly zatěžovány pouze proudem 100 mA, při kterém většina nízkošumových stabilizátorů vykazovala stejné hodnoty šumových napětí jako při odpojené zátěži. Stabilizátory záporného napětí LT1964 a TPS7A3001 se při zatěžovacím proudu 100 mA chovaly nestandardně, jejich efektivní hodnoty šumových napětí a činitele zvlnění rapidně vzrostly.

Stabilizátory pro napětí ± 48 V a +200V nebyly měřeny, protože se nepodařilo oživit

jejich moduly. Tyto stabilizátory byly sestaveny pomocí integrovaného obvodu řady 723 a výkonového tranzistoru. V zapojení je napájení integrovaného obvodu hrazeno pomocí Zenerovy diody (33 V), napětí dostačuje pro napájení integrovaného obvodu. Při nízké zátěži, která je požadována pro mikrofonní aplikace stabilizátory nefungují, protože se nízký zatěžovací proud hradí přes napájení integrovaného obvodu a integrovaný obvod nedodává potřebný proud do báze regulačního tranzistoru viz obr. 5.19. Proud, při kterém integrovaný obvod začne plnit v obvodu svoji funkci, lze nastavit pomocí rezistoru R_1 viz obr. 5.19. V modulu tohoto stabilizátoru se při zvyšování proudu zátěží snižuje výstupní napětí. Pro odstranění problému byla nahrazena Zenerova dioda zdrojem stejnosměrného napětí, po připojení zdroje se ovšem integrovaný obvod začal markantně zahřívat a tím pádem začala působit tepelná ochrana obvodu a modul stabilizátoru snížil výstupní proud do báze regulačního tranzistoru. Pro sestavení těchto stabilizátorů pomocí zapojení s jinými integrovanými obvody, již nebylo dostatek času.

Stabilizátory složené z diskretních součástek s výstupním napětím +5 V a +18 V nebyly změřeny z důvodu nedostatku času nutného na oživení těchto modulů, který byl způsoben opožděným dodáním speciálních součástek.

Z naměřených hodnot z hlediska efektivní hodnoty šumového napětí ve frekvenčním rozsahu 10 Hz až 100 kHz vyplývá, že monolitické stabilizátory řady 78xx a 79xx mají nižší efektivní hodnotu šumového napětí než stabilizátory složené pomocí odporového děliče společně s integrovaným obvodem řady 317 a 337. Měřené nízkošumové stabilizátory dosáhly vyšších hodnot šumového napětí než jsou hodnoty udávané výrobcem.

Literatura

- [1] ČSN EN 61606-1 *Zvuková a audiovizuální zařízení-Digitální zvukové části-Základní metody měření zvukových vlastností-Část 1_Všeobecně září 2004.*
- [2] Audio Precision *2700 Series Instrument Specifications* Oregon: Beaverton, © 2003–2011. [Cit. 28. 2. 2012]. Dostupné z: <http://ap.com/products/2700>
- [3] Hammerbauer, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. Vyd. 2 Plzeň: Tiskové středisko ZČU Plzeň, 1998, 181 s. ISBN 80-7082-411-5
- [4] Miller Technology Inc. *Everybody Knows About Capacitor Noise* CA: Los Gatos, 2012. [Cit. 11. 5. 2012]. Dostupné z: <http://www.millertechinc.com/pdf/files/TN095%20Capacitor%20Noise.htm>
- [5] ANALOG DEVICES *ADP7102: 20 V, 300 mA, Low Noise, CMOS LDO*. © 1995 - 2012. [Cit. 7. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.analog.com/en/power-management/linear-regulators/adp7102/products/product.html>
- [6] Marasco Ken. *Low-noise LDOs enhance noise-sensitive analogue/RF circuits*. EDN Europe, 15345483, únor 2011, Sv. 58, Vydání 2
- [7] Schwinberg P., Sigg D. *Voltage Regulation and Power Supplies*. California Institute of Technology, Massachusetts Institute of Technology, 19. únor 2007. [Cit. 4.3.2012]. Dostupné z: <https://dcc.ligo.org/public/0027/T070034/000/T070034-A.pdf>
- [8] MAXIM Application Note 883 *Improved Power-Supply Rejection for Linear Regulators*. CA: Sunnyvale, 1.října 2002. [Cit. 4. 3. 2012]. Dostupné z: <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN883.pdf>
- [9] Linear Technology Application Note 124 *775 Nanovolt Noise Measurement for A Low Noise Voltage Reference*. CA: Milpitas, červenec 2009. [Cit. 28. 2. 2012]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/Application%20Note/an124f.pdf>
- [10] Williams J., Owen T. *Performance Verification of Low Noise, Low Dropout Regulators*. CA: Milpitas, březen 2000. [Cit. 9. 3. 2012]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/Application%20Note/an83f.pdf>

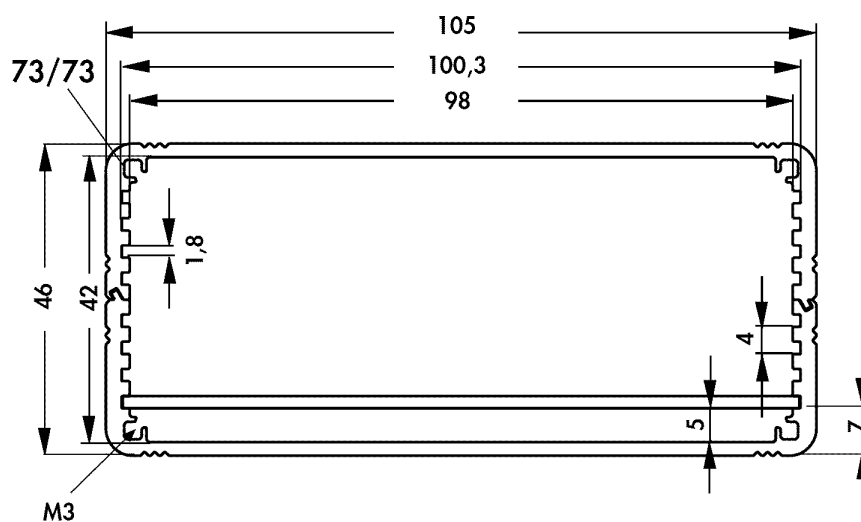
- [11] Self D. *The design of active crossovers*. Oxford: Focal Press, 2011, 608s. ISBN 978-0-240-81738-5
- [12] Variable DC Power Supply Using LM317 Regulator. *Electronics Project Design*. [online]. 2012 [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: <http://www.electronics-project-design.com/VariableDCPowerSupply.html>
- [13] Texas Instruments. *LM317M 3-TERMINAL ADJUSTABLE REGULATOR*, 12. červen 2006. [Cit. 22. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317m.pdf>
- [14] Texas Instruments. *LM337M 3-TERMINAL ADJUSTABLE REGULATOR*, 28. listopad 2007. [Cit. 22. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm337.pdf>
- [15] ST. *L7800 SERIES*, 2004. [Cit. 24. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/sheets/1/l78xx.pdf>
- [16] ST. *L7900 SERIES*, 2003. [Cit. 24. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/sheets/7/79xx.pdf>
- [17] Texas Instruments. *LM317M 3-TERMINAL ADJUSTABLE REGULATOR*, duben 2008. [Cit. 24. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf>
- [18] Texas Instruments. *LM237M, LM337 3-TERMINAL ADJUSTABLE REGULATOR*, listopad 2007. [Cit. 24. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm337-n.pdf>
- [19] Texas Instruments. *LM723/LM723C Voltage Regulator*, červen 1999. [Cit. 24. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm723.pdf>
- [20] Texas Instruments. *HIGH-VOLTAGE ADJUSTABLE REGULATOR*, duben 2008. [Cit. 24. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl783.pdf>
- [21] ANALOG. *20 V, 500 mA, Low Noise, CMOS LDO ADP7104*, 2012. [Cit. 24. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.analog.com/static/imported-files/data'sheets/ADP7104.pdf>
- [22] LINEAR TECHNOLOGY. *LT1962 Series 300mA, Low Noise Micropower LDO Regulators*, 2000. [Cit. 24. 3. 2012]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/1962fas.pdf>
- [23] LINEAR TECHNOLOGY. *LT1964 200mA, Low Noise, Low Dropout Negative Micropower Regulator*, 2001. [Cit. 24. 3. 2012]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/1964fb.pdf>

- [24] LINEAR TECHNOLOGY. *LT1965 1,1A, Low Noise, Low Dropout Linear Regulator*, 2007. [Cit. 6. 4. 2012]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/1965fa.pdf>
- [25] LINEAR TECHNOLOGY. *LT3032 Series Dual 150mA Positive/Negative Low Noise Low Dropout Linear Regulator*, 2010. [Cit. 24. 3. 2012]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/3032fd.pdf>
- [26] Texas Instruments. *LP2985 150-mA LOW-NOISE LOW-DROPOUT REGULATOR WITH SHUTDOWN*, 2010. [Cit. 24. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp2985a-50.pdf>
- [27] Texas Instruments. *+36V, +150mA, Ultralow-Noise, Positive LINEAR REGULATOR*, 18. leden 2011. [Cit. 24. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7a4901.pdf>
- [28] Texas Instruments. *-36V, -200mA, Ultralow-Noise, Negative LINEAR REGULATOR*, 29. březen 2011. [Cit. 24. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/tps7a3001>
- [29] Yang Ken. *Ultra-low-noise low-dropout regulator achieves 6-nV/Hz noise floor* CA: Sunnyvale, 23. červen 2005. [Cit. 25. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.maximic.com/app-notes/index.mvp/id/3657>
- [30] Texas Instruments. *LM7301 Low Power, 4 MHz GBW, Rail-to-Rail Input-Output Operational Amplifier in TinyPak Package* 23. březen 2011. [Cit. 16. 4. 2012]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7301.pdf>
- [31] International Rectifier. *IRF9530N* 13. květen 1998. [Cit. 16. 4. 2012]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/sheets/i/irf9530n.pdf>

Příloha A

Přípravky pro měření lineárních stabilizátorů napětí

A.1 Duralový box pro stínění vazebního členu



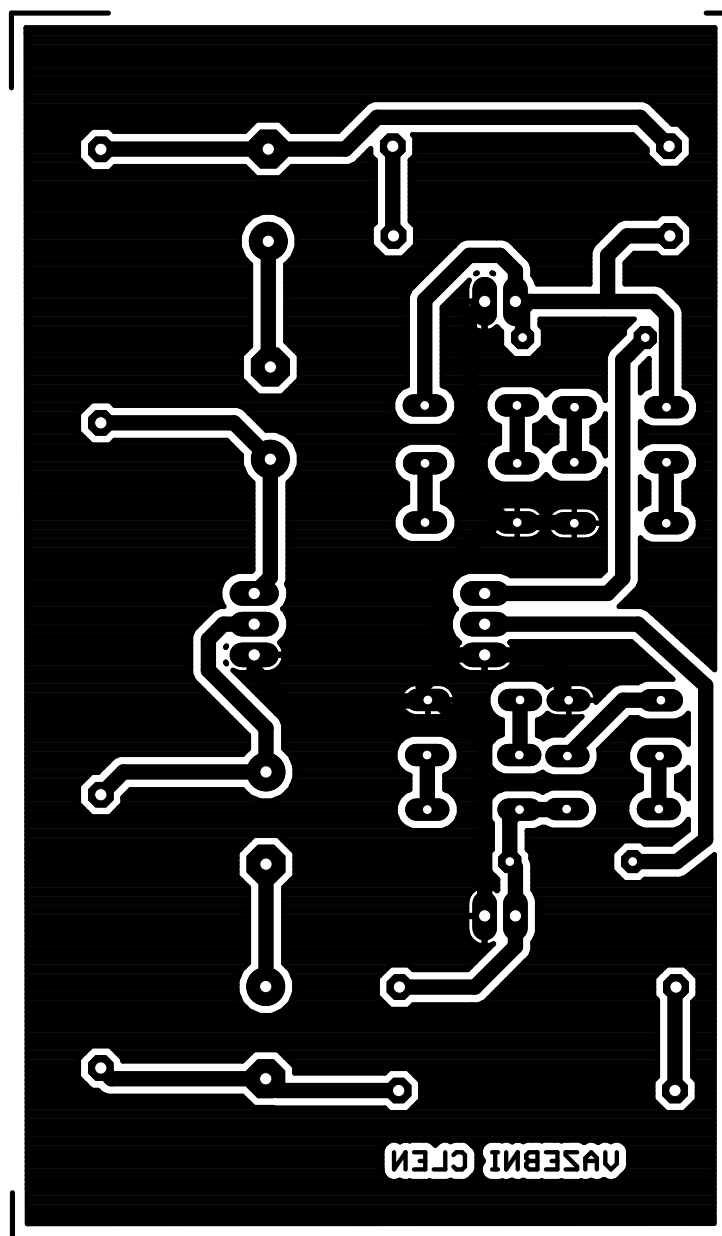
Obr. A.1: Duralový profil pro stínění vazebního členu

A.2 Seznam součástek vazebního členu

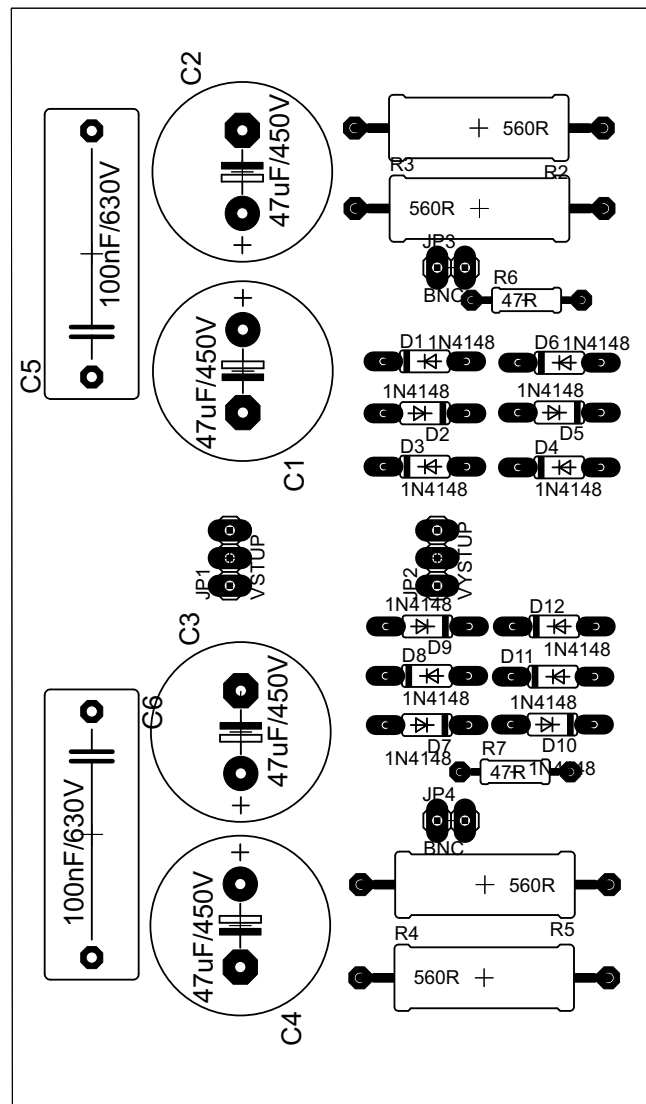
Součástka	typ
C_1, C_2, C_3, C_4	$47 \mu F / 450 V$
C_5, C_6	$100 nF / 630 V$
R_1	$1 M\Omega / 2W$
R_2, R_3, R_4, R_5	560Ω
R_6, R_7	47Ω
$D_1 - D_{12}$	1N4148

Tab. A.1: Použité součástky vazebního členu

A.3 Návrh DPS vazebního členu



Obr. A.2: Deska plošných spojů vazebního členu



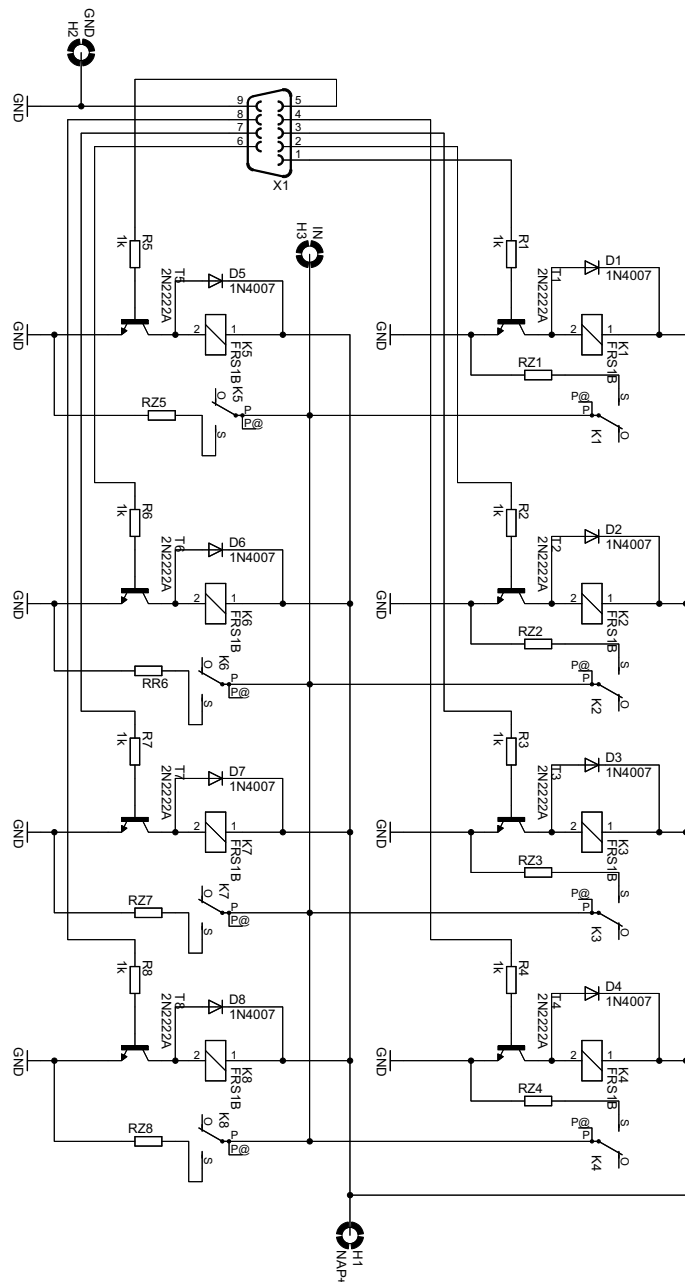
Obr. A.3: Osazovací plán pro vazební člen

A.4 Součástky přípravku pro automatické přepínání zátěže testovaného lineárního stabilizátoru napětí

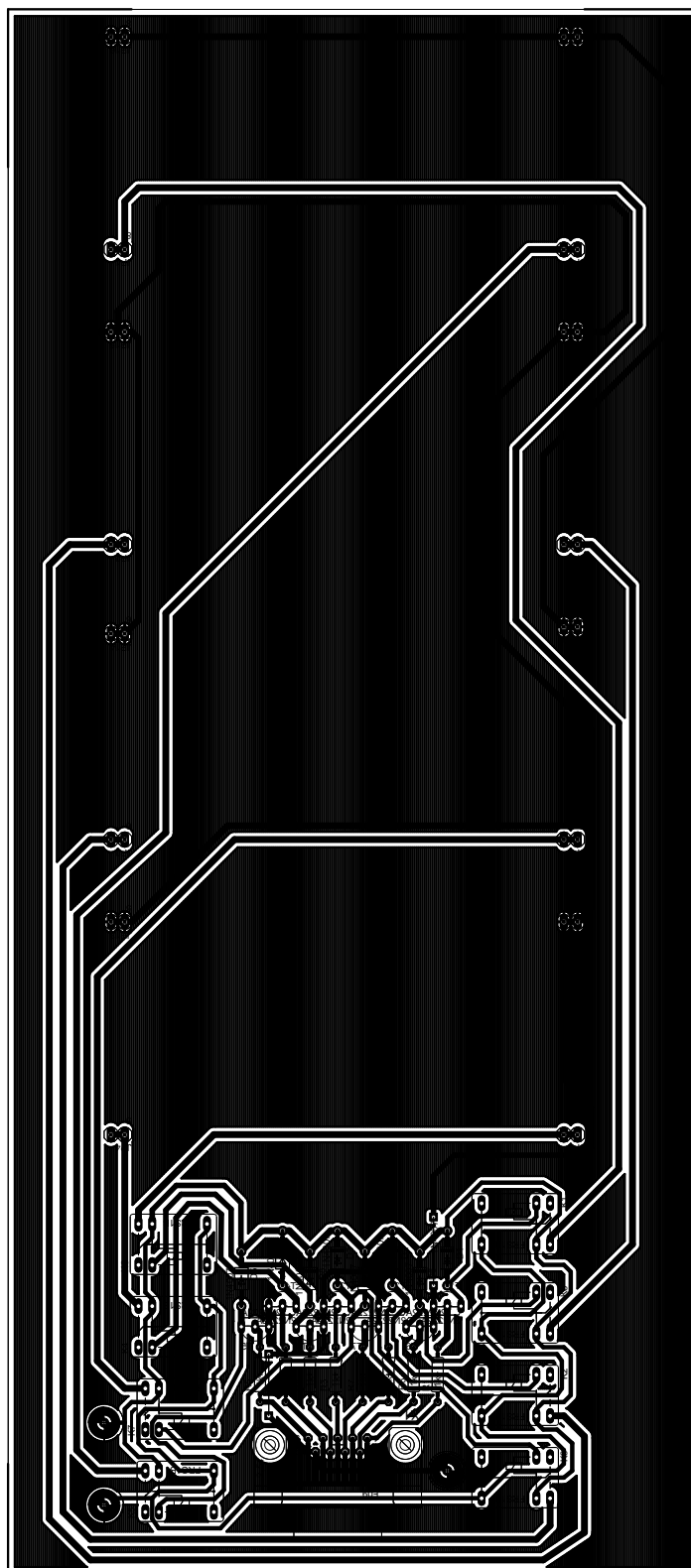
rezistor	$R_1 - R_8$	$1\text{ k}\Omega$
tranzistor	$T_1 - T_8$	$2N2222A$
dioda	$D_1 - D_8$	$1N4007$
konektor	$X1$	$DB9$
relé	$K1 - K8$	$5\text{ VDC}/3\text{ A}/120\text{ VAC}$

