

Stabilizátory napětí a jejich řešení

Stabilizers tensions and their resolutions

Bc. Miroslav Krůžela

Diplomová práce
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

*** nescannované zadání str. 1 ***

*** nescannované zadání str. 2 ***

ABSTRAKT

Práce obsahuje přehled různých zapojení a druhů obvodů pro stabilizaci napětí. U těchto obvodů jsou uvedeny základní parametry daného obvodu. Dále je provedeno obecné porovnání zmíněných obvodů z hlediska základních parametrů. Praktická část diplomové práce se zabývá testováním různých zapojení a hledání nejvhodnějšího zapojení pro zadané parametry.

Klíčová slova: stabilizace, stabilizátor napětí, simulace obvodů

ABSTRACT

The work contains an overview of the different types of circuits and involvement in the stabilisation of tension. For these districts are given the basic parameters of the circuit. It is also carried out a general comparison to those districts in terms of the basic parameters. Practical thesis deals with the testing of different involvement and the involvement of finding the most appropriate for the specified parameters.

Keywords: stabilization, voltage, circuit simulation

Chtěl bych touto cestou poděkovat ing. Lubomíru Macků za odborné vedení a pomoc při tvorbě této práce, dále ing. Malinovi za odborný komentář a v neposlední řadě rodině za podporu při studiu.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....
Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 DEFINICE STABILIZÁTORU NAPĚTÍ	10
2 DRUHY STABILIZÁTORŮ	12
2.1 PARAMETRICKÉ STABILIZÁTORY	12
2.1.1 Stabilizátor s diodou.....	13
2.1.2 Stabilizátor se Zenerovou diodou.....	15
2.1.3 Sériový stabilizátor.....	16
2.2 STABILIZÁTORY SE ZPĚTNOU VAZBOU	17
2.2.1 Zapojení sériového stabilizátoru se zpětnou vazbou.....	18
2.2.2 Zpětnovazební stabilizátor s operačním zesilovačem.....	19
2.2.3 Zapojení stabilizátoru se zpětnou vazbou pomocí tranzistoru	20
2.3 LINEÁRNÍ TŘÍSVORKOVÉ STABILIZÁTORY NAPĚTÍ	21
2.3.1 Kladné a záporné stabilizátory	21
2.3.2 Stabilizátory s pevným výstupním napětím	22
2.3.3 Stabilizátory s nastavitelným výstupním napětím.....	25
2.3.4 Obvod LM317	25
2.4 VÍCESVORKOVÉ STABILIZÁTORY	27
2.4.1 Vypínatelné stabilizátory	28
2.4.2 Nastavitelné stabilizátory	29
2.4.3 Stabilizátory s omezením proudu.....	29
2.4.4 Stabilizátor LP2951	29
3 POROVNÁNÍ PARAMETRŮ JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ STABILIZÁTORŮ	34
3.1 MOŽNÁ VELIKOST VSTUPNÍHO A VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ	34
3.2 PROUDOVÁ ZATÍŽITELNOST	34
3.3 VLASTNÍ SPOTŘEBA STABILIZÁTORU	35
3.4 KLIDOVÝ PROUDOVÝ ODBĚR.....	35
3.5 CENA.....	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
4 NÁVRH STABILIZÁTORU NA ZÁKLADĚ ZADANÝCH PARAMETRŮ	38

4.1	STABILIZÁTOR S DIODOU	39
4.2	STABILIZÁTOR S DVĚMA DIODAMI.....	40
4.3	STABILIZÁTOR SE ZENEROVOU DIODOU	41
4.4	PARAMETRICKÝ STABILIZÁTOR SE ZPĚTNOU VAZBOU POMOCÍ DVOU TRANZISTORŮ	43
4.5	PARAMETRICKÝ STABILIZÁTOR SE ZPĚTNOU VAZBOU S OZ	44
4.6	PARAMETRICKÝ STABILIZÁTOR SE ZPĚTNOU VAZBOU POMOCÍ 3 TRANZISTORŮ	45
4.7	STABILIZÁTOR S OBVODEM TYPU 723	46
4.8	STABILIZÁTOR S OBVODEM LM317 V ZÁKLADNÍM ZAPOJENÍ.....	49
4.9	STABILIZÁTOR S OBVODEM LM317 S OMEZENÍM VÝSTUPNÍHO PROUDU	50
4.10	STABILIZÁTOR S OBVODEM LP2951	51
5	PRAKTICKÁ KONSTRUKCE OBVODŮ.....	53
	ZÁVĚR	57
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	58
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	59
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	60
	SEZNAM OBRÁZKŮ	61
	SEZNAM TABULEK.....	63
	SEZNAM PŘÍLOH.....	64

ÚVOD

Vývoj obvodů pro stabilizaci napětí už trvá několik desetiletí. Během tohoto vývoje se výrazným způsobem zlepšovaly vlastnosti obvodů pro stabilizaci napětí. V mé práci je provedeno základní rozdělení obvodů pro stabilizaci napětí od nejjednodušších schémat až po velmi precizní zapojení a následně i přehled základních zapojení a obvodů pro stabilizaci napětí, dostupných v současné době. Jeden z výstupů této práce je obecné porovnání základních vlastností charakterizujících stabilizátory napětí. Dále je za pomoci počítačových simulací hledáno optimální zapojení splňující zadané parametry. Zapojení nejlépe vyhovující zadaným parametrům bylo pak prakticky realizováno. Ze zadaných parametrů byla vedoucím práce stanovena nejvyšší priorita na klidový proudový odběr. Klidový proudový odběr hraje u nízkonapěťových a nízkoodběrových aplikacích velmi důležitou roli. A to při napájení stabilizačního obvodu z baterií nebo při situaci, kdy je proud zátěže menší než klidový odběr – energeticky neefektivní řešení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DEFINICE STABILIZÁTORU NAPĚTÍ

Ze všeho nejdříve je třeba si objasnit termín stabilizátor napětí. Pod pojmem stabilizátor stejnosměrného napětí rozumíme dvojbran (obvykle trojpól), který splňuje po funkční i konstrukční stránce tyto vlastnosti. [1]

- A. Stabilizátor stejnosměrného napětí má nepatrný (ideálně nulový) přenos změn vstupního napětí na výstup. Obvod má nepatrný přenos zvlnění P , viz rovnice 1

$$P = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1}; I_2 = konst. \quad (1)$$

Tento parametr by měl zajišťovat necitlivost stabilizátoru stejnosměrného napětí na kolísání vstupního napětí. Často se tento parametr uvádí logaritmickou formou v decibelech (rovnice 2). Dobře realizované stabilizátory dosahují hodnoty přes 80 dB.

$$P' = 20 \log P. \quad (2)$$

Definice vztahu pro přenos zvlnění neobsahuje informaci o rychlosti změny vstupního napětí. Tato rychlost může být pomalá i rychlá. Z toho lze usoudit, že je P obecně kmitočtově závislé.

Převrácená hodnota činitele zvlnění P je takzvaný činitel stabilizace S

$$S = \frac{1}{P} \quad (3)$$

- B. Stabilizátor stejnosměrného napětí má nepatrný (ideálně nulový) vnitřní (výstupní) odpor, viz rovnice 4

$$R_0 = -\frac{\Delta U_2}{\Delta I_1}; U_1 = konst. \quad (4)$$

Tento parametr zajišťuje necitlivost výstupního napětí na velikosti odebíraného proudu . Stabilizátory se velmi blíží ideálnímu zdroji napětí.

- C. Stabilizátory stejnosměrného napětí by měly mít relativně velký(často jednotkový) přenos napětí (rovnice 5). A to hlavně z ekonomických důvodů.

$$B = \frac{U_2}{U_1} \leq 1 \quad (5)$$

Tento parametr vyjadřuje úbytek napětí (ztráty) na stabilizátoru a ovlivňuje účinnost obvodu. Dobře konstruované stabilizátory mají často úbytek napětí okolo 2V, některé mají i menší (i okolo 0,2V).