Tab. A.2: Součástky přípravku pro automatické přepínání zátěže testovaného stabilizátoru napětí

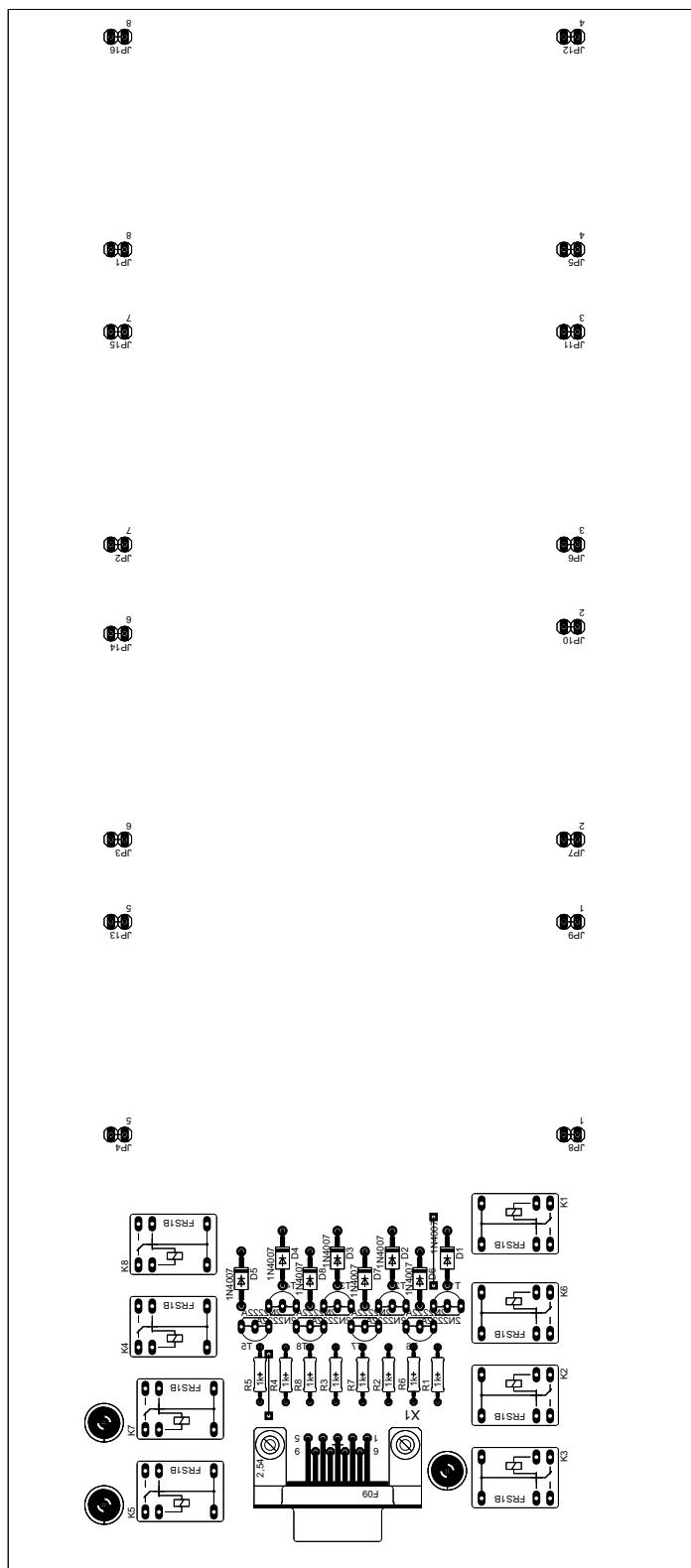
A.5 Automatické přepínání zátěže lineárního stabilizátoru napětí



Obr. A.4: Celkové schéma zapojení automatického přepínání zátěže lineárního stabilizátoru napětí



Obr. A.5: Deska plošného spoje modulu automatického přepínání zátěže lineárního stabilizátoru napětí



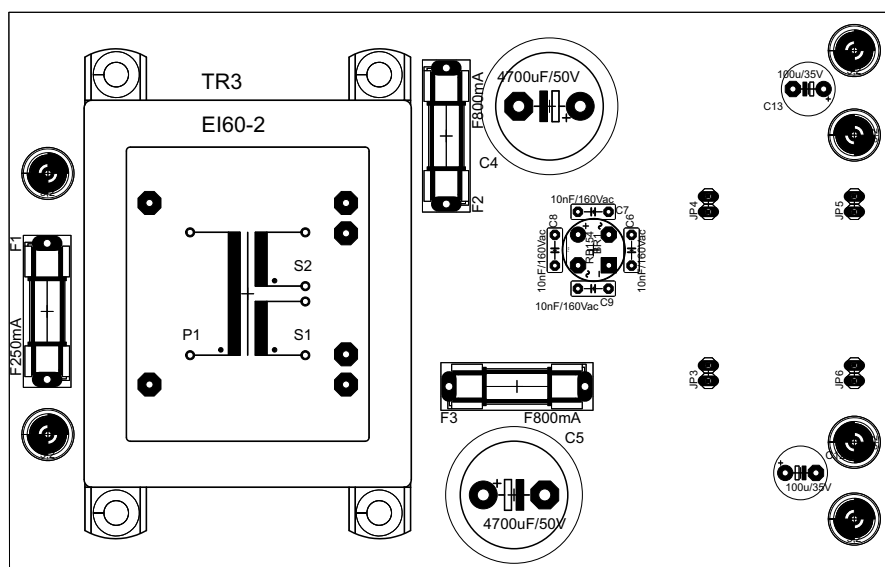
Obr. A.6: Rozvržení součástek desky plošného spoje modulu automatického přepínání zátěže lineárního stabilizátoru napětí

A.6 Součástky základny modulu napěťového zdroje

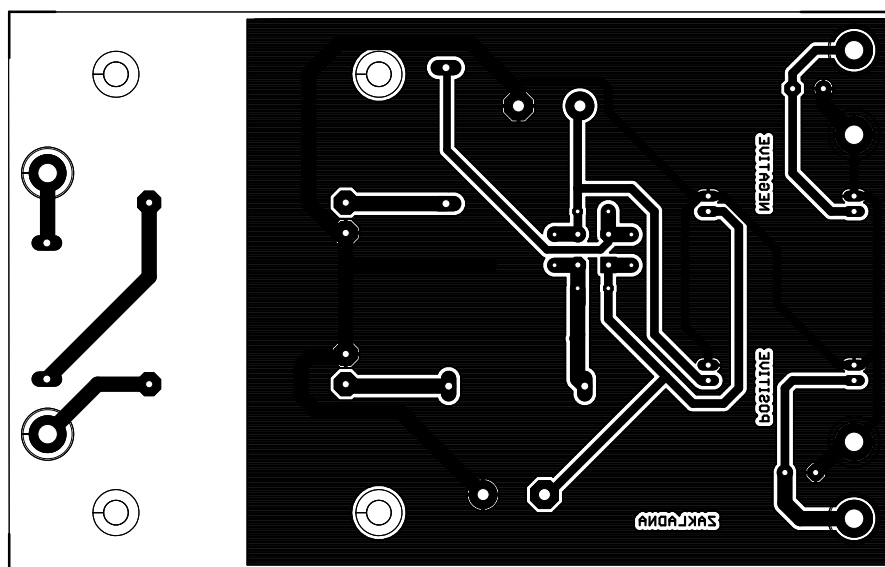
TR3	230 V/2 x 24 V/2 x 0,73 A
$C_1 - C_3$	10 nF/275 V AC (X-cap)
$C_6 - C_9$	10 nF/160 V AC
C_4, C_5	4700 μ F/50 V
C_{12}, C_{13}	100 μ F/35 V
F1	T2A
F2, F3	T1A
BR1	RB154 (1,5 A/400 V AC)

Tab. A.3: Součástky základny modulu napěťového zdroje pro měření modulů lineárních stabilizátorů napětí

A.7 Základna modulu zdroje pro lineární stabilizátory napětí



Obr. A.7: Osazovací plán základny zdroje napětí pro měření modulů lineárních stabilizátorů



Obr. A.8: Deska plošných spojů základny zdroje napětí pro měření modulů lineárních stabilizátorů

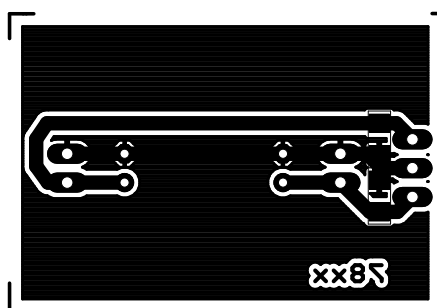
Příloha B

Moduly lineárních napěťových stabilizátorů

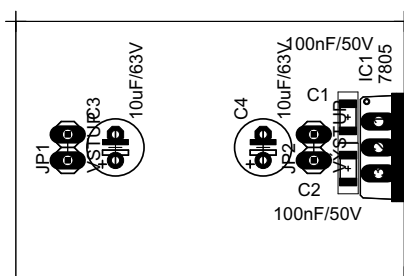
B.1 Součástky pro lineární stabilizátory kladného napětí 7805, 7815, 7818 a 7824

C_1, C_2	$1\ \mu F/25\ V$
C_3, C_4	$10\ \mu F/63\ V$
IC1	7805, 7815, 7818, 7824

Tab. B.1: Součástky pro měřicí moduly napěťových stabilizátorů 7805, 7815, 7818 a 7824



(a) Deska plošných spojů modulu lineárního stabilizátoru kladného napětí 78xx



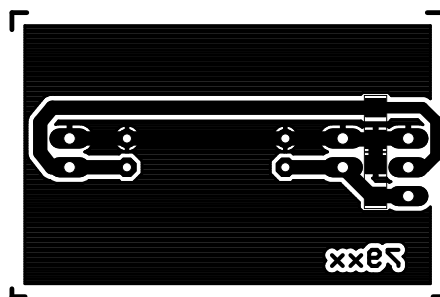
(b) Osazovací plán modulu lineárního stabilizátoru 78xx

Obr. B.1: Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí 78xx

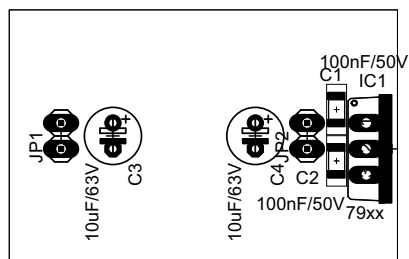
B.2 Součástky pro lineární stabilizátory záporného napětí 7905, 7915, 7918 a 7924

C_1, C_2	$1\ \mu F/25\ V$
C_3, C_4	$10\ \mu F/63\ V$
IC1	7905, 7915, 7918, 7924

Tab. B.2: Součástky pro měřicí moduly napěťových stabilizátorů 7905, 7915, 7918 a 7924



(a) Deska plošných spojů modulu lineárního stabilizátoru záporného napětí 79xx



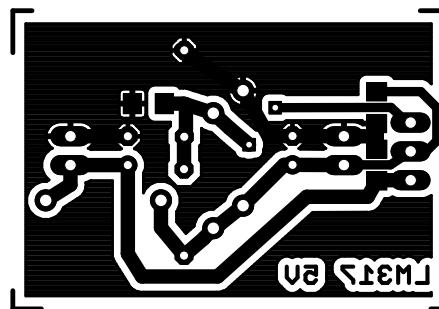
(b) Osazovací plán modulu lineárního stabilizátoru 79xx

Obr. B.2: Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí 79xx

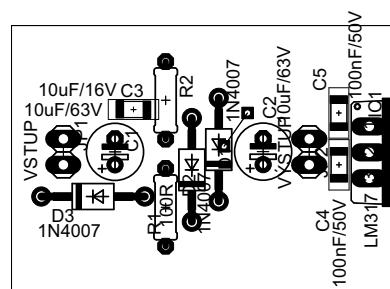
B.3 Součástky pro lineární stabilizátory kladného napětí řady 317

C_1, C_2	10 μF /63 V
C_3	10 μF /16 V
C_4, C_5	1 μF /25 V
IC1	317
D_1, D_2, D_3	1N4007
R_1	100 Ω
R_2	300 Ω , 1,1 k Ω , 1340 Ω , 1820 Ω

Tab. B.3: Součástky pro měřicí moduly napěťových stabilizátorů řady 317

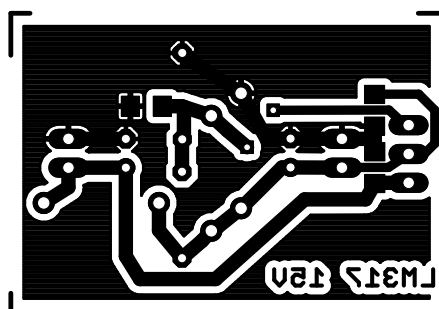


(a) Deska plošných spojů

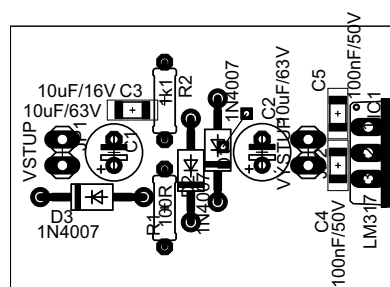


(b) Osazovací plán

Obr. B.3: Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 317 s výstupním napětím 5 V

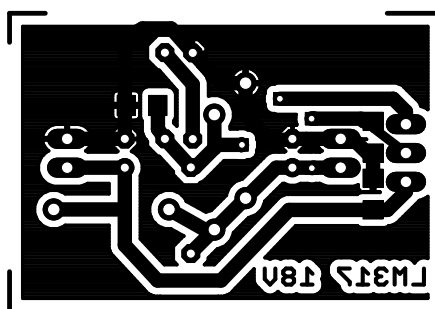


(a) Deska plošných spojů

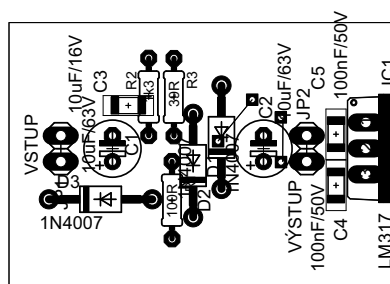


(b) Osazovací plán

Obr. B.4: Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 317 s výstupním napětím 15 V

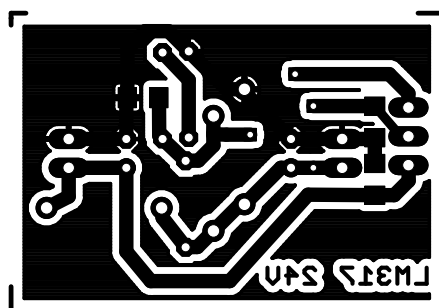


(a) Deska plošných spojů

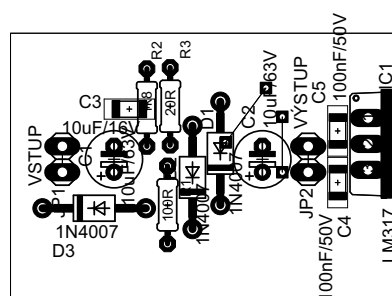


(b) Osazovací plán

Obr. B.5: Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 317 s výstupním napětím 18 V



(a) Deska plošných spojů



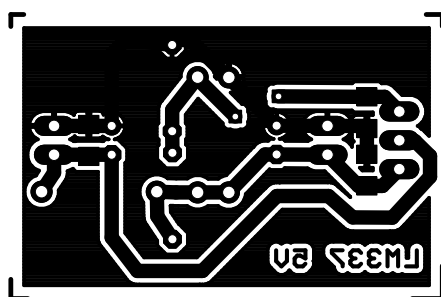
(b) Osazovací plán

Obr. B.6: Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 317 s výstupním napětím 24 V

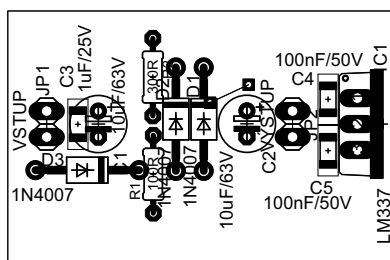
B.4 Součástky pro lineární stabilizátory záporného napětí řady 337

C_1, C_2, C_5	$10 \mu F/63 V$
C_3, C_4	$1 \mu F/63 V$
IC1	337
D_1, D_2, D_3	1N4007
R_1	100Ω
R_2	$300 \Omega, 1, 1 k\Omega, 1340 \Omega, 1820 \Omega$

Tab. B.4: Součástky pro měřicí moduly napěťových stabilizátorů řady 337

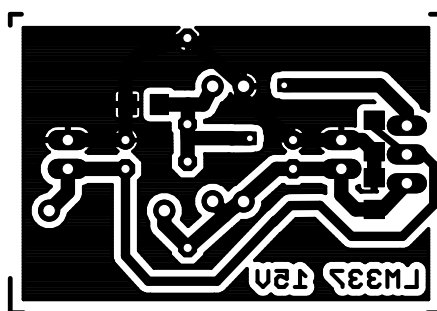


(a) Deska plošných spojů

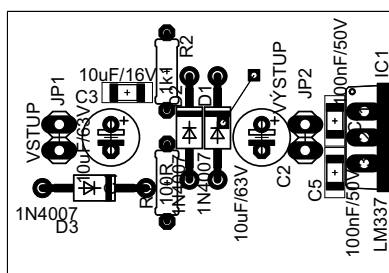


(b) Osazovací plán

Obr. B.7: Modul lineárního stabilizátoru záporného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 337 s výstupním napětím $-5 V$

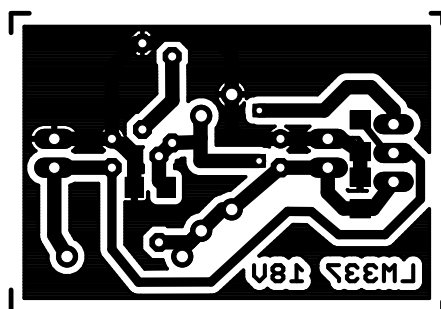


(a) Deska plošných spojů

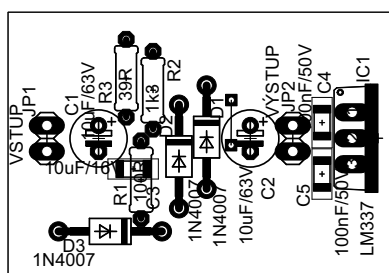


(b) Osazovací plán

Obr. B.8: Modul lineárního stabilizátoru záporného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 337 s výstupním napětím -15 V

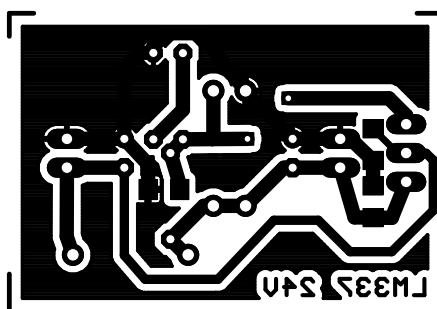


(a) Deska plošných spojů

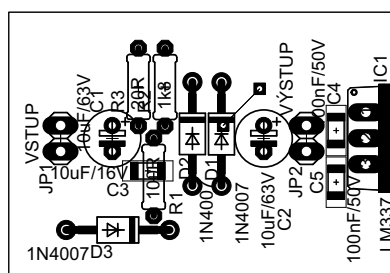


(b) Osazovací plán

Obr. B.9: Modul lineárního stabilizátoru záporného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 337 s výstupním napětím -18 V



(a) Deska plošných spojů



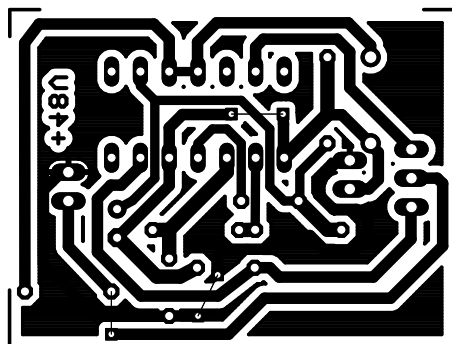
(b) Osazovací plán

Obr. B.10: Modul lineárního stabilizátoru záporného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 337 s výstupním napětím -24 V

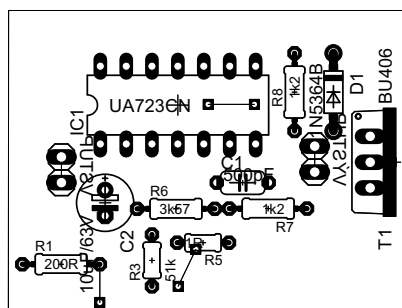
B.5 Součástky pro lineární stabilizátory kladného napětí 48 V a 200 V pomocí integrovaného obvodu 723

C_1	1 nF
R_1	200 Ω
R_3	51 k Ω , 204 k Ω
R_5	1 Ω
R_6	3,57 k Ω
R_7, R_8	3 k Ω
IC1	UA723CN
T1	BUT11, BU406
D_1	1N5364B

Tab. B.5: Součástky měřicích modulů kladného stabilizátoru napětí +48 V a +200 V

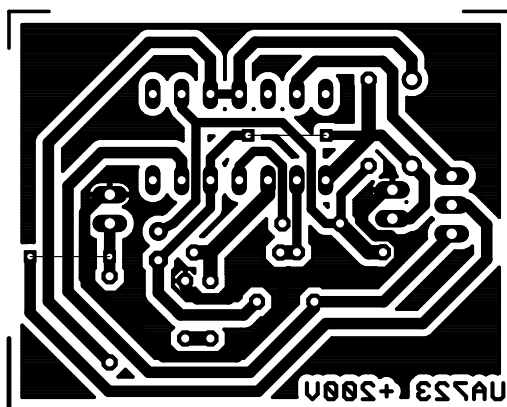


(a) Deska plošného spoje

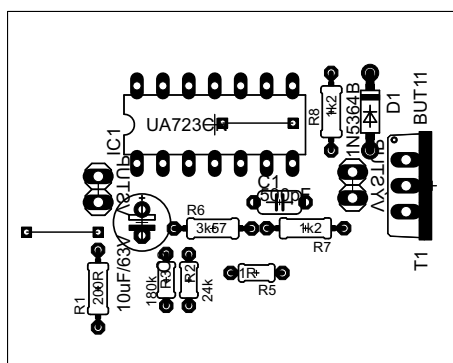


(b) Osazovací plán

Obr. B.11: Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 723 a tranzistoru BU406 s výstupním napětím +48 V



(a) Deska plošného spoje



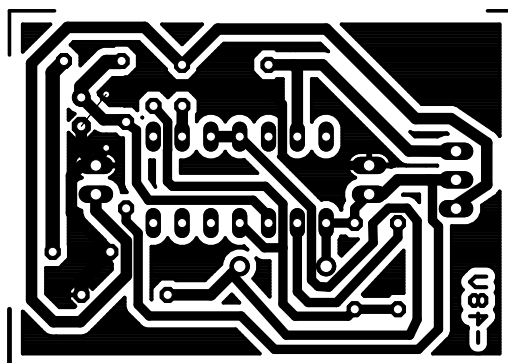
(b) Osazovací plán

Obr. B.12: Modul lineárního stabilizátoru kladného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 723 a tranzistoru BUT11 s výstupním napětím +200 V

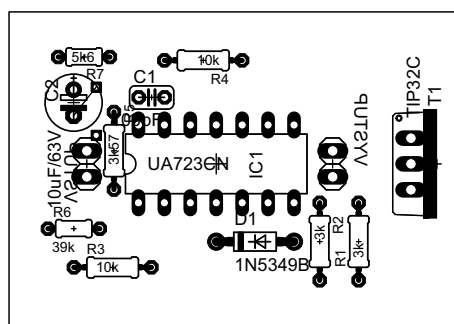
B.6 Součástky pro lineární stabilizátory záporného napětí -48 V pomocí integrovaného obvodu 723

C_1	100 pF
C_2	10 μ F/63 V
R_1, R_2	3 k Ω
R_3, R_4	10 k Ω
R_5	3,57 k Ω
R_6	39 k Ω
R_7	5,6 k Ω
IC1	UA723CN
T1	TIP32C
D_1	1N5349B

Tab. B.6: Součástky měřicího modulu záporného stabilizátoru napětí -48 V



(a) Deska plošného spoje spodní vrstva



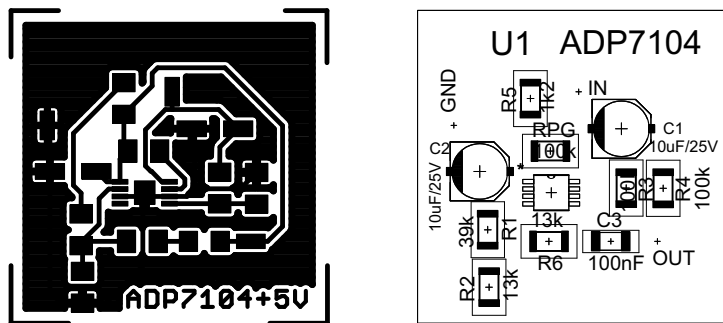
(b) Osazovací plán

Obr. B.13: Modul lineárního stabilizátoru záporného napětí pomocí integrovaného obvodu řady 723 a tranzistoru TIP 127 s výstupním napětím -48 V

B.7 Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí ADP7104

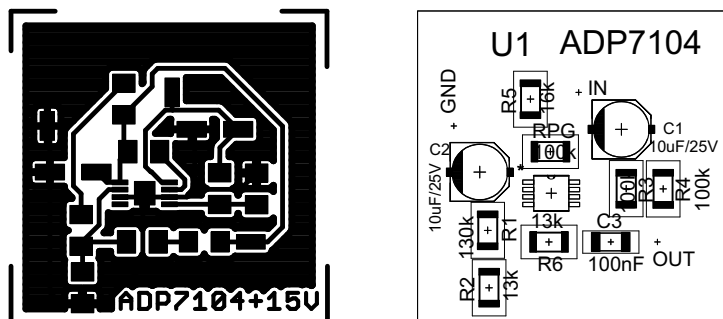
C_1, C_2	$10 \mu F / 25 V$
C_3	$100 nF$
R_1	$40, 2 k\Omega, 146 k\Omega, 178 k\Omega$
R_2, R_6	$13 k\Omega$
R_3, R_4, RPG	$100 k\Omega$
IO	ADP7104

Tab. B.7: Součástky modulů stabilizátoru ADP7104



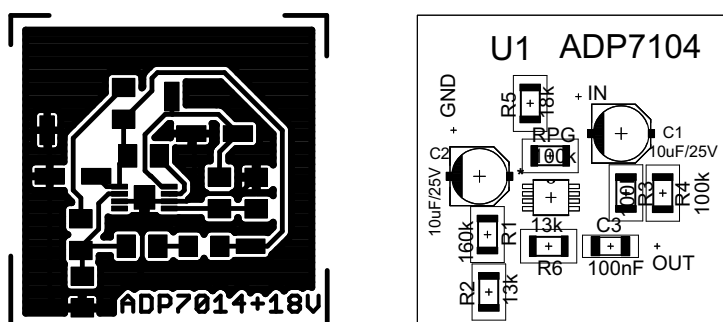
(a) DPS stabilizátoru ADP7104 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru ADP7104

Obr. B.14: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí ADP7104 s výstupním napětím 5V



(a) DPS stabilizátoru ADP7104 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru ADP7104

Obr. B.15: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí ADP7104 s výstupním napětím 15V



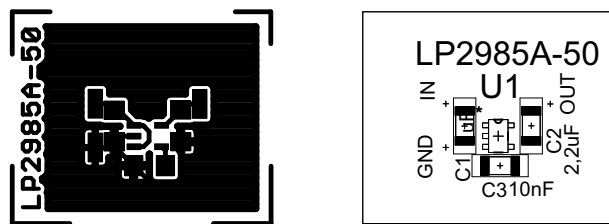
(a) DPS stabilizátoru ADP7104 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru ADP7104

Obr. B.16: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí ADP7104 s výstupním napětím 18V

B.8 Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LP2985A-50

C_1	$1\ \mu F$
C_2	$2,2\ \mu F$
C_3	$10\ nF$
IO	LP2985A – 50

Tab. B.8: Součástky modulu stabilizátoru LP2985A-50



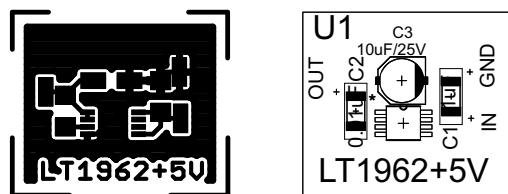
(a) DPS stabilizátoru LP2985A-50 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru LP2985A-50

Obr. B.17: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LP2985A-50 s výstupním napětím 5V

B.9 Lineární nízkošumový stabilizátor L1962 s výstupním napětím 5 V

C_1	$1 \mu F$
C_2	$0.01 \mu F$
C_3	$10 \mu F / 25 V$
IO	LT1962

Tab. B.9: Součástky modulu stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím 5 V



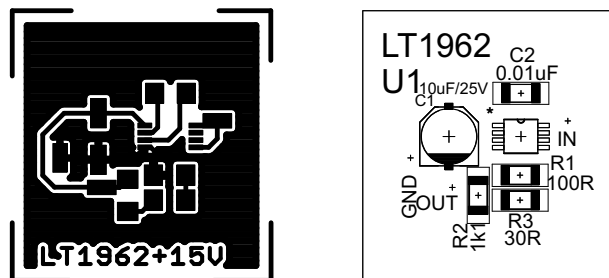
(a) DPS stabilizátoru LT1962 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru LT1962

Obr. B.18: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1962 s výstupním napětím 5V

B.10 Lineární nízkošumový stabilizátor L1962 s výstupním napětím 15 V a 18 V

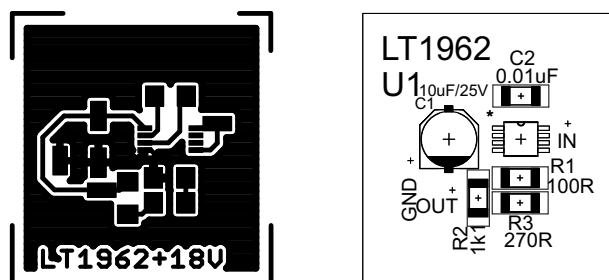
C_1	$10 \mu F / 25 V$
C_2	$0.01 \mu F$
R_1	100Ω
R_2	$1130 \Omega, 1370 \Omega$
IO	LT1962

Tab. B.10: Součástky modulu stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím 15 V a 18 V



(a) DPS stabilizátoru LT1962 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru LT1962

Obr. B.19: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1962 s výstupním napětím 15V



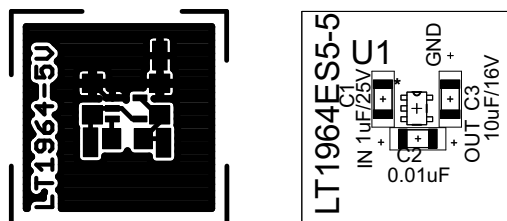
(a) DPS stabilizátoru LT1962 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru LT1962

Obr. B.20: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1962 s výstupním napětím 18V

B.11 Lineární nízkošumový stabilizátor L1964 s výstupním napětím -5 V

C_1	$1\ \mu\text{F}/25\text{ V}$
C_2	$0.01\ \mu\text{F}$
C_3	$10\ \mu\text{F}/25\text{ V}$
IO	LT1964

Tab. B.11: Součástky modulu stabilizátoru LT1964 s výstupním napětím -5 V



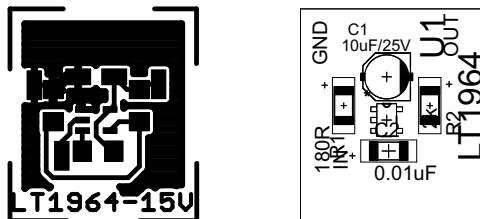
(a) DPS stabilizátoru LT1962 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru LT1962

Obr. B.21: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1964 s výstupním napětím -5 V

B.12 Lineární nízkošumový stabilizátor L1964 s výstupním napětím -15 V a -18 V

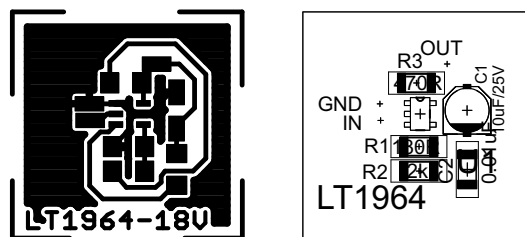
C_1	$10\ \mu\text{F}/25\text{ V}$
C_2	$0.01\ \mu\text{F}$
R_1	$180\ \Omega$
R_2	$2\ \text{k}\Omega, 2470\ \Omega$
IO	LT1964

Tab. B.12: Součástky modulu stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím -15 V a -18 V



(a) DPS stabilizátoru LT1964 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru LT1964

Obr. B.22: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1964 s výstupním napětím -15V



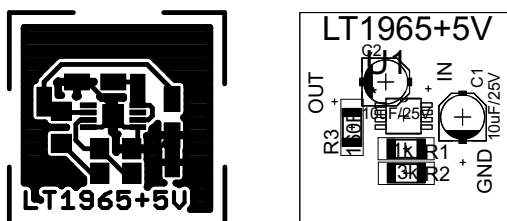
(a) DPS stabilizátoru LT1962 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru LT1964

Obr. B.23: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1964 s výstupním napětím -18V

B.13 Lineární nízkošumový stabilizátor LT1965

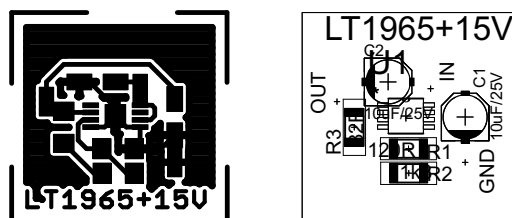
C_1, C_2	$10 \mu F / 25 V$
R_1	$1 k\Omega, 120 \Omega$
R_2	$3160 \Omega, 1382 \Omega, 1682 \Omega$
IO	LT1965

Tab. B.13: Součástky modulu stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím 5 V, 15 V a 18 V



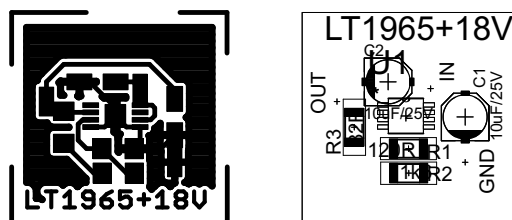
(a) DPS stabilizátoru LT1965 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru LT1965

Obr. B.24: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1965 s výstupním napětím 5V



(a) DPS stabilizátoru LT1965 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru LT1965

Obr. B.25: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1965 s výstupním napětím 15V



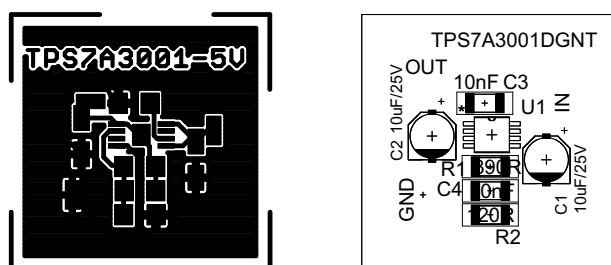
(a) DPS stabilizátoru LT1965 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru LT1965

Obr. B.26: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí LT1965 s výstupním napětím 18V

B.14 Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A3001

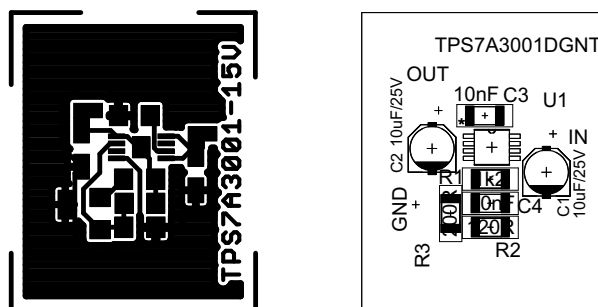
C_1, C_2	$10 \mu F / 25 V$
C_2, C_3	$10 nF$
R_1	$390 \Omega, 1400 \Omega, 882 \Omega, 1930 \Omega$
R_2	$120 \Omega, 62 \Omega, 100 \Omega$
IO	TPS7A3001

Tab. B.14: Součástky modulu stabilizátoru záporného napětí TPS7A3001 s výstupním napětím $-5V$, $-15V$, $-18V$ a $-24V$



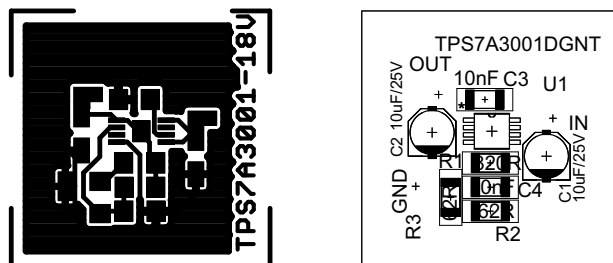
(a) DPS stabilizátoru TPS7A3001 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru TPS7A3001

Obr. B.27: Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A3001 s výstupním napětím $-5V$



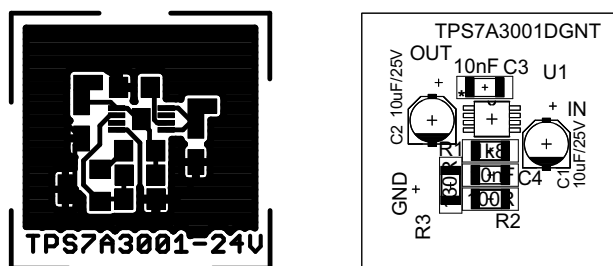
(a) DPS stabilizátoru TPS7A3001 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru TPS7A3001

Obr. B.28: Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A3001 s výstupním napětím $-15V$



(a) DPS stabilizátoru TPS7A3001 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru TPS7A3001

Obr. B.29: Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A3001 s výstupním napětím -18V



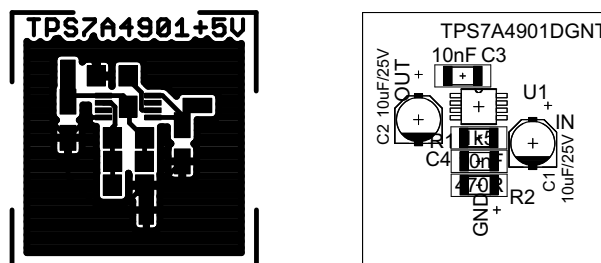
(a) DPS stabilizátoru TPS7A3001 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru TPS7A3001

Obr. B.30: Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A3001 s výstupním napětím -24V

B.15 Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí TPS7A4901

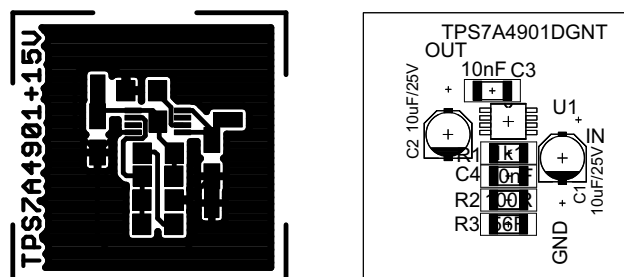
C_1, C_2	$10 \mu F / 25 V$
C_3, C_4	$10 nF$
R_1	$1,5 k\Omega, 1156 \Omega, 1 k\Omega, 1920 \Omega$
R_2	$470 \Omega, 100 \Omega, 68 \Omega$
IO	$TPS7A3001$

Tab. B.15: Součástky modulu stabilizátoru kladného napětí TPS7A4901 s výstupním napětím 5 V, 15 V, 18 V a 24 V



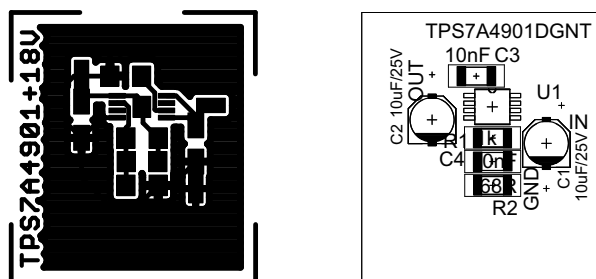
(a) DPS stabilizátoru TPS7A4901 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru TPS7A4901

Obr. B.31: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí TPS7A4901 s výstupním napětím 5 V



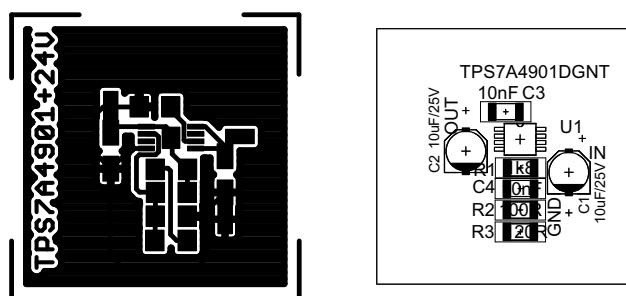
(a) DPS stabilizátoru TPS7A4901 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru TPS7A4901

Obr. B.32: Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A4901 s výstupním napětím 15 V



(a) DPS stabilizátoru TPS7A4901 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru TPS7A4901

Obr. B.33: Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A3001 s výstupním napětím 18V



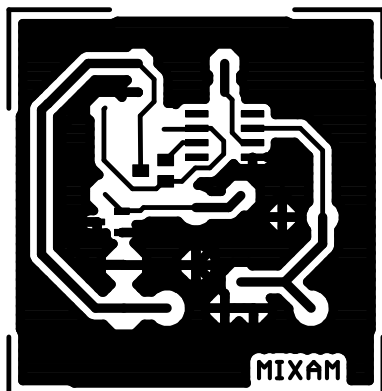
(a) DPS stabilizátoru TPS7A4901 (b) Rozmístění součástek na DPS stabilizátoru TPS7A4901

Obr. B.34: Lineární nízkošumový stabilizátor záporného napětí TPS7A4901 s výstupním napětím 24V

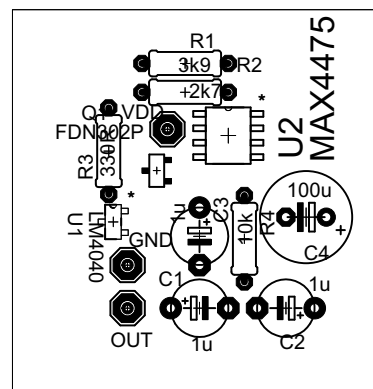
B.16 Zapojení lineárního nízkošumového stabilizátoru složeného z diskretních součástek

C_1, C_2, C_3	$1 \mu F$
C_4	$100 \mu F$
R_1	$3,9 k\Omega$
R_2	$2,7 k\Omega$
R_3	330Ω
R_4	$10 k\Omega$
$Q1$	$FDN302P$
$U1$	$LM4040$
$U2$	$MAX4475$

Tab. B.16: Součástky modulu stabilizátoru kladného napětí s výstupním napětím +5 V podle článku [29]



(a) Deska plošných spojů

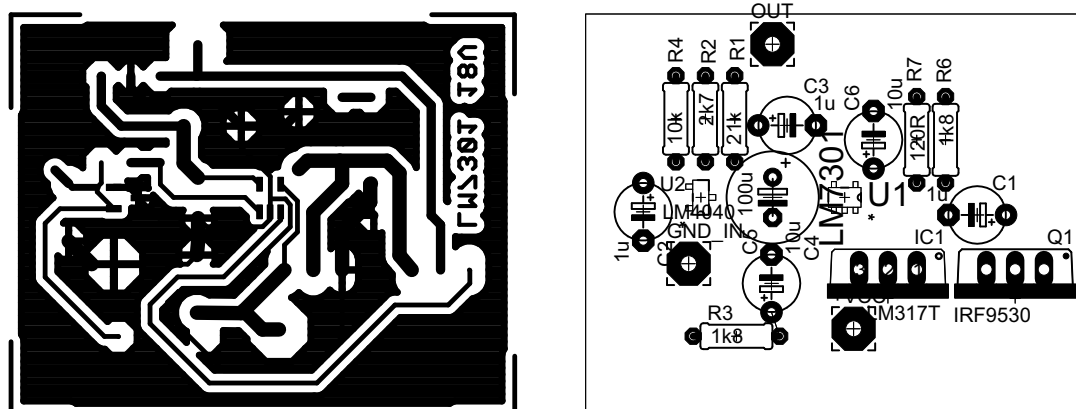


(b) Rozmístění součástek na desce plošného spoje

Obr. B.35: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí s výstupním napětím +5V podle článku [29]