- D. Všechny důležité statické i dynamické parametry by měly být teplotně i časově stálé. Nejdůležitější je teplotní součinitel výstupního napětí K. Za předpokladu $U_1 = konst.$ a $I_2 = konst.$ bude:

$$K = -\frac{\Delta U_2}{\Delta \vartheta} \cdot 100[\%] \quad (6)$$

2 DRUHY STABILIZÁTORŮ

Stabilizátory napětí jsou v podstatě dvou typů:

- parametrické stabilizátory
- stabilizátory se zpětnou vazbou

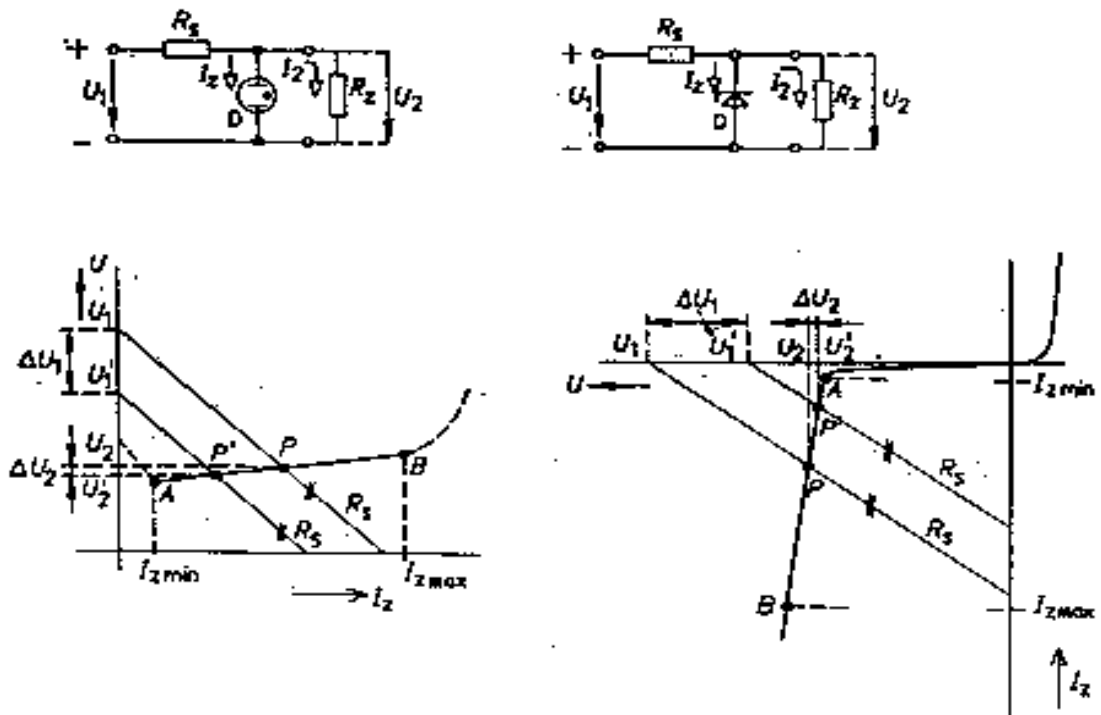
Parametrické stabilizátory využívají vhodného průběhu voltampérových charakteristik některých součástek, stabilizátory se zpětnou vazbou obsahují regulační součástku, která je ovládána odchylkou výstupního napětí od hodnoty referenčního napětí.

Druhé rozdělení by se dalo formulovat podle zapojení stabilizačního prvku v obvodu. Takto se dají dělit na:

- sériové
- paralelní

2.1 Parametrické stabilizátory

Funkce těchto stabilizátorů je založena na principu možného rozdílu mezi stejnosměrným a dynamickým odporem stabilizačního prvku v pracovním bodě. Pokud je dynamický odpor v pracovním bodě mnohem menší než stejnosměrný, jedná se o parametrický stabilizátor napětí (Zenerova dioda, dioda v propustném směru atd.), pokud je rozdíl opačný, tj. dynamický odpor v pracovním bodě stabilizačního prvku je mnohem větší než stejnosměrný, jedná se o parametrický stabilizátor proudu (klasickým případem jsou výstupní charakteristiky tranzistorů za kolenem).