C_1, C_2, C_3	$1 \mu F$
C_4	$100 \mu F$
C_5, C_6	$10 \mu F$
R_1	$21 k\Omega$
R_2	$2,7 k\Omega$
R_3	$1,8 k\Omega$
R_4	$10 k\Omega$
R_6	$1,8 k\Omega$
R_7	120Ω
$Q1$	$IRF9530N$
$U1$	$LM7301$
$U2$	$LM4040$

Tab. B.17: Součástky modulu stabilizátoru kladného napětí s výstupním napětím +18 V složeného z diskretních součástek

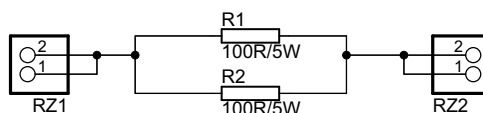


(a) Deska plošných spojů

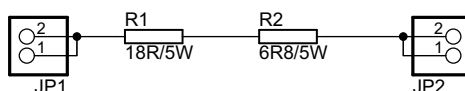
(b) Rozmístění součástek na desce plošného spoje

Obr. B.36: Lineární nízkošumový stabilizátor kladného napětí s výstupním napětím +18 V složený z diskretních součástek

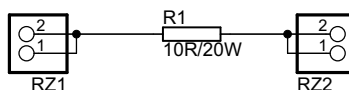
B.17 Moduly zatěžovacích rezistorů lineárních stabilizátorů napětí



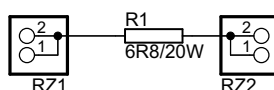
Obr. B.37: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 5 V zatěžovaný proudem 100 mA



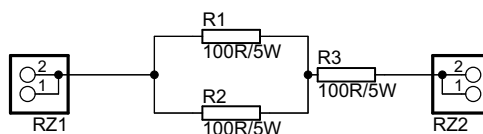
Obr. B.38: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 5 V zatěžovaný proudem 200 mA



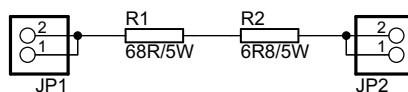
Obr. B.39: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 5 V zatěžovaný proudem 500 mA



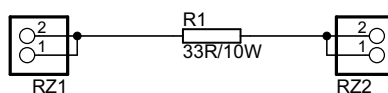
Obr. B.40: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 5 V zatěžovaný proudem 700 mA



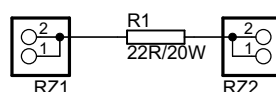
Obr. B.41: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 100 mA



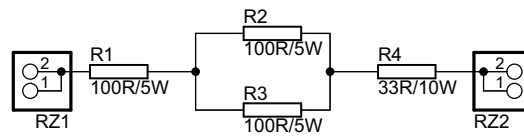
Obr. B.42: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 200 mA



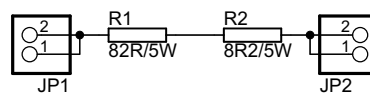
Obr. B.43: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 500 mA



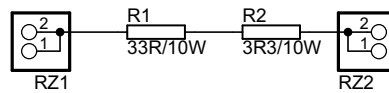
Obr. B.44: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 700 mA



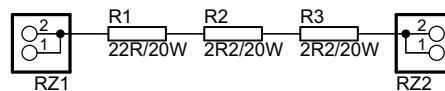
Obr. B.45: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 100 mA



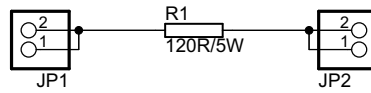
Obr. B.46: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 200 mA



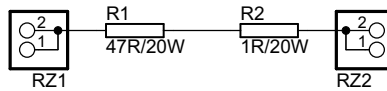
Obr. B.47: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 500 mA



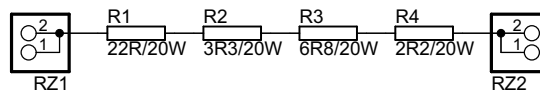
Obr. B.48: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 700 mA



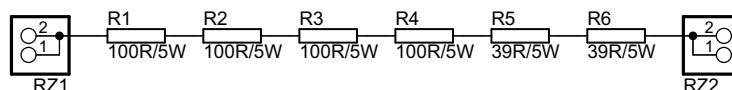
Obr. B.49: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V zatěžovaný proudem 200 mA



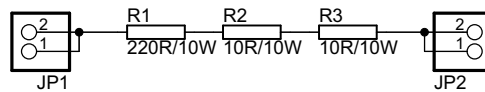
Obr. B.50: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V zatěžovaný proudem 500 mA



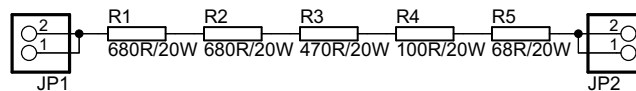
Obr. B.51: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V zatěžovaný proudem 700 mA



Obr. B.52: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 48 V zatěžovaný proudem 100 mA

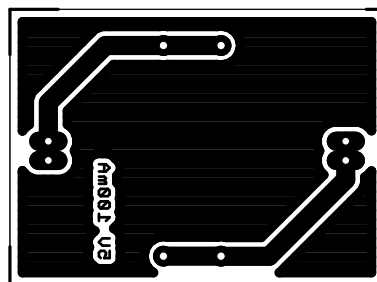


Obr. B.53: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V a 48 V zatěžovaný proudem 100 mA a 200 mA

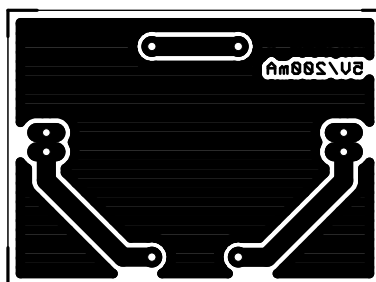


Obr. B.54: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 200 V zatěžovaný proudem 100 mA

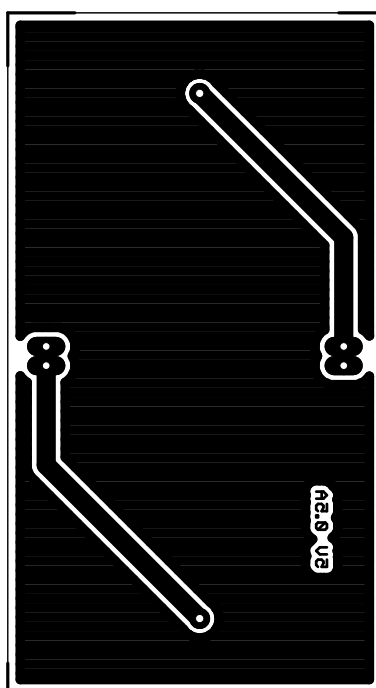
B.18 DPS zatěžovacích modulů lineárních stabilizátorů



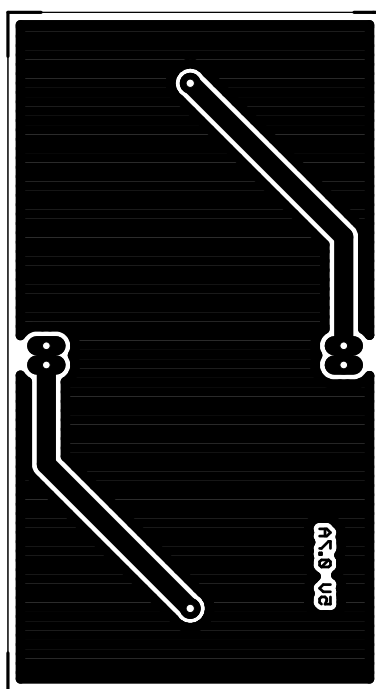
Obr. B.55: DPS modulu zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 5 V zatěžovaný proudem 100 mA



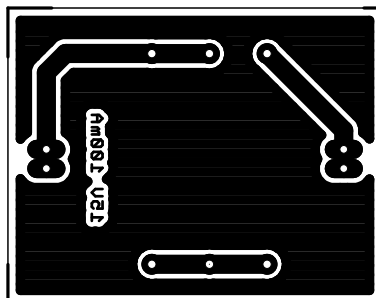
Obr. B.56: DPS modulu zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 5 V zatěžovaný proudem 200 mA



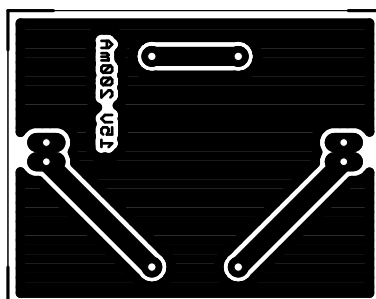
Obr. B.57: DPS modulu zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 5 V zatěžovaný proudem 500 mA



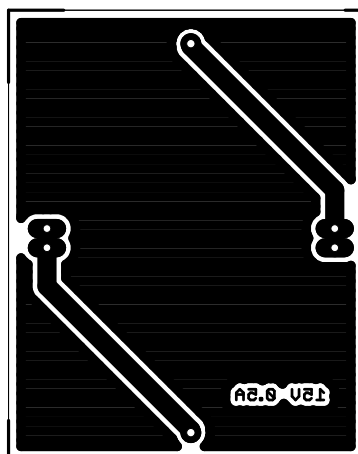
Obr. B.58: DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 5 V zatěžovaný proudem 700 mA



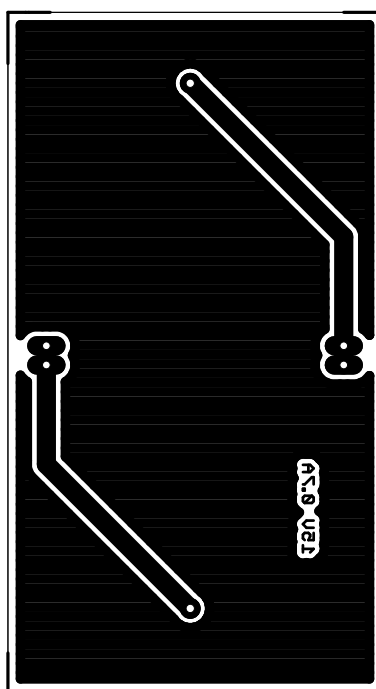
Obr. B.59: DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 100 mA



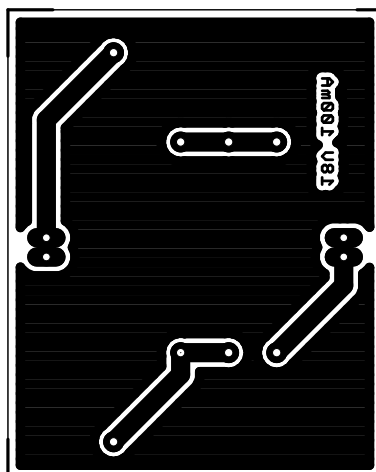
Obr. B.60: DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 200 mA



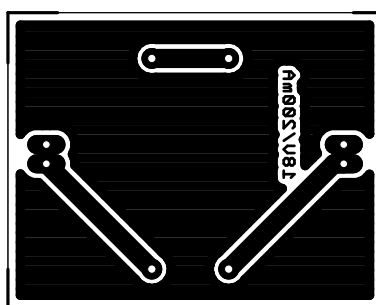
Obr. B.61: DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 500 mA



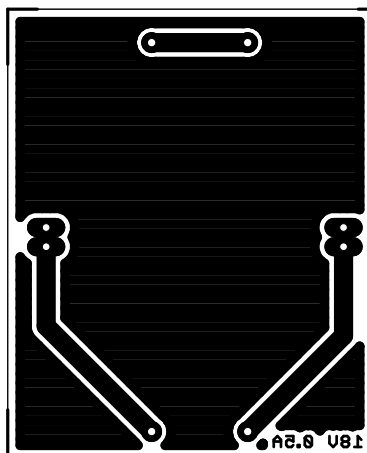
Obr. B.62: DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 15 V zatěžovaný proudem 700 mA



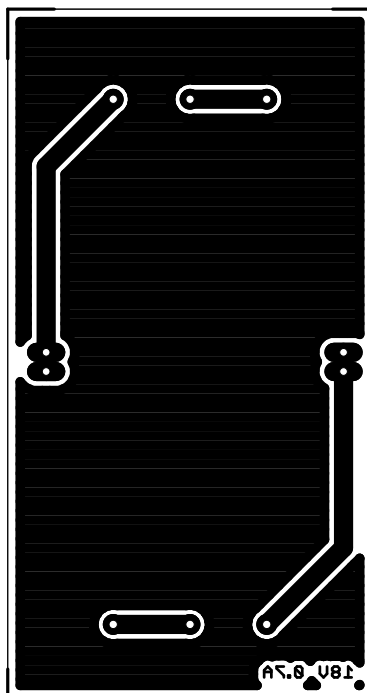
Obr. B.63: DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 100 mA



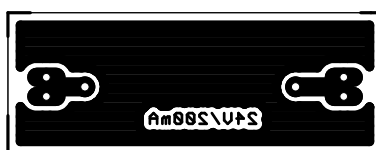
Obr. B.64: DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 200 mA



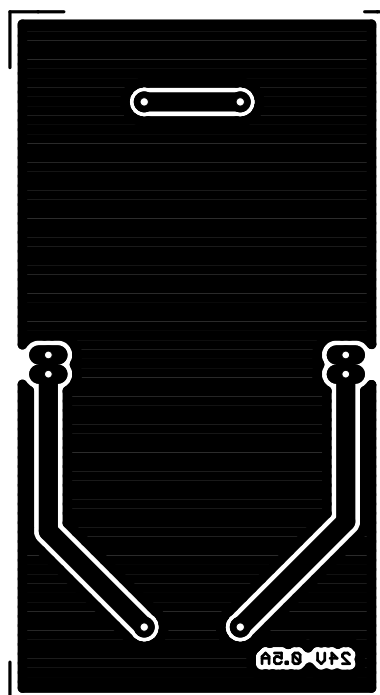
Obr. B.65: DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 500 mA



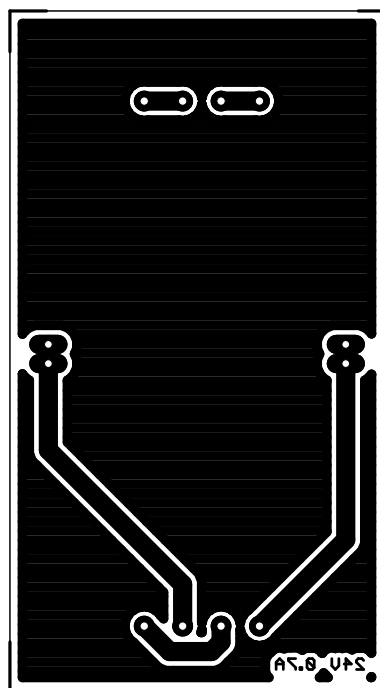
Obr. B.66: DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 18 V zatěžovaný proudem 700 mA



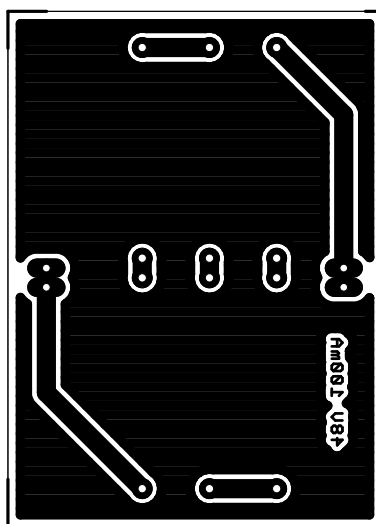
Obr. B.67: DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V zatěžovaný proudem 200 mA



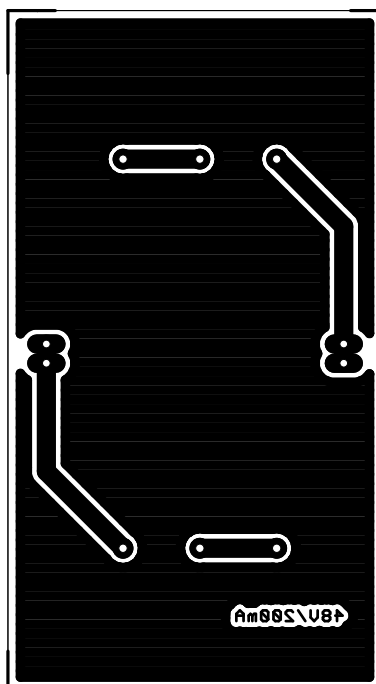
Obr. B.68: DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V zatěžovaný proudem 500 mA



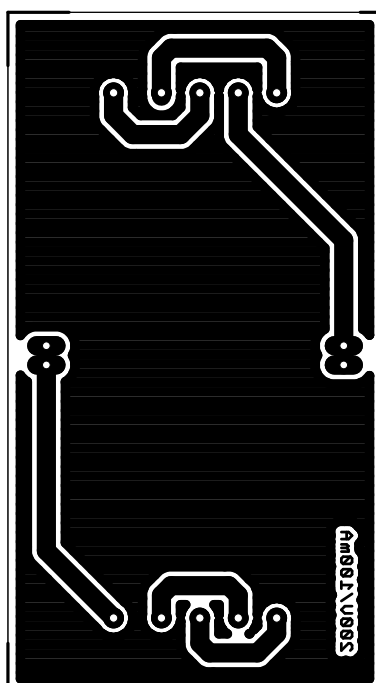
Obr. B.69: DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V zatěžovaný proudem 700 mA



Obr. B.70: DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 48 V zatěžovaný proudem 100 mA



Obr. B.71: DPS modulu pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 24 V a 48 V zatěžovaný proudem 100 mA a 200 mA



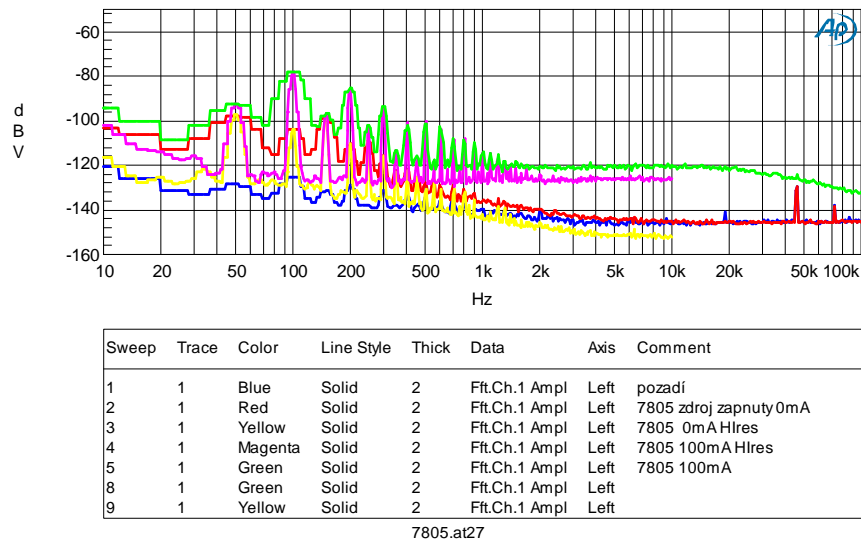
Obr. B.72: Modul zátěže pro lineární stabilizátor o výstupním napětí 200 V zatěžovaný proudem 100 mA

Příloha C

Průběhy šumového napětí měřených stabilizátorů

Audio Precision

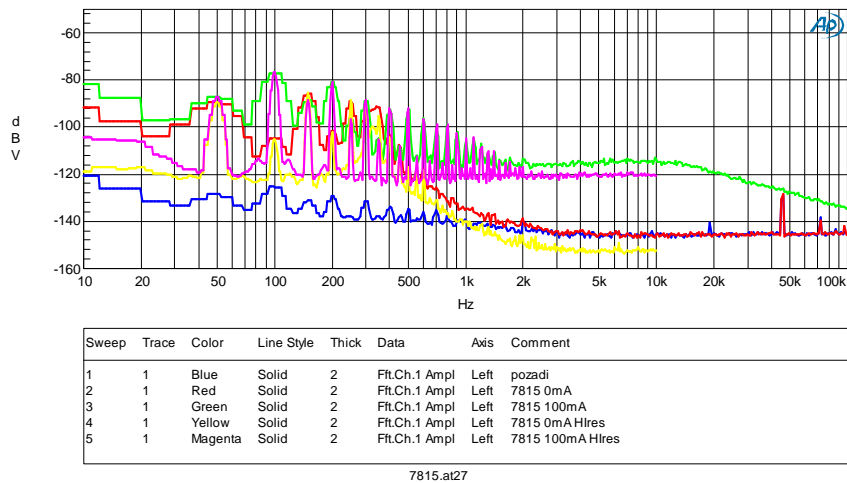
05/16/12 20:18:28



(a) Stabilizátor 7805

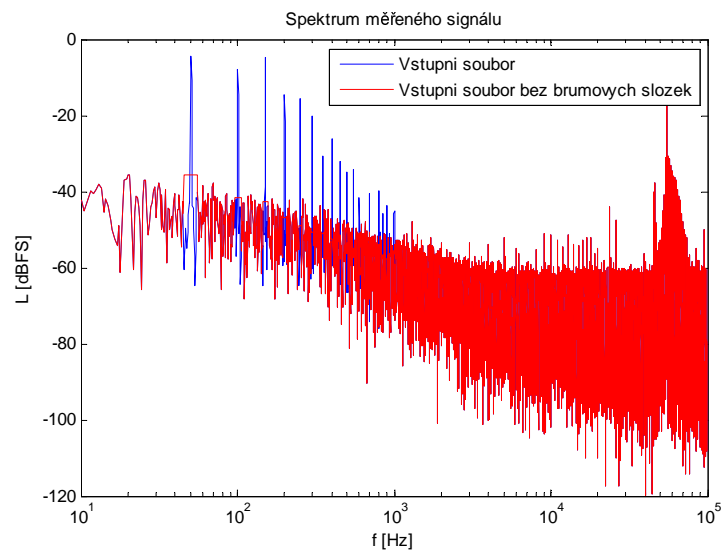
Audio Precision

05/17/12 12:23:53

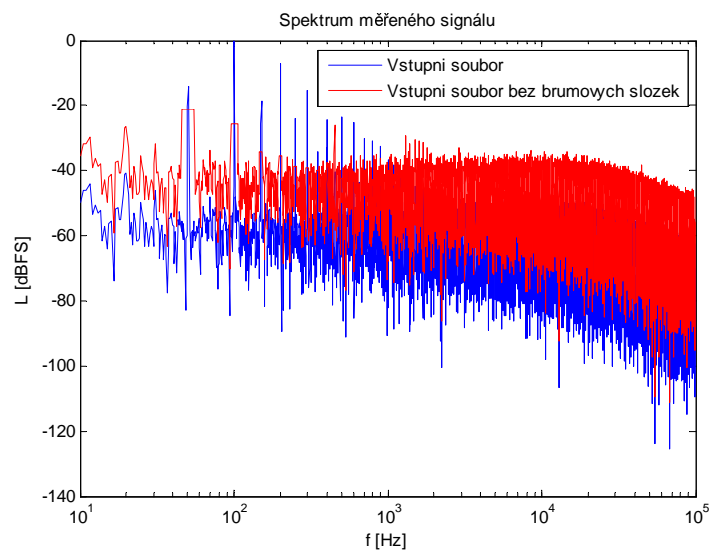


(b) Stabilizátor 7815

Obr. C.1: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7805 (a) a 7815 (b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA