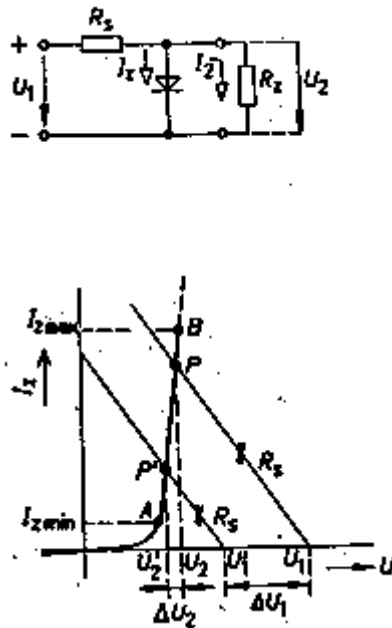
Obrázek 1 - Příklady zapojení parametrických stabilizátorů napětí

Parametrické stabilizátory napětí se používají pro zatěžovací proudy maximálně desítky mA. Pro stabilizaci několika desítek voltů slouží *doutnavka*, pro stabilizaci jednotek až desítek voltů *Zenerova dioda*, pro jednotky voltů obyčejné diody v propustném směru.

2.1.1 Stabilizátor s diodou

Tento stabilizátor využívá průběhu voltampérové charakteristiky diody v propustném směru. Níže uvedené zapojení se využívá pro stabilizaci malého napětí cca 0,6 až 1V

dle typu diody. Pro dosažení většího stabilizovaného napětí lze zapojit více diod do série, tudíž vzniknou násobky napětí na jedné diodě. Počet sériově spojených diod by neměl být větší než tři. [2]



Obrázek 2 - Příklad zapojení parametrického stabilizátoru napětí

V uvedeném zapojení rezistor R_s určuje polohu pracovního bodu P . Pro správnou činnost stabilizátoru je třeba zajistit, aby zatěžovací proud I_2 byl několikrát menší než proud I_z procházející diodou, čímž má odpor R_z a jeho změny minimální vliv na velikost výstupního napětí. Při změně vstupního napětí U_1 dojde i k posunu pracovního bodu, ale změna výstupního napětí U_2 bude malá, a bude tím menší, čím větší bude odpor R_s .

Je třeba dbát na to, aby pracovní bod neopustil omezenou oblast.

Srážecí odpor R_s se vypočítá dle rovnice 7:

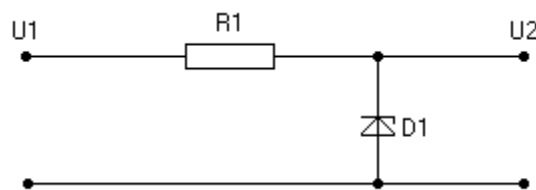
$$R_s = \frac{U_1 - U_F}{I_1} \quad (7)$$

kde U_1 je vstupní napětí, U_F je hodnota propustného napětí diody při proudu I_F a současně hodnota stabilizovaného výstupního napětí a proud I_1 je součtem proudu do diody I_F a proudu do zátěže I_2 .

Činitel stabilizace je okolo 10. Nevýhodou je právě malý činitel stabilizace, nízká zatížitelnost, malá energetická účinnost.

2.1.2 Stabilizátor se Zenerovou diodou

Jde o parametrický stabilizátor, který využívá průběh voltampérové charakteristiky diody v závěrném směru, Zenerův jev a lavinovou ionizaci. Velkou výhodou těchto stabilizačních diod je relativně velký počet možných Zenerových napětí (2,2V až 200V), neboli napětí, která jsou na výstupu ze stabilizačního obvodu uvedeného na obrázku 2. [2]



Obrázek 3 – Zapojení parametrického stabilizátoru se Zenerovou diodou

Odpor R1 zde plní stejnou funkci jak odpor R_s v zapojení stabilizátoru s normální diodou.

Postup pro návrh stabilizátoru se Zenerovou diodou a výpočet odporu R_s :

První věcí, kterou je potřeba znát, je vstupní napětí U_1 , výstupní napětí U_2 a rozpětí zatěžovacích proudů $I_{2 \min}$ a $I_{2 \max}$.