(a) Stabilizátor 7805 se zatěžovacím proudem 0 mA

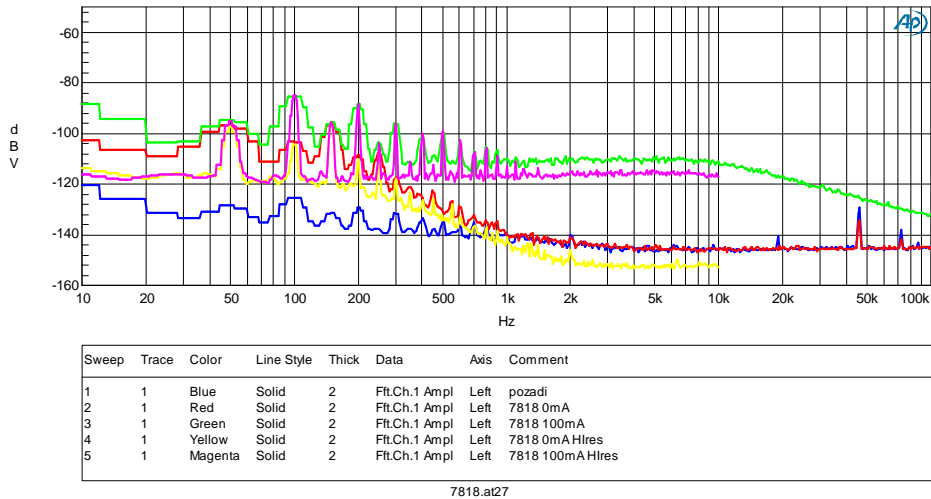


(b) Stabilizátor 7805 se zatěžovacím proudem 100 mA

Obr. C.2: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7805 s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu

Audio Precision

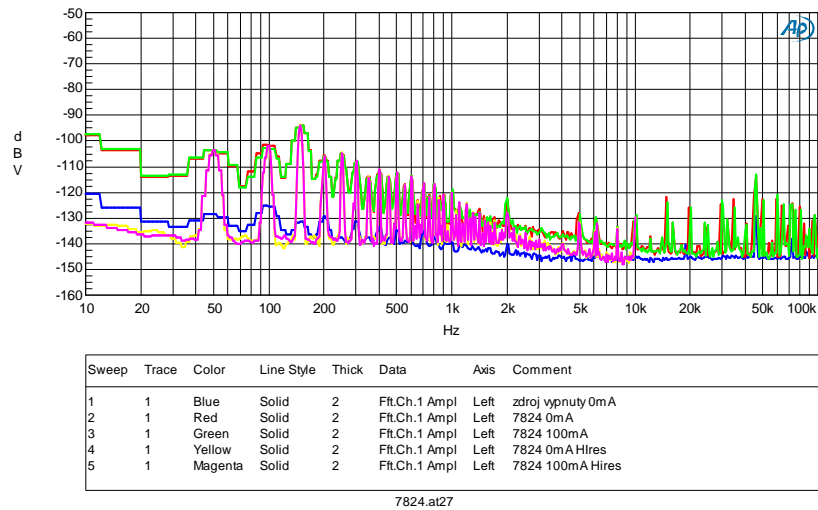
05/17/12 12:23:06



(a) Stabilizátor 7818

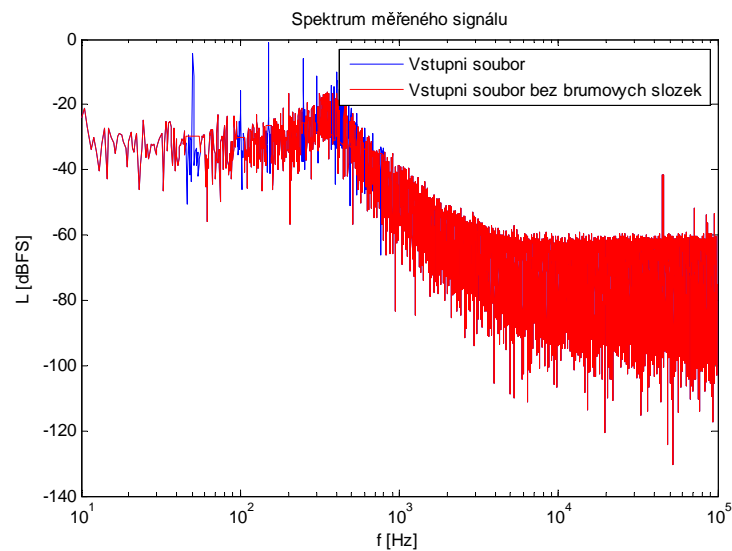
Audio Precision

05/17/12 14:08:20

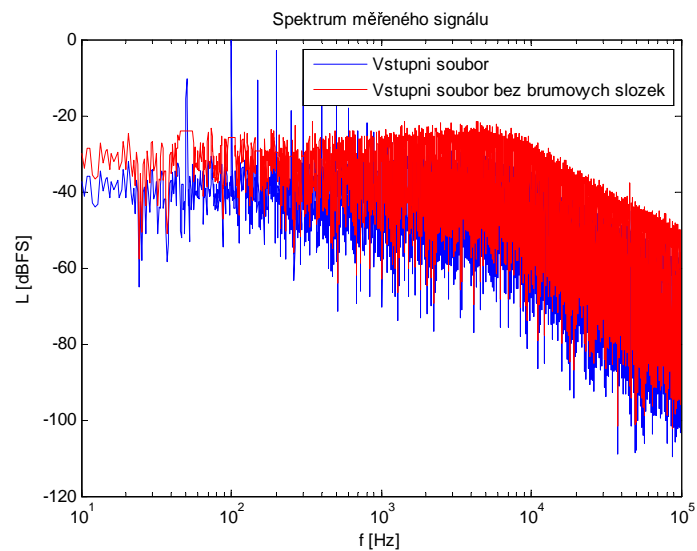


(b) Stabilizátor 7824

Obr. C.3: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7818(a) a 7824(b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA



(a) Stabilizátor 7824 se zatěžovacím proudem 0 mA

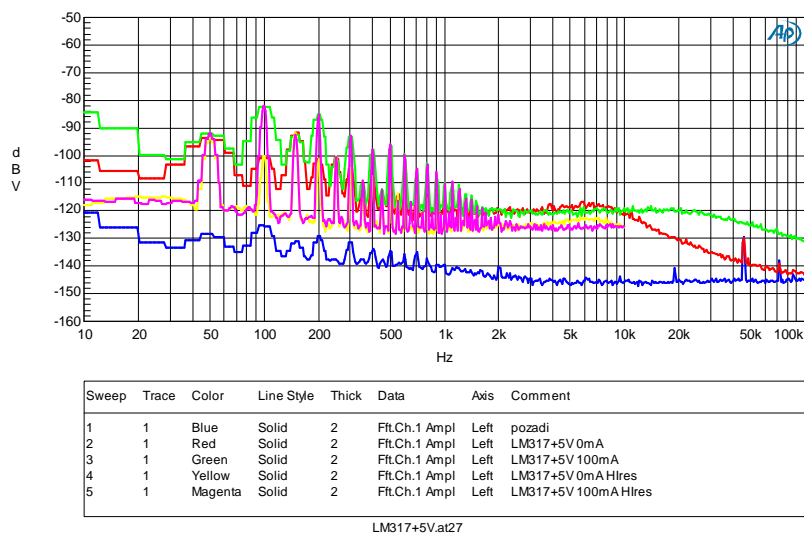


(b) Stabilizátor 7824 se zatěžovacím proudem 100 mA

Obr. C.4: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7824 s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu

Audio Precision

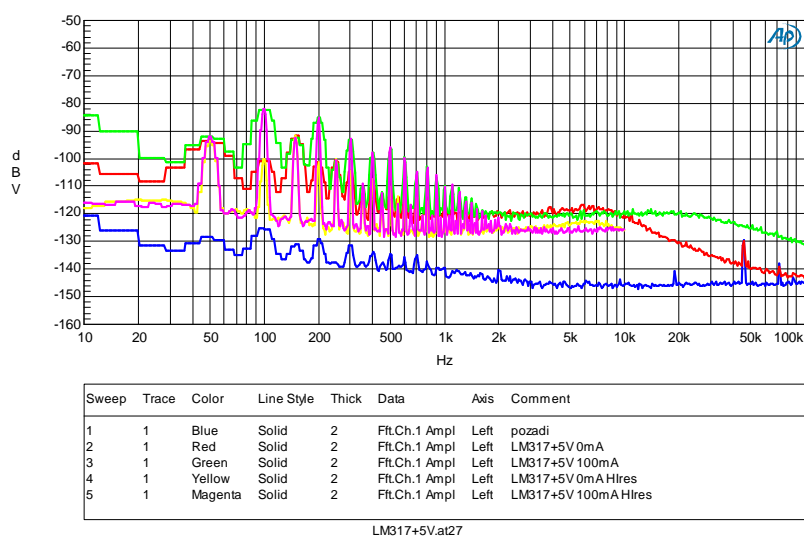
05/17/12 12:22:14



(a) Stabilizátor LM317 +5 V

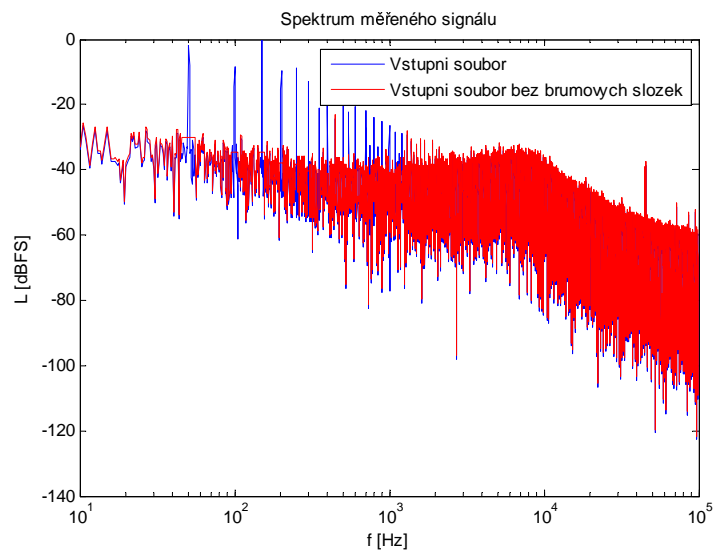
Audio Precision

05/17/12 12:22:14

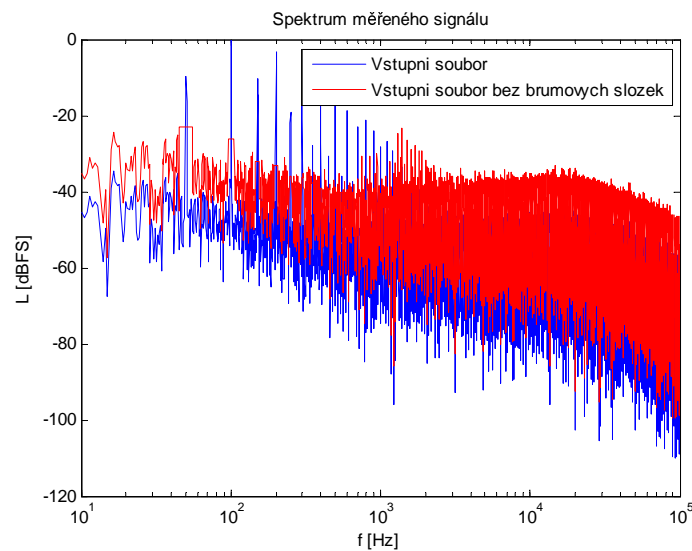


(b) Stabilizátor LM317 +15 V

Obr. C.5: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +5 V (a) a LM317 s výstupním napětím +15 V (b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA



(a) Stabilizátor LM317 +5 V se zatěžovacím proudem 0 mA

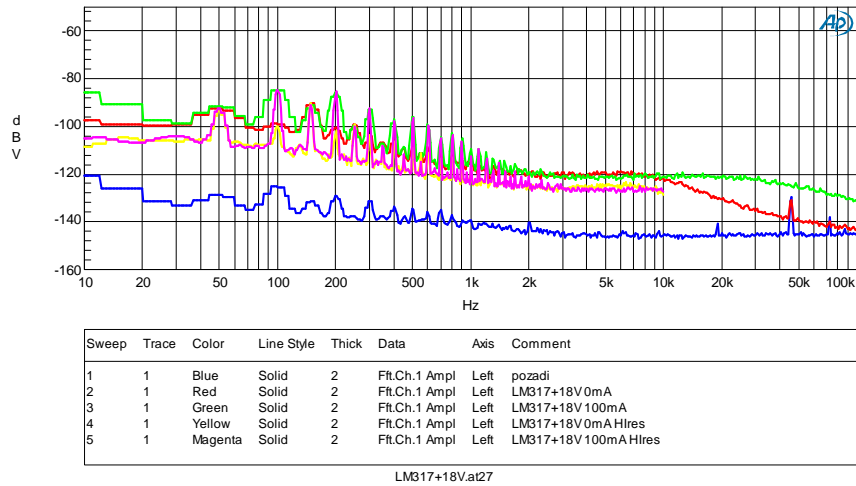


(b) Stabilizátor LM317 +5 V se zatěžovacím proudem 100 mA

Obr. C.6: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +5 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu

Audio Precision

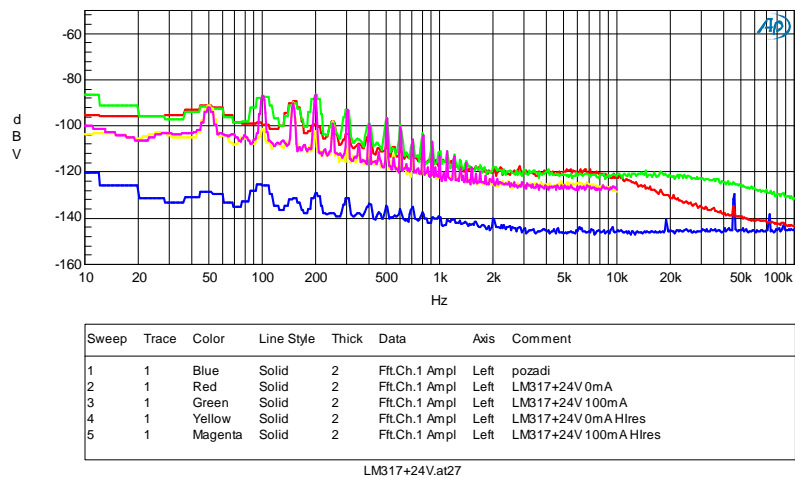
05/16/12 23:10:24



(a) Stabilizátor LM317 +18 V

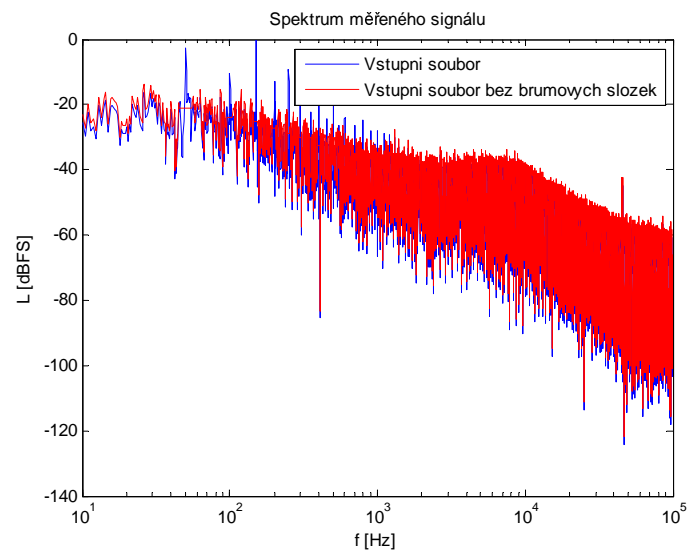
Audio Precision

05/16/12 23:11:13

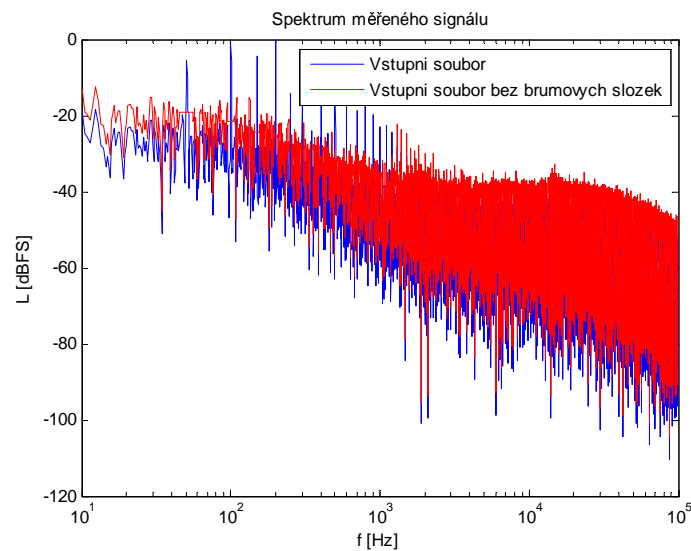


(b) Stabilizátor LM317 +24 V

Obr. C.7: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +18 V (a) a LM317 s výstupním napětím +24 V (b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA



(a) Stabilizátor LM317 +24 V se zatěžovacím proudem 0 mA

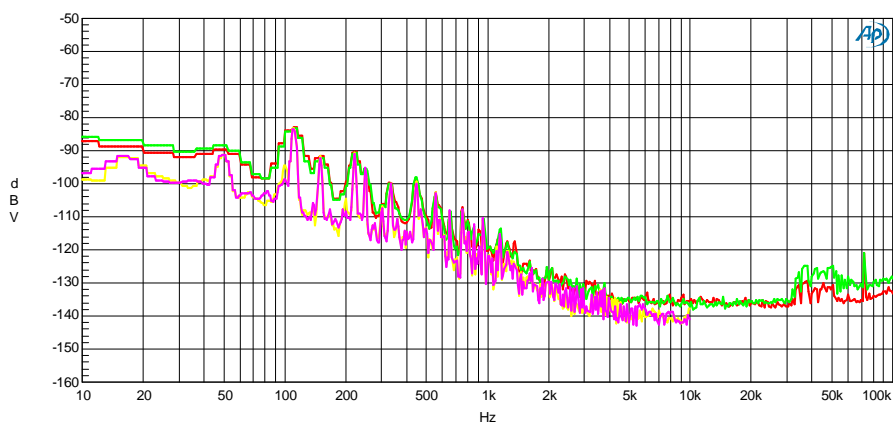


(b) Stabilizátor LM317 +24 V se zatěžovacím proudem 100 mA

Obr. C.8: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM317 s výstupním napětím +24 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu

Audio Precision

05/16/12 21:06:36



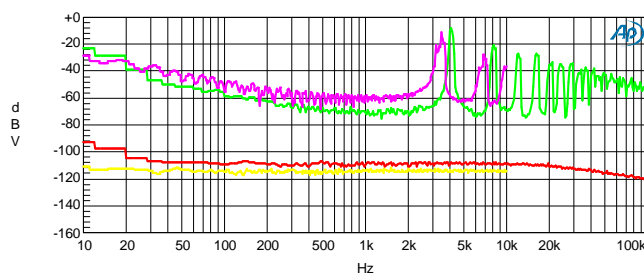
Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment
2	1	Red	Solid	2	Ft.Ch.1 Ampl	Left	LT1962 0mA
3	1	Green	Solid	2	Ft.Ch.1 Ampl	Left	LT1962 100mA
4	1	Yellow	Solid	2	Ft.Ch.1 Ampl	Left	LT1962 0mA Hires
5	1	Magenta	Solid	2	Ft.Ch.1 Ampl	Left	LT1962 100mA Hires

LT1962+5V.ai27

(a) Stabilizátor LT1962 +5 V

Audio Precision

05/16/12 21:10:40



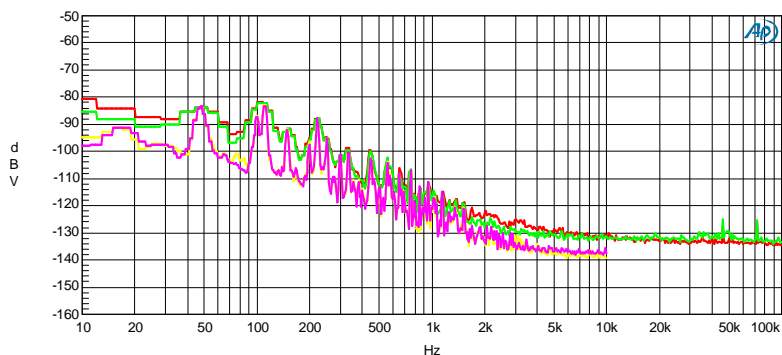
Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment
2	1	Red	Solid	2	Ft.Ch.1 Ampl	Left	LT1965+15V 0mA
3	1	Green	Solid	2	Ft.Ch.1 Ampl	Left	LT1965+15V 100mA
4	1	Yellow	Solid	2	Ft.Ch.1 Ampl	Left	LT1965+15V 0mA Hires
5	1	Magenta	Solid	2	Ft.Ch.1 Ampl	Left	LT1965+15V 100mA Hires