Zenerovu diodu vybíráme podle maximálního proudu diodou, maximálního ztrátového výkonu a Zenerova napětí. Zenerovo napětí vybíráme jako nejbližší možnou hodnotu k U_2 . Ke stanovení maximálního proudu diodou existují dva přístupy. První nepřipouští možnost odpojení zátěže, tudíž se zvolí $I_z > I_{2 \min}$. Druhý přístup připouští odpojení zátěže, tudíž

$I_2 = 0$. V tomto případě se volí $I_z > I_{2 \max}$.

Dalším krokem je výpočet ztrátového výkonu na Zenerově diodě dle vzorce

$$P_{ZD} = U_z \cdot I_z [W] \quad (8)$$

Pomocí dříve zvolených a vypočtených vlastností (I_z , U_z , P_{ZD}) najdeme v katalogu Zenerovu diodu, přičemž by měla být nechána rezerva v proudové a výkonové zatížitelnosti.

Ted' už zbývá jen vypočítat hodnotu srážecího odporu R_1 a jeho typ podle výkonové ztráty.

Pro výpočet hodnoty odporu se používá rovnice

$$R_1 = \frac{U_1 - U_Z}{I_Z + I_2} [\Omega] \quad (9)$$

Poslední krok je určení výkonové ztráty ze vzorce

$$P_{R1} = \frac{(U_1 - U_Z)^2}{R_1} [W] \quad (10)$$

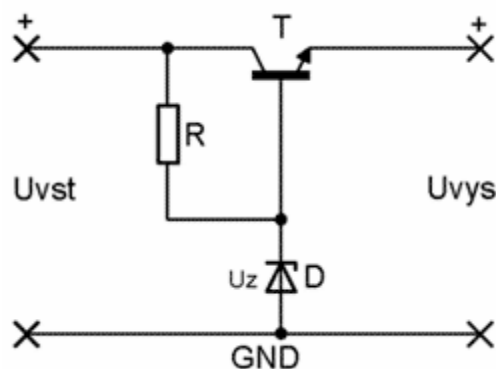
Rezistor R_1 volíme tak, aby jeho hodnota odporu byla blízko vypočítané hodnotě

a povolený ztrátový výkon byl aspoň 1,5 násobně větší než vypočítaný.

2.1.3 Sériový stabilizátor

Sériové stabilizátory jsou výborným prostředkem pro omezení vlivu velkých změn vstupního napětí a změn zátěže. Při normální činnosti může na výkonovém členu (tranzistoru) být podstatně menší napětí, než je napětí na zátěži. Proud, který teče výkonovým členem, je roven proudu zátěže. To je ale největší nevýhodou sériových stabilizátorů. Pokud totiž nastane zkrat na výstupu z regulátoru, je na výkonovém členu plné napětí a prochází jím velký zkratový proud. Naopak díky tranzistoru jako stabilizačnímu prvku lze do zátěže dodávat větší proud, a tudíž také větší výkon než

u stabilizátorů, jejichž stabilizační prvek je dioda. [6]



Obrázek 4 – Nejjednodušší zapojení sériového stabilizátoru

Tranzistor T pracuje jako emitorový sledovač. Zvětšuje výstupní výkon paralelního stabilizátoru tvořeného R a D a zmenšuje jeho dynamický odpor. Výstupní napětí je pak rovno $U_Z - U_{BE}$.

Proud Zenerovou diodou vypočítáme podle vztahu:

$$I_Z = \frac{U_{vst} - U_{výst}}{R} \quad (11)$$

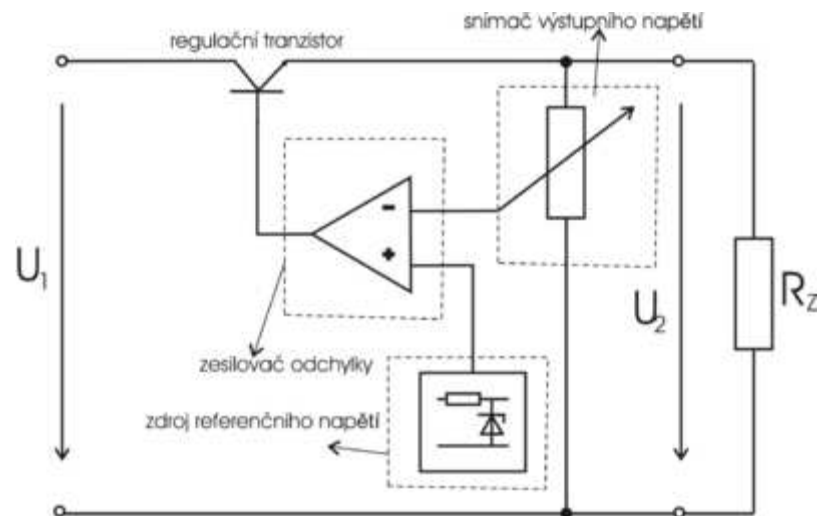
Velikost rezistoru pak podle:

$$R = \frac{U_{vst} - U_{výst}}{I_Z \cdot h_{21}} \quad (12)$$

2.2 Stabilizátory se zpětnou vazbou

Dostí vážným nedostatkem parametrických stabilizátorů je malý výstupní výkon (u stabilizátorů s diodami), nemožnost regulace stabilizovaného napětí a někdy příliš velká citlivost na změny zatížení nebo kolísání napájecího napětí.

Zavedení smyčky záporné zpětné vazby zároveň s vhodným zesílením v této smyčce dovoluje jak zlepšení přesnosti stabilizace výstupní veličiny, tak velmi značné zvětšení výkonu dodávaného stabilizátorem. Sériový stabilizátor napětí s vnější zpětnou vazbou se skládá ze vstupu napětí, zdroje referenčního napětí (parametrického stabilizátoru), aktivního členu sloužícího k regulaci výstupního napětí, obvodu porovnávajícího výstupní napětí s napětím regulačním a generujícího signál odchylky a ze zesilovače signálu odchylky. [3]



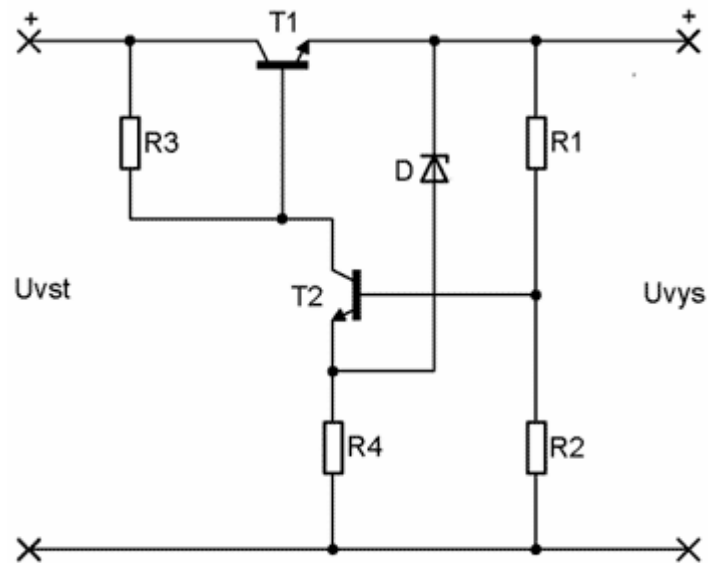
Obrázek 5 – Blokové schéma zpětnovazebního stabilizátoru

Zesilovač odchylky zesiluje rozdíl mezi referenčním napětím a částí výstupního napětí. Výstup zesilovače odchylky budí sériový regulační tranzistor, sníží-li se například na výstupu napětí, zvýší se regulační odchylka, tranzistor je buzen větším napětím. Jeho vnitřní odpor se zmenší a napětí na výstupu se zvětší [4].