LT1965+15V.ai27

(b) Stabilizátor LT1965 +15 V

Audio Precision

05/16/12 21:12:48

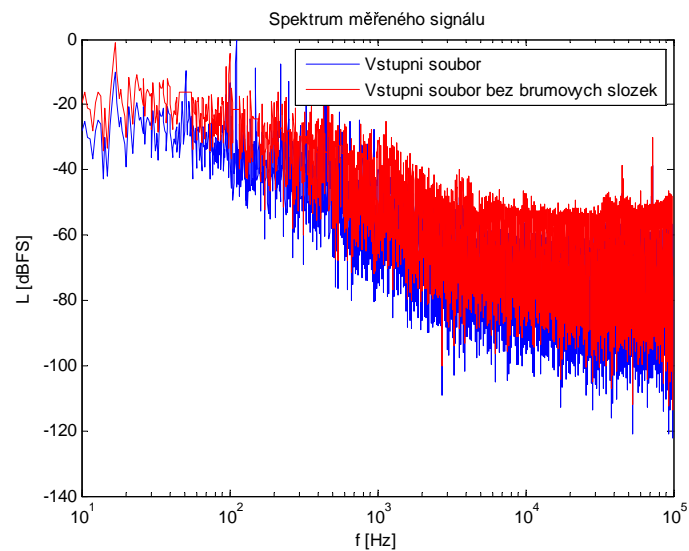


Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment
2	1	Red	Solid	2	Ft.Ch.1 Ampl	Left	TPS7A4901+24V 0mA
3	1	Green	Solid	2	Ft.Ch.1 Ampl	Left	TPS7A4901+24V 100mA
4	1	Yellow	Solid	2	Ft.Ch.1 Ampl	Left	TPS7A4901+24V 0mA Hires
5	1	Magenta	Solid	2	Ft.Ch.1 Ampl	Left	TPS7A4901+24V 100mA Hires

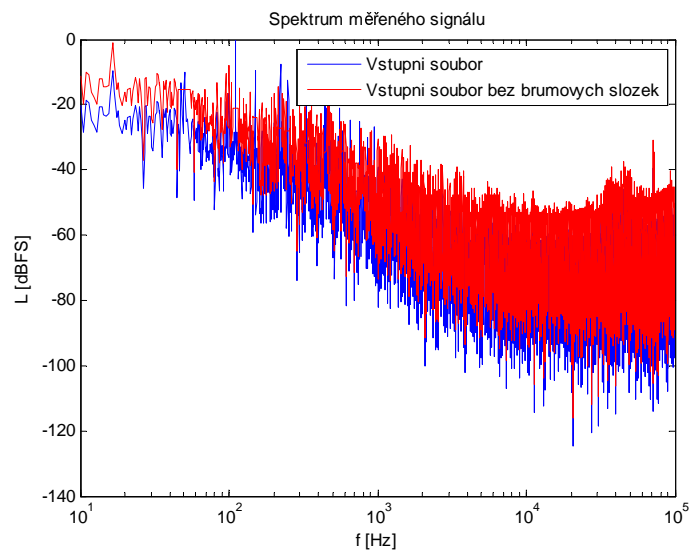
TPS7A4901+24V.ai27

(c) Stabilizátor TPS7A4901 +24 V

Obr. C.9: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím +5 V (a) a LT1965 s výstupním napětím +15 V (b) a TPS7A4901 s výstupním napětím +24 V (c) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA

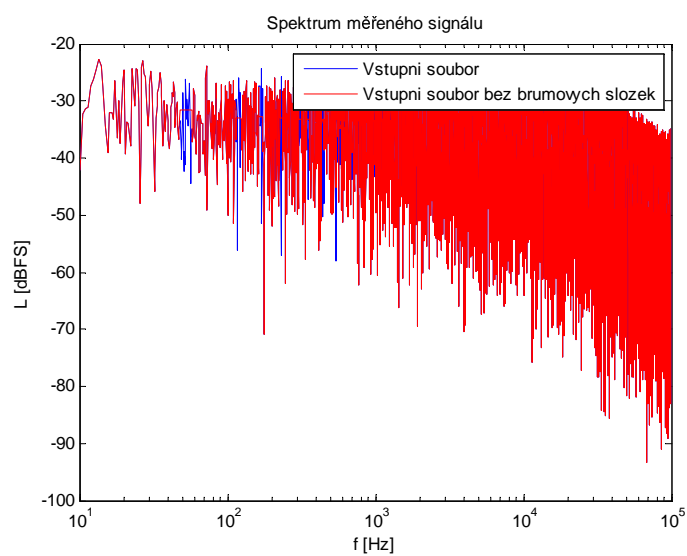


(a) Stabilizátor LT1962 +5 V se zatěžovacím proudem 0 mA



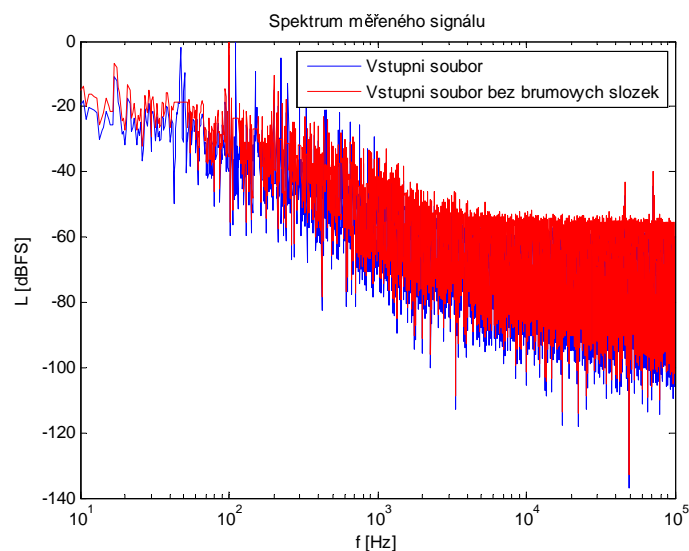
(b) Stabilizátor LT1962 +5 V se zatěžovacím proudem 100 mA

Obr. C.10: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LT1962 s výstupním napětím +5 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu

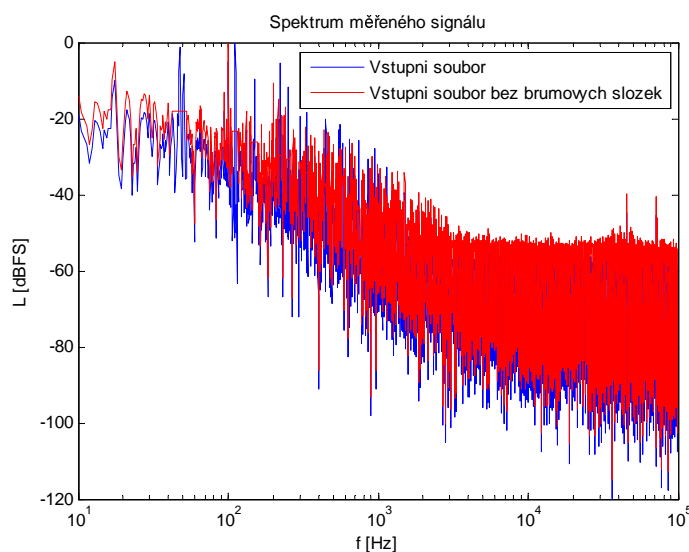


(a) Stabilizátor LT1965 +15 V se zatěžovacím proudem 0 mA

Obr. C.11: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LT1965 s výstupním napětím +15 V a s proudovým zatížením 0 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu



(a) Stabilizátor TPS7A4901 +24 V se zatěžovacím proudem 0 mA

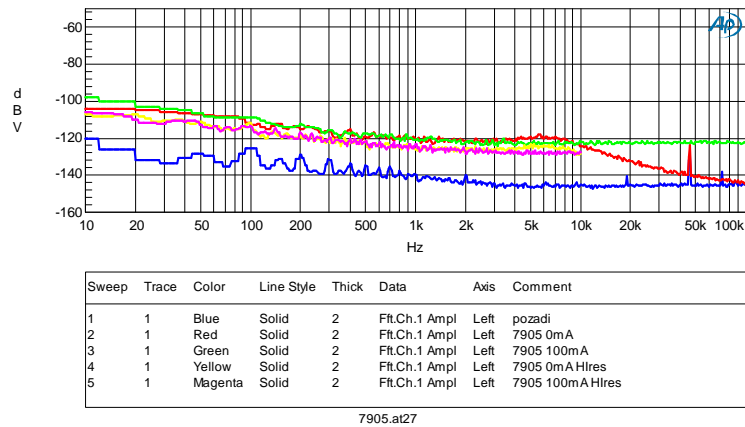


(b) Stabilizátor TPS7A4901 +24 V se zatěžovacím proudem 100 mA

Obr. C.12: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru TPS7A4901 s výstupním napětím +24 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu

Audio Precision

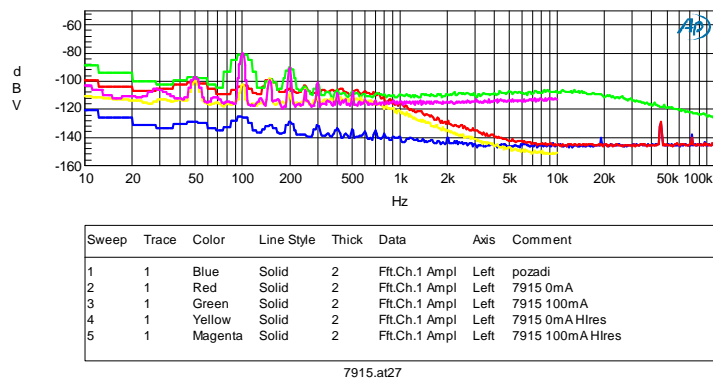
05/16/12 20:47:31



(a) Stabilizátor 7905

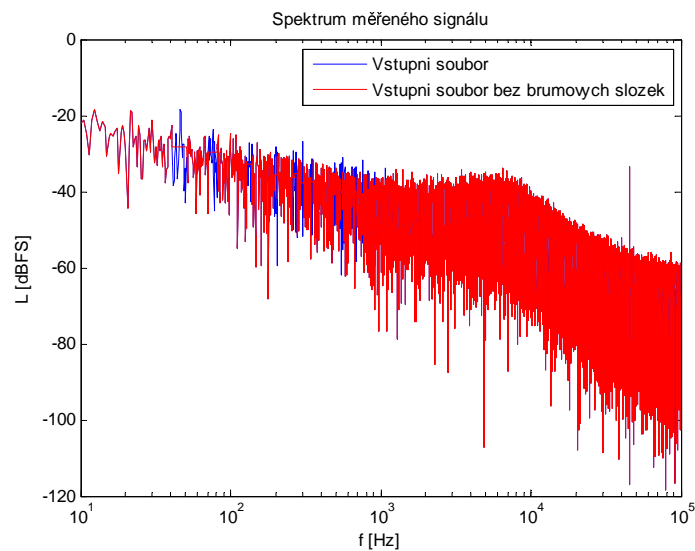
Audio Precision

05/16/12 20:48:47

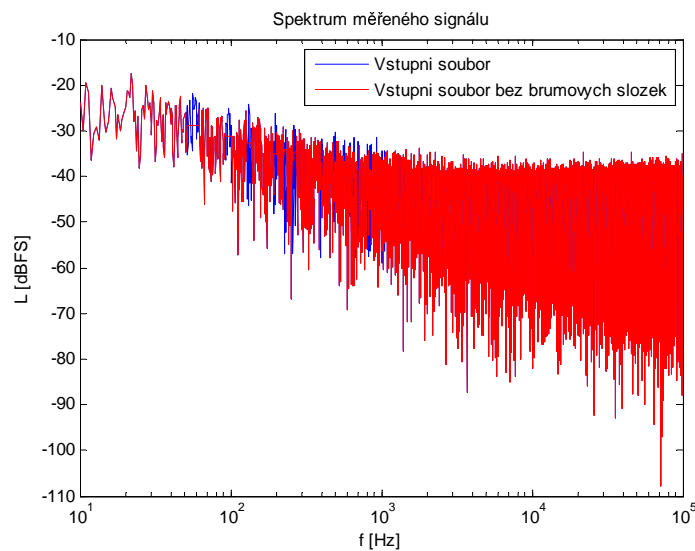


(b) Stabilizátor 7915

Obr. C.13: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7905 (a) a 7915 (b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA



(a) Stabilizátor 7905 se zatěžovacím proudem 0 mA

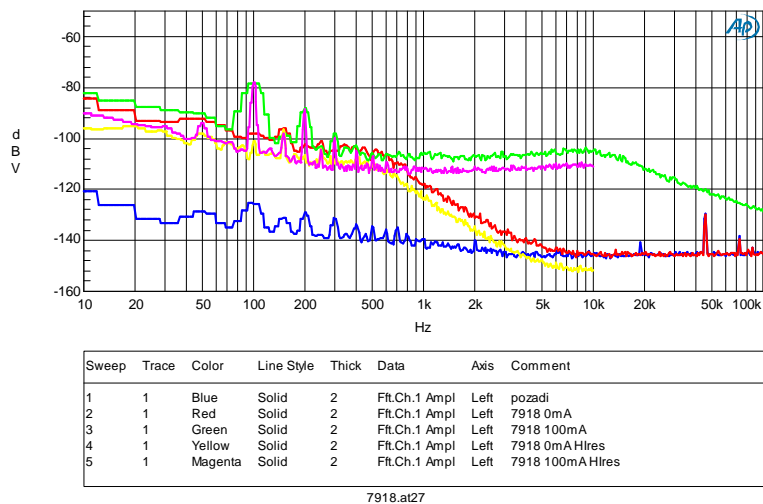


(b) Stabilizátor 7905 se zatěžovacím proudem 100 mA

Obr. C.14: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7905 s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu

Audio Precision

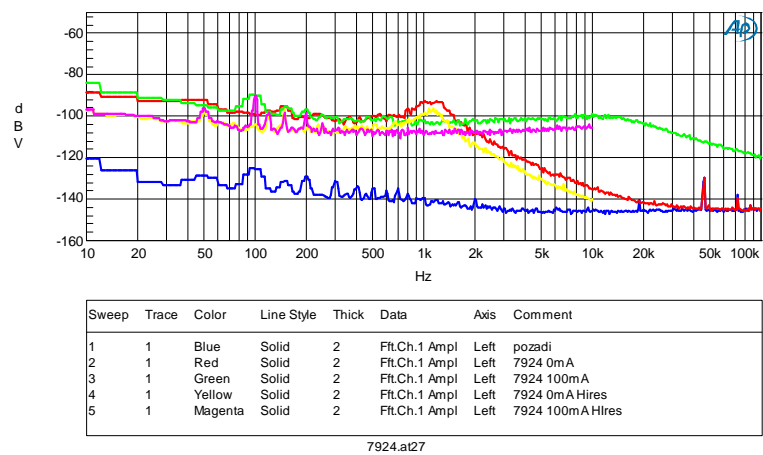
05/16/12 20:50:09



(a) Stabilizátor 7918

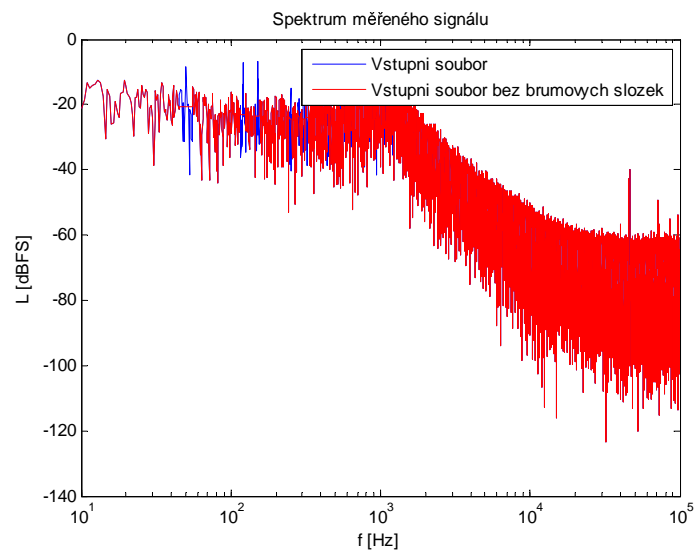
Audio Precision

05/16/12 20:54:26

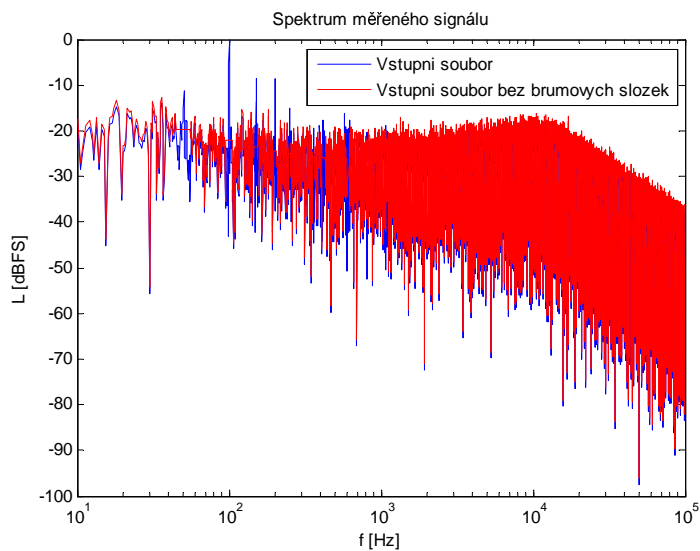


(b) Stabilizátor 7924

Obr. C.15: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7918 (a) a 7924 (b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA



(a) Stabilizátor 7924 se zatěžovacím proudem 0 mA

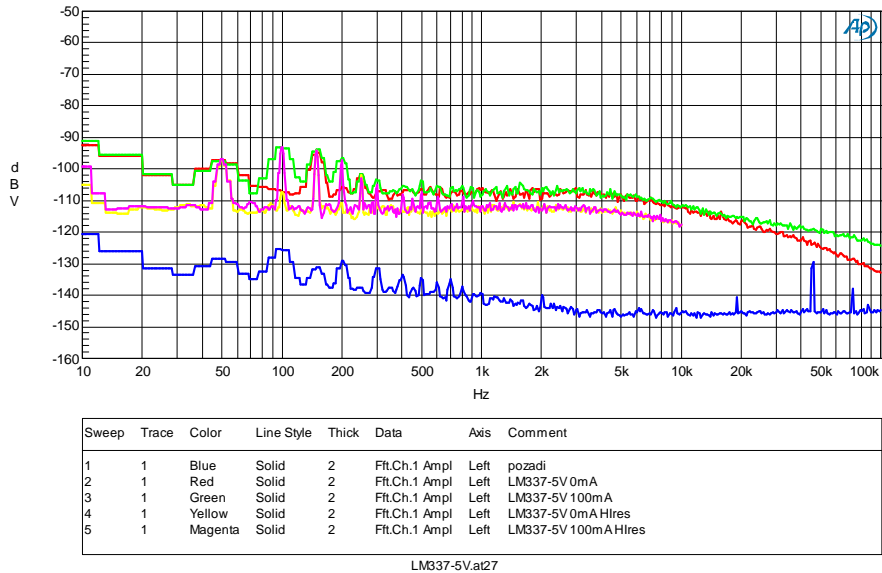


(b) Stabilizátor 7924 se zatěžovacím proudem 100 mA

Obr. C.16: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru 7924 s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu

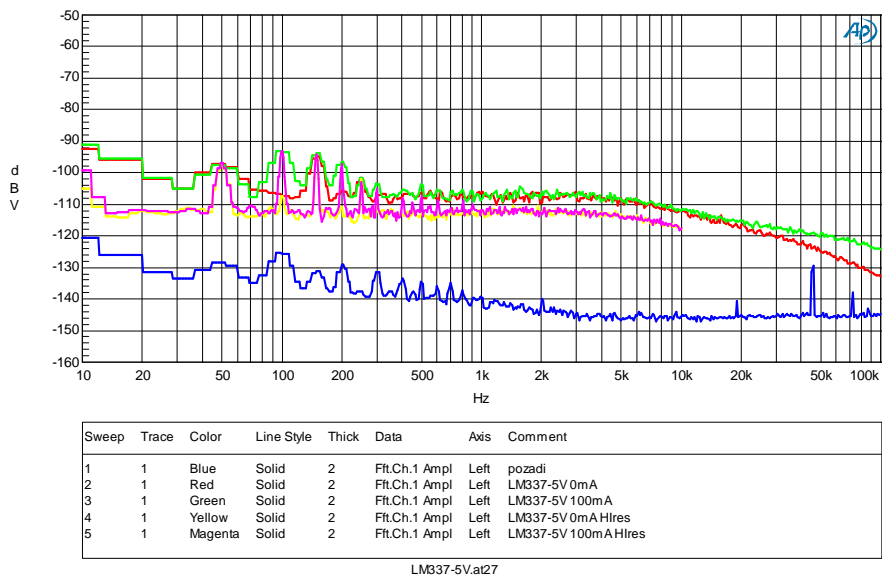
Audio Precision

05/16/12 21:00:04

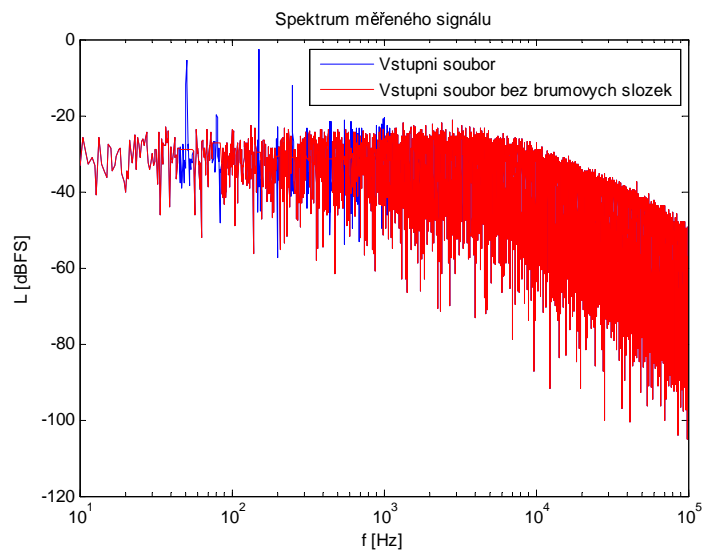
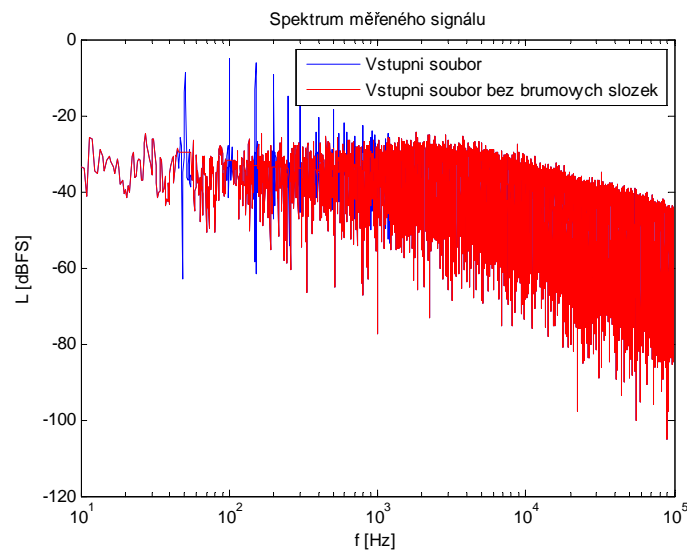
(a) Stabilizátor LM337 -5 V

Audio Precision

05/16/12 21:00:04

(b) Stabilizátor LM337 -15 V

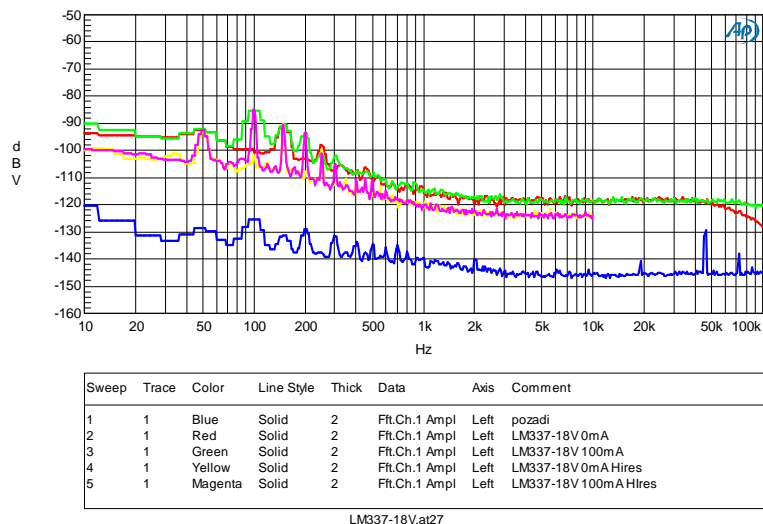
Obr. C.17: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -5 V (a) a LM337 s výstupním napětím -15 V (b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA

(a) Stabilizátor LM337 -5 V se zatěžovacím proudem 0 mA (b) Stabilizátor LM337 -5 V se zatěžovacím proudem 100 mA

Obr. C.18: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -5 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu

Audio Precision

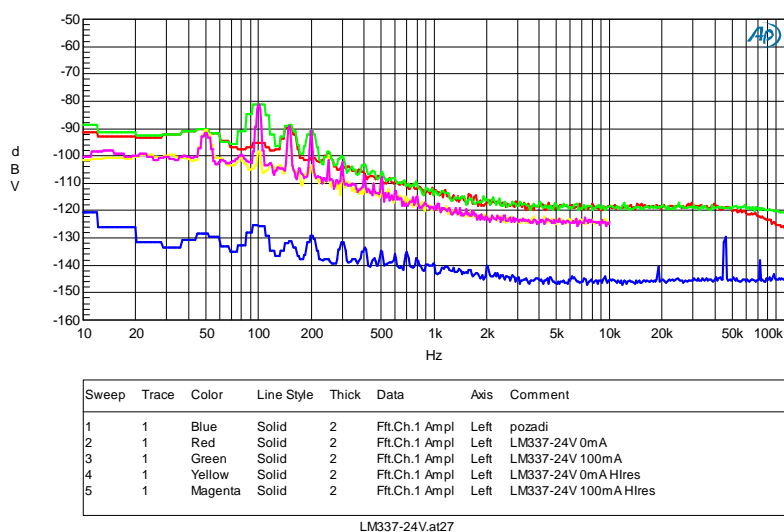
05/16/12 21:02:04



(a) Stabilizátor LM337 -18 V

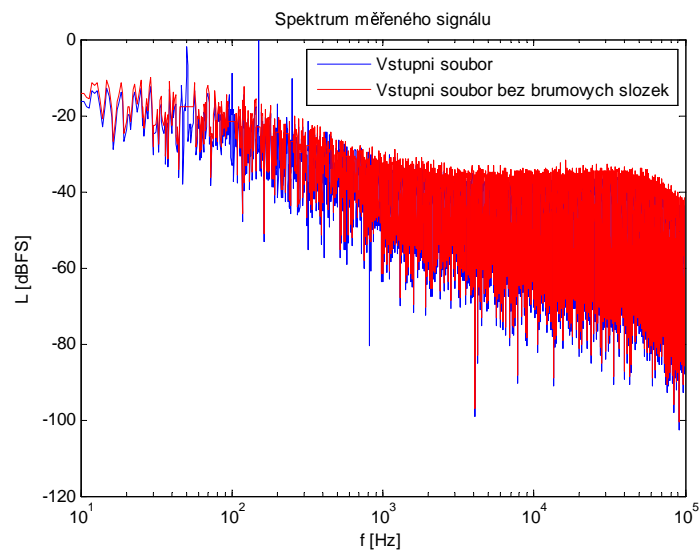
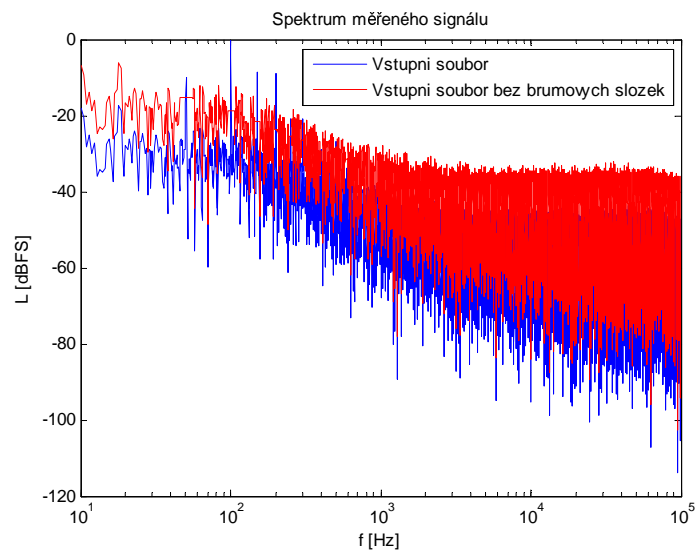
Audio Precision

05/16/12 21:03:02



(b) Stabilizátor LM337 -24 V

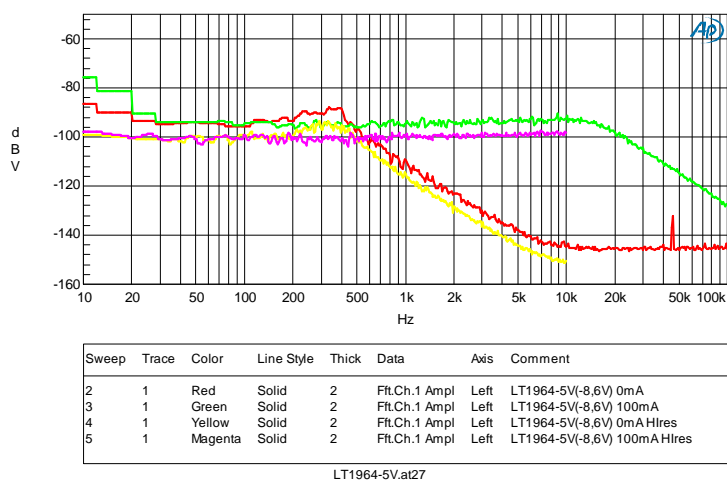
Obr. C.19: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -18 V (a) a LM337 s výstupním napětím -24 V (b) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA

(a) Stabilizátor LM337 -24 V se zatěžovacím proudem 0 mA(b) Stabilizátor LM337 -24 V se zatěžovacím proudem 100 mA

Obr. C.20: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LM337 s výstupním napětím -24 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu

Audio Precision

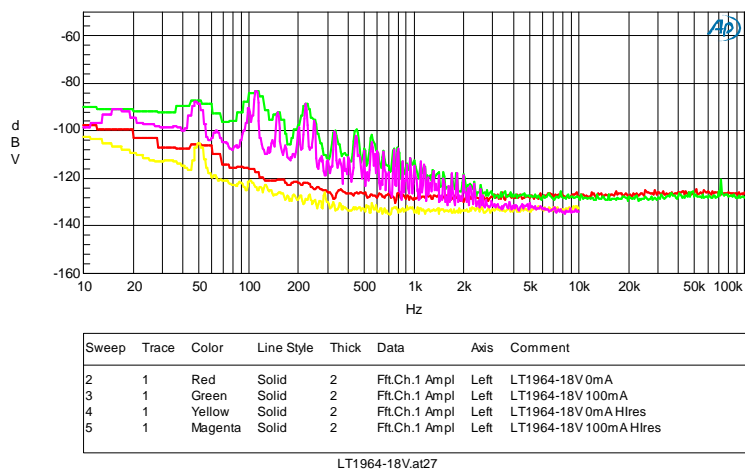
05/16/12 21:08:18



(a) Stabilizátor LT1964 -8,6 V

Audio Precision

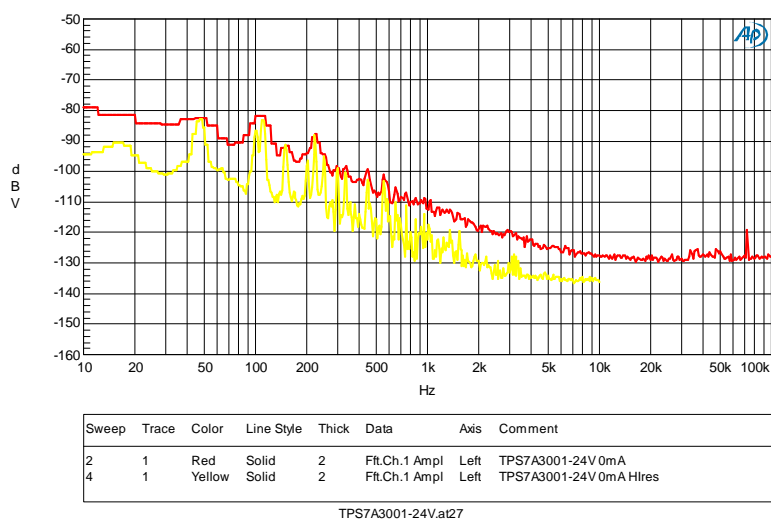
05/16/12 21:09:33



(b) Stabilizátor LT1964 -18 V

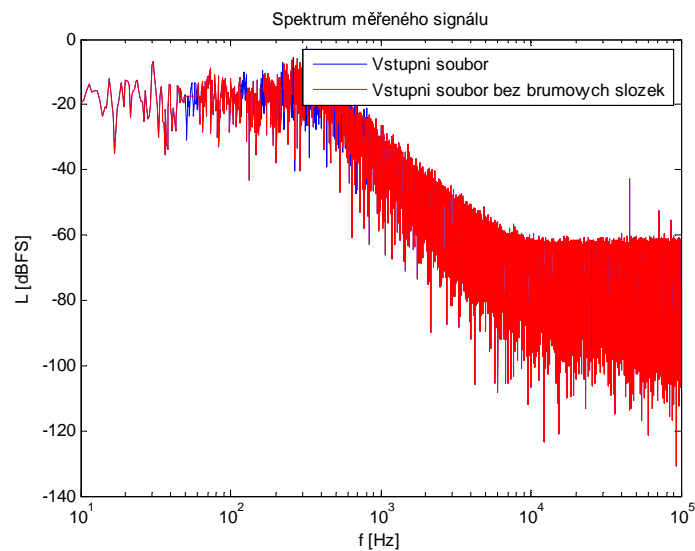
Audio Precision

05/16/12 21:11:47

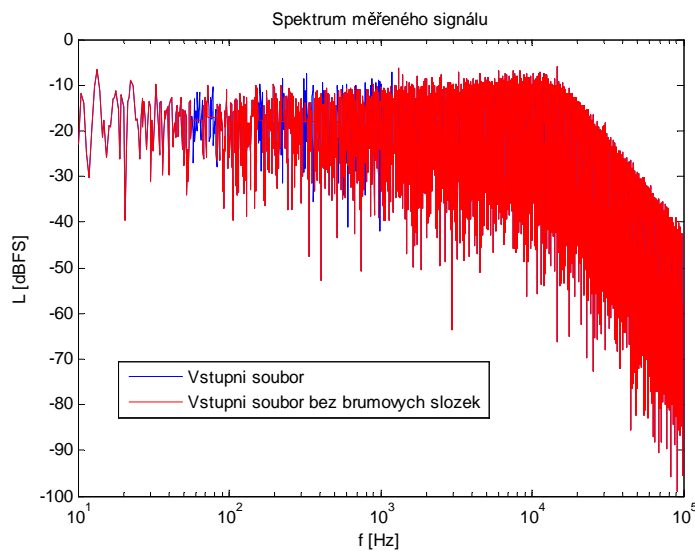


(c) Stabilizátor TSP7A3001 -24 V

Obr. C.21: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LT1964 s výstupním napětím -8,6 V (a) a LT1964 s výstupním napětím -18 V (b) a TPS7A3001 s výstupním napětím -24 V (c) s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA

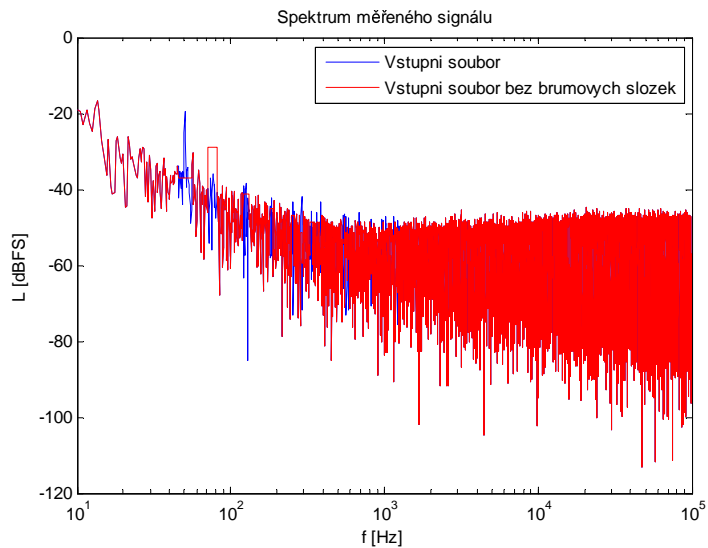


(a) Stabilizátor LT1964 –8,6 V se zatěžovacím proudem 0 mA

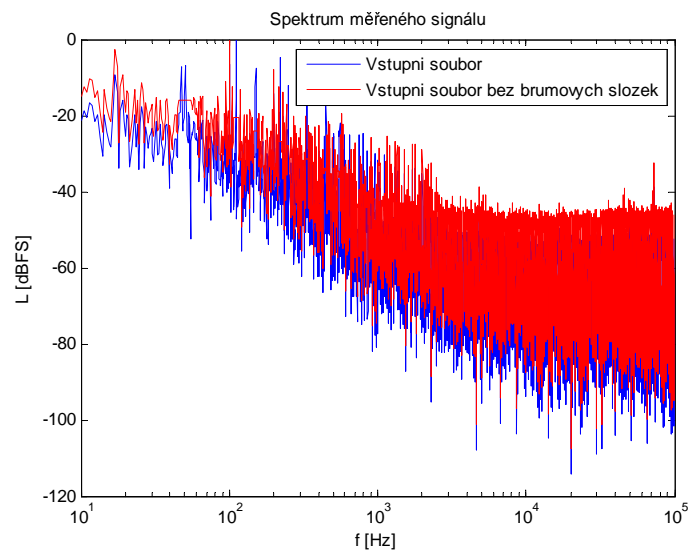


(b) Stabilizátor LT1964 –8,6 V se zatěžovacím proudem 100 mA

Obr. C.22: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LT1964 s výstupním napětím –8,6 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu

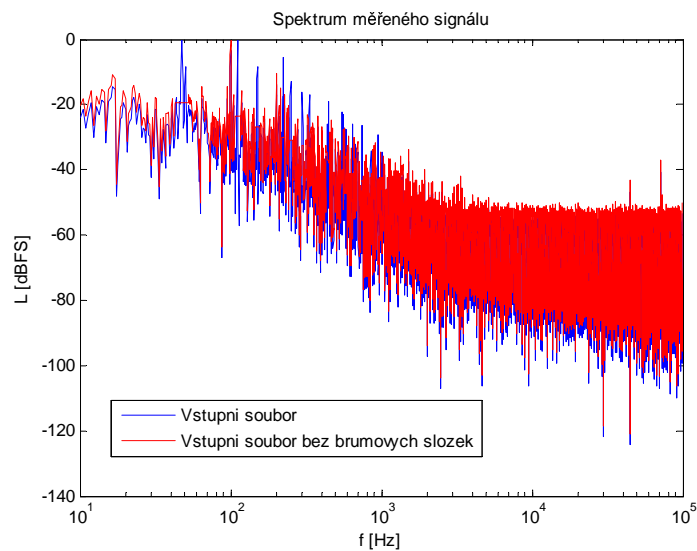


(a) Stabilizátor LT1964 –18 V se zatěžovacím proudem 0 mA

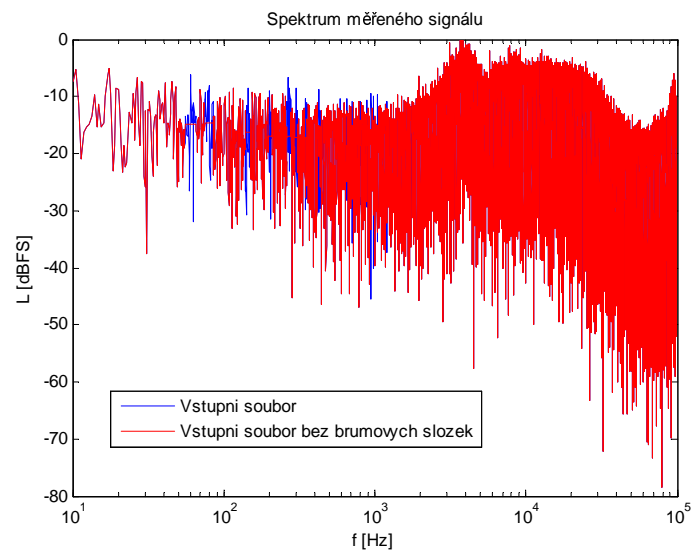


(b) Stabilizátor LT1964 –18 V se zatěžovacím proudem 100 mA

Obr. C.23: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru LT1964 s výstupním napětím –18 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu



(a) Stabilizátor TPS7A3001 -24 V se zatěžovacím proudem 0 mA



(b) Stabilizátor TPS7A3001 -24 V se zatěžovacím proudem 100 mA

Obr. C.24: Frekvenční spektrum průběhu šumového napětí lineárního stabilizátoru TPS7A3001 s výstupním napětím -24 V a s proudovým zatížením 0 mA a 100 mA s aktivací potlačení 20-ti harmonických násobků síťového kmitočtu

Příloha D

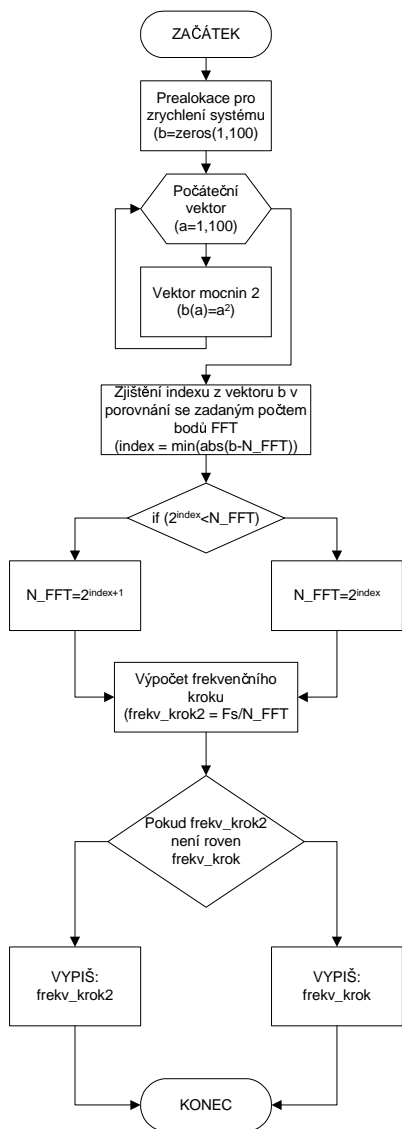
Vývojové diagramy kódu pro
automatizované měření zvlnění,
brumových a šumových složek

POPIS PROMĚNNÝCH:

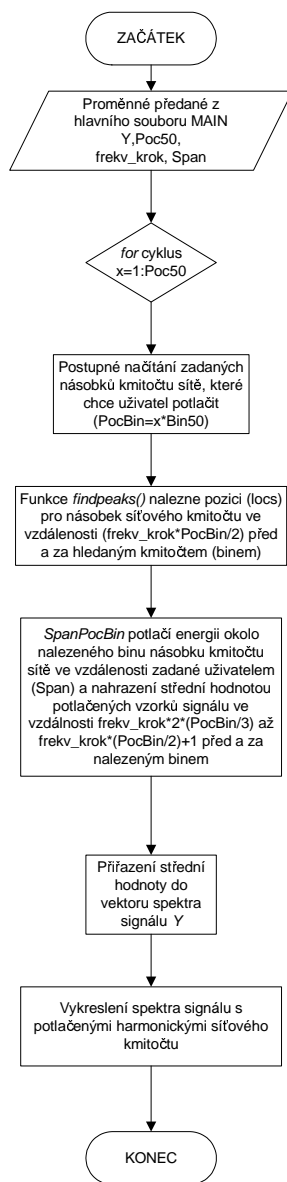
Y – vektor FFT měřeného souboru
 Poc50 - počet harmonických síťového kmitočtu určených k odfiltrování
 frekv_krok - frekvenční krok
 Span – rozsah energie jednotlivých frekvenčních složek

POPIS PROMĚNNÝCH:

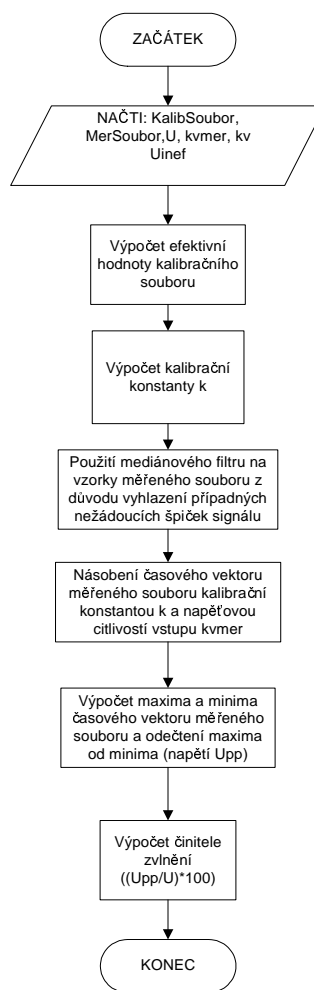
KalibSoubor - kalibrační soubor
 MerSoubor - měřený soubor
 U – velikost výstupního stabilizovaného napětí
 kvmer - napěťová citlivost vstupu měřeného souboru
 kv - napěťová citlivost vstupu kalibračního souboru
 Uinef - efektivní hodnota vstupního napětí kalibračního souboru



(a) Výpočet frekvenčního kroku



(b) Potlačení násobku kmitočtu sítě

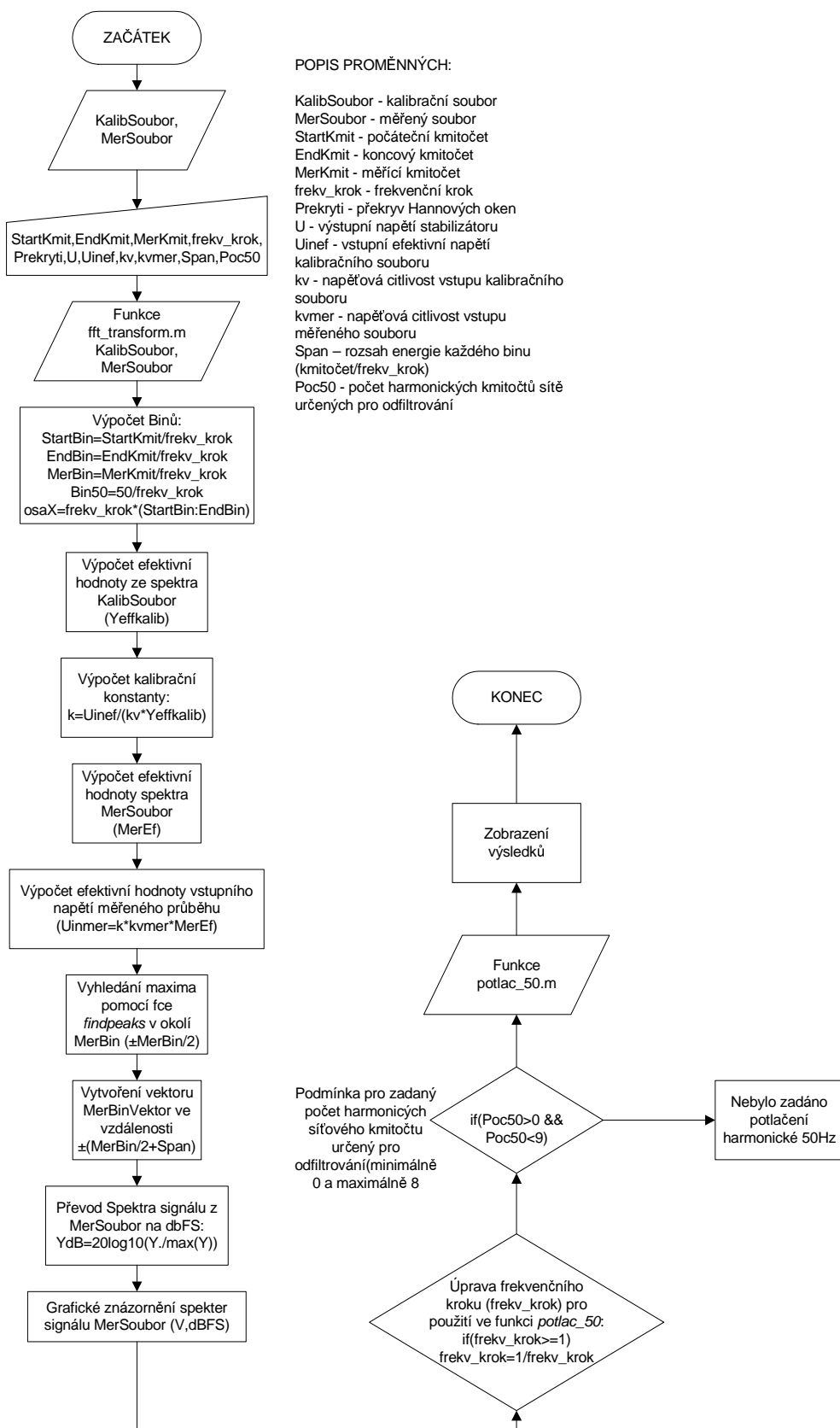


(c) Výpočet činitele zvlnění

Obr. D.1: Vývojový diagram kódu pro výpočet frekvenčního kroku a potlačení násobku síťového kmitočtu a výpočet činitele zvlnění



Obr. D.2: Vývojový diagram kódu pro výpočet FFT se zadaným překryvem



Obr. D.3: Vývojový diagram hlavního souboru MAIN

Příloha E

Automatický výpočet parametrů

E.1 Funkce f_krok.m

```
1 function [N_FFT, frekv_krok] = f_krok(N_FFT, Fs, frekv_krok)
2
3
4 b = zeros(1,100);    %prealokace pro zrychlení systému
5
6     for a = 1:100
7
8         b(a) = power(2,a);
9 %vektor mocnin 2 pro porovnání zadaného počtu vzorků FFT přes frekvenční
10 %krok
11     end
12
13     [~, index] = min(abs(b - N_FFT));    %zjištění indexu z vektoru b
14
15     if (power(2, index)<N_FFT)            %pokud je 2^index<N_FFT
16         N_FFT = power(2, (index+1));    %vypíše o index vyšší
17     else
18         N_FFT = power(2, index);        %jinak vypíše s aktuálním indexem
19     end
20
21
22
23     frekv_krok2 = Fs/N_FFT;              %výpočet nového frekvenčního kroku
24
25     if (frekv_krok2 ~= frekv_krok)%podm. vypsání změny ve frekvenčním kroku
26         disp('Zvoleny frekvencni krok je:')
27         disp(frekv_krok2)
28         frekv_krok = frekv_krok2;
29
30     else                                  %jinak vypíše původní
31         disp('Zvoleny frekvencni krok je:')
32         disp(frekv_krok)
33
34     end
35 end
```

E.2 Funkce cin_zvl.m

```
1 function [top,bot,M,cinitel_zvl] = cin_zvl(KalibSoubor,MerSoubor,U,kvmer,kv,Uinef)
2 [Y] = wavread(MerSoubor);
3 [X] = wavread(KalibSoubor);
4
5 Xmean = sqrt(sum(X.^2)/length(X));    %efektivní hodnota kalibračního souboru
6
7 k~= (Uinef/(kv.*Xmean));    %výpočet kalibrační konstanty z kalibračního souboru
8
```

```

9 M=medfilt1(Y);           %mediánový filtr
10
11 %-----Normování koeficientů a zohlednění Umax-----
12
13 % konstanta 1.01154 reprezentuje útlum vazebního členu
14
15
16 %-----Nalezení maximální a minimální hodnoty časového průběhu-----
17 M=kvmer*M*k;           %přenosení časového vektoru pro získání reálných naměřených hodnot
18
19
20 top = max(M);           %maximální hodnota časového průběhu
21 bot = min(M);           %minimální hodnota časového průběhu
22
23 Upp = (top-bot);        %napětí peak-peak
24
25
26 cinitel_zvl = (Upp/U)*100; %činitel zvlnění v %.
27 end

```

E.3 Funkce fft_transform.m

```

1 function [P, Fs, Nyquist, N_FFT, frekv_krok] = fft_transform(Soub, frekv_krok, Prekryti)
2
3 [y, Fs] = wavread(Soub);
4 %y = jednotlivé vzorky
5 %Fs = vzorkovací frekvence wav souboru
6
7
8
9 N_FFT = Fs/frekv_krok;   %počet vzorků FFT
10
11
12 %----Přiřazení počtu vzorků FFT k mocnině 2, prepocet frekvencniho kroku---
13 [N_FFT, frekv_krok] = f_krok(N_FFT, Fs, frekv_krok);
14
15
16 %-----Překryv oken-----
17
18 prekryv = Prekryti/100; %překryv pro další vypocty
19 prekryv2 = length(N_FFT)*prekryv;%normovani překryvu vůči zadane velikosti okna
20
21 w = hann(N_FFT);        %výpočet HANNOVA okna
22 N_WAV = length(y);      %počet vzorků souboru
23 konst = 0.8165;        %konstanta pro korekci energie při použití Hannova okna
24
25
26 if(prekryv>1 || prekryv<0)
27     disp('CHYBA: Zadejte prekryv od 0 do 100%!!')
28     return
29
30 %-----Výpočet spektra signálu pro překryv 0%-----
31 else if(prekryv == 0)   %pokud je překryv 0%
32
33
34
35         for u=1:N_FFT:N_WAV           %rozdeleni N_WAV po velikostech okna
36
37             if(u+N_FFT-1<=N_WAV)     %oříznutí počtu vzorků souboru podle násobku velikosti okna
38
39
40                 z~= w.*y(u:u+N_FFT-1);           %přiřazení vektoru délky N a přenosení Hannovým oknem
41                 Y = fft(z,N_FFT);               %FFT transformace
42                 Y = Y*konst;                     %přenosení opravnou konstantou pro Hannovo okno
43                 Nyquist = ceil((length(Y))/2);   %zkrácení vektoru na polovinu (snažší manipulace)
44                 Y = Y(1:Nyquist);               %symetrie (N_FFT/2)
45                 Y = abs(Y);                       %absolutní hodnoty spektra
46                 Y = (Y(1:Nyquist)).*2;         %násobení prvků 2ma (zamezení redukce energie ve spektru)
47
48                 if Y(1)

```

```

49         P = Y;                                     %při prvním průběhu for cyklu přiřad FFT spektrum do vektoru P
50
51     else
52         P = (P + Y)./2;                             %průměrování aktuálního vektoru s předchozím vektorem
53     end
54 end
55 end
56
57
58 else if(prekryv == 1)                               %zvolený překryv 100%
59
60     z~= y(1:N_WAV).*w;                               %pokud je překryv 1 počítej pouze pro první okno
61     Y = fft(z,N_FFT);                               %FFT transformace
62     Y = Y*konst;                                     %přenásobení opravnou konstantou pro Hannovo okno
63     Nyquist = ceil((length(Y))/2);                 %zkrácení vektoru na polovinu (snažší manipulace)
64     Y = Y(1:Nyquist);                               %symetrie
65     Y = abs(Y);                                     %absolutní hodnoty spektra
66     P = (Y(1:Nyquist)).*2;                          %násobení prvků 2ma (zamezení redukce energie ve spektru)
67
68
69
70
71 %-----Překryv oken kromě 0 a 100%-----
72     else
73
74
75         krok = N_FFT - N_FFT*prekryv2;             %krok
76         offset = 1:krok:length(y)-N_FFT;           %offset vypočtený z velikosti kroku a počtu bodu FFT
77
78         z~= zeros(N_FFT, length(offset));           %prealokace
79
80         for i=1:length(offset)
81             z(1:N_FFT,i) = y(offset(i):offset(i)+N_FFT-1).*w;
82
83             Y = fft(z(1:N_FFT,i));                   %FFT transformace
84             Y = Y*konst;                             %přenásobení opravnou konstantou pro Hannovo okno
85             Nyquist = ceil((length(Y))/2);           %zkrácení vektoru na polovinu (snažší manipulace)
86             Y = Y(1:Nyquist);                       %symetrie (N_FFT/2)
87             Y = abs(Y);                             %absolutní hodnoty spektra
88             Y = (Y(1:Nyquist)).*2;                  %násobení prvků 2ma (zamezení redukce energie ve spektru)
89
90             if Y(1)
91                 P = Y;                               %při prvním průběhu for cyklu přiřad FFT spektrum do vektoru P
92
93             else
94                 P = (P + Y)./2;                       %průměrování aktuálního vektoru s předchozím vektorem
95             end
96
97         end
98     end
99
100 end
101
102 end
103
104 end
105
106
107 end

```

E.4 Funkce potlac_50.m

```

1 function [Y] = potlac_50(Y, Poc50, Bin50, Span, osaX, StartBin, EndBin, frekv_krok)
2
3     for x = 1:Poc50
4
5         PocBin=x*ceil(Bin50);
6         %načítání postupně zadaného počtu potlačených násobků 50Hz
7         [~,locs]=findpeaks(Y((PocBin-ceil(frekv_krok*PocBin/2)):(PocBin+ceil(frekv_krok*PocBin/2))), 'SORTSTR', 'descend');
8         %zjištění pozice binu 50Hz pomocí funkce findpeaks() ve vzdálenosti

```



```

9         %dané součtem poloviny počítaného binu a frekvenčního kroku
10        %případně jeho převrácené hodnoty
11        SpanPocBin=(PocBin-(ceil(frekv_krok*PocBin/2+1))+locs(1)-Span):(PocBin-(ceil(frekv_krok*PocBin/2+1))+locs(1)+Span)
12        MeanVal=mean([mean(Y(PocBin-ceil(frekv_krok*2*PocBin))+locs(1):PocBin-ceil(frekv_krok*PocBin/2+1)+locs(1))),mean(Y(
13        %potlačení energie okolo 50Hz a nahrazení střední hodnotou (ve
14        %vzdálenosti Span)
15        Y(SpanPocBin)=MeanVal;
16        % přiřazení střední hodnoty před a za násobkem 50Hz binu do průběhu
17        % spektra signálu
18
19
20    end;
21
22
23    %grafické znázornění
24    figure(1)
25    YdB=20*log10(Y/max(Y));
26    semilogx(osaX,YdB(StartBin:EndBin),'r')
27    legend('Vstupni soubor','Vstupni soubor bez brumovych slozek')
28
29 end

```

E.5 Funkce MAIN.m

```

1  clc;
2  clear all;
3  close all;
4  format short;
5
6
7
8  %-----KONSTANTY-----
9  KalibSoubor = 'kalibrace_1kHz_1Vrms_kv1_2V.wav';    %Kalibrační soubor
10 MerSoubor = '7805_0mA_kv40mV.wav';    %Měřený soubor
11
12 StartKmit = 10;    %Počáteční frekvence
13 EndKmit = 100000;    %Koncová frekvence
14 MerKmit = 120;    %Frekvence pro výpočty 120Hz/1000Hz
15
16 frekv_krok = input('Zadejte pozadovany frekvencni krok: [Hz]\n');
17
18 %--Podmínka pro zadání velikosti frekvenčního kroku a počáteční frekvence--
19 if (StartKmit < frekv_krok)
20     disp('CHYBA: Frekvencni krok musi byt mensi nez pocatecni frekvence!!')
21     return
22 end
23
24 Prekryti = input('Zadejte pozadovany prekryv Hannovych oken [%]:\n');
25 %požadovaný překryv Hannových oken v %
26
27 U~ = input('Zadejte velikost efektivni hodnoty stabilizovaneho napeti: [V]\n'); %5;
28 %efektivní napětí stabilizovaného signálu [V]
29
30 Uinef = input('Zadejte hodnotu kalibračního napětí [V]:\n'); %1.415
31 %velikost kalibračního napětí
32
33 kv = input('Zadejte napetovou citlivost vstupu kalibračního souboru:\n');
34 %napětová citlivost vstupu měřícího přístroje při měření KalibSoubor
35
36 kvmer = input('Zadejte napetovou citlivost vstupu měřeného souboru:\n');
37 %napětová citlivost vstupu měřícího přístroje při měření MerSoubor
38
39 Span = input('Zadejte pozadovany rozsah energie kazdeho binu:\n');
40 %rozsah energie každého binu
41
42 Poc50 = input('Zadejte pozadovany pocet potlacenyh nasobku frekvence site (0 - 8):\n'); %8
43 %počet harmonických 50Hz (max 8)
44 if (Poc50 < 0 || Poc50 >8)
45     disp('CHYBA: Pozadovany pocet odstranenyh nasobku site je mimo rozsah (0 - 8)')
46     return

```

```

47 end
48
49
50
51 %-----funkce pro výpis činitele zvlnění-----
52 [top,bot,M,cinitel_zvl] = cin_zvl(KalibSoubor,MerSoubor,U,kvmer,kv,Uinef);
53
54 %-----FFT kalibračního souboru-----
55 [Ykalib] = fft_transform(KalibSoubor, frekv_krok, Prekryti);
56 %FFT transformace kalibračního souboru
57
58 %-----funkce pro vytvoření spektra ze Souboru-----
59 [P, Fs, Nyquist, N_FFT, frekv_krok] = fft_transform(MerSoubor, frekv_krok, Prekryti);
60 % P = koeficienty FFT
61 % Fs = vzorkovací frekvence
62 Y = P; %převedení na proměnnou Y pro další zpracování
63 Y=Y.*1.01154;
64 %konstanta 1.01154 reprezentuje útlum vazebního členu
65
66 %-----Čítání koeficientů-----
67
68 StartBin = (StartKmit/frekv_krok); %koef pro počáteční frekvenci
69 EndBin = (EndKmit/frekv_krok); %koef pro koncovou frekvenci
70 MerBin = MerKmit/frekv_krok; %koef pro frekvenci pro výpočty
71 Bin50 = 50/frekv_krok; %umístění binu 50Hz
72 osaX = frekv_krok.*(StartBin:EndBin); %osa X
73
74
75
76 %-----funkce findpeaks-----
77 [~,locs] = findpeaks(Y((MerBin-ceil(MerBin/2)):(MerBin+ceil(MerBin/2))), 'SORTSTR', 'descend');
78 %vyhledání maxima pro MerBin ve vzdálenosti MerBin/2 okolo binu MerBin
79 %~ - nulová proměnná
80 %locs - vektor relativní pozice MerBin seřazený sestupně po amplitudách (descend)
81
82
83
84 %-----vytvoření MerBinVektor s krokem okolo MerKcoef s
85 %vazbou na Span-----
86 MerBinVektor = (MerBin-ceil(MerBin/2)+locs(1)-Span):(MerBin-ceil(MerBin/2)+locs(1)+Span);
87
88
89 %-----Převod na urověň napětí-----
90 YdB = 20*log10(Y./max(Y));
91
92 %-----Grafické znázornění průběhů ve Vef a dBFS-----
93
94 figure(1)
95 semilogx(osaX,YdB(StartBin:EndBin),'b')
96 title('Spektrum měřeného signálu')
97 xlabel('f [Hz]')
98 ylabel('L [dBFS]')
99 hold on
100
101
102 %-----Funkce pro potlačení až 8 násobku harmonické složky-----
103 if(frekv_krok >=1) %pokud je frekvenční krok větší nebo roven 1, použij převrácenou hodnotu
104 frekv_krok = 1/frekv_krok;
105 end
106
107 %---Odstranění (potlačení) až 8 harmonických síťového kmitočtu (400kHz)---
108
109 if (Poc50>0 && Poc50<9)
110 %smyčka pro určení 50Hz a jejich harmonických
111
112
113 [MeanVal] = potlac_50(Y, Poc50, Bin50, Span, osaX, StartBin, EndBin, frekv_krok);
114
115 else
116 disp('Nebylo zadáno potlačení harmonické 50Hz (brumových složek)')
117 disp(' ')
118
119 end

```

```
120
121 Yeffkalib = sqrt(sum((Ykalib(StartBin:EndBin)).^2)/length(StartBin:EndBin));
122 %Efektivní hodnota spektra kalibračního souboru v mezích StartBin až EndBin
123 k = (Uinef/(kv.*Yeffkalib));
124 %výpočet kalibrační konstanty
125
126 MerEf=sqrt(sum((Y(StartBin:EndBin)).^2)/length(StartBin:EndBin));
127 %výpočet efektivní hodnoty měřeného průběhu
128 Uinmer=k*kvmer*MerEf;
129 %výpočet vstupního napětí měřeného průběhu
130
131
132 %-----Výsledky-----
133 disp('Mereny prubeh')
134 disp(MerSoubor)
135
136
137 disp('Cinitel zvlneni [%]:')
138 disp(cinitel_zvl)
139
140
141 fprintf('Efektivni hodnota sumoveho napeti v kmitoctovem pasmu \n
142 od %d Hz do %d Hz je \n %d V\n\n',StartKmit , EndKmit, Uinmer)
```