Jako zdroj referenčního napětí se používají parametrické stabilizátory nebo integrované obvody. Pro zesilovač odchylky lze použít operační zesilovač v rozdílovém zapojení nebo zapojení s tranzistorem

2.2.1 Zapojení sériového stabilizátoru se zpětnou vazbou

Zapojení na obrázku 6 je doplněno jedním tranzistorem (T_2), který funguje jako zesilovač odchylky. Proud Zenerovou diodou je určen rezistorem R_4 . Zenerova dioda udržuje emitor T_2 na stálém napětí. Tranzistor T_2 je uzavřený, pokud je na rezistoru R_2 nižší napětí, než je napětí $U_z + U_{BE}$. Když napětí na R_2 vzroste nad součet napětí $U_z + U_{BE}$, tak se tranzistor T_2 začne otevírat. Tím se odvádí proud, který teče rezistorem R_3 . Jelikož se snižuje proud tekoucí do báze T_1 , začne se tento tranzistor zavírat. Tím se zvětšuje jeho vnitřní odpor a zmenšuje se napětí na výstupu, a tudíž i na R_2 . Zpětná vazba upravuje velikost napětí na R_2 tak, aby byla blízká hodnotě $U_z + U_{BE}$.



Obrázek 6 – Zpětnovazební stabilizátor s tranzistorem jako zesilovačem odchyly

Výstupní napětí se určí podle vztahu 13:

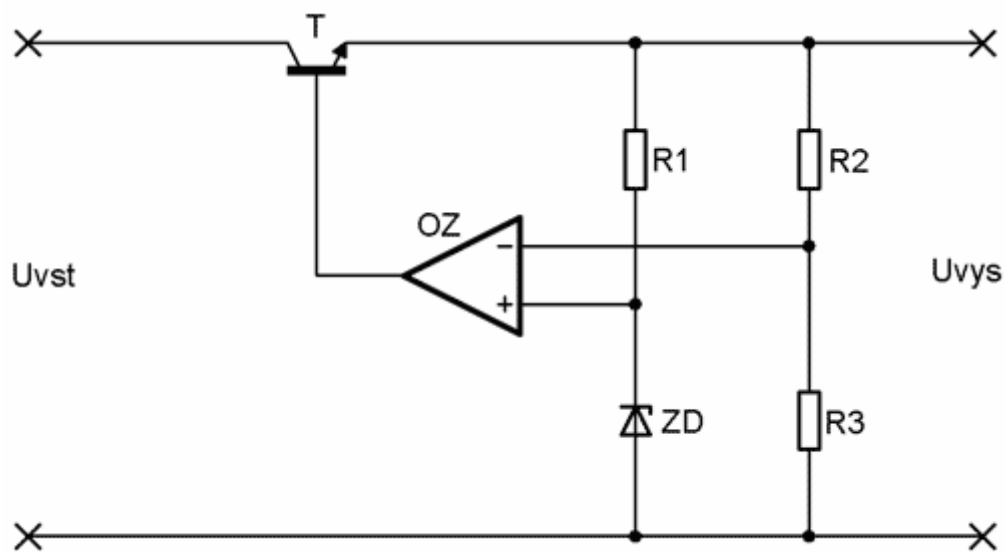
$$U_{výst} = \frac{U_Z + U_{BE}}{R_2 \cdot (R_1 + R_2)} \quad (13)$$

Nevýhoda těchto regulátorů je teplotní závislost napětí U_{be} na tranzistoru T2. Změna napětí je cca $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$. Tato změna se bude přenášet na výstup regulátoru.

Lepších výsledků se dosahuje s použitím operačního zesilovače jako chybového zesilovače.

2.2.2 Zpětnovazební stabilizátor s operačním zesilovačem

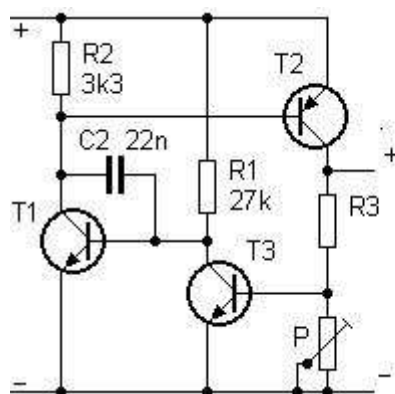
Referenční napětí se přivádí na neinvertující vstup operačního zesilovače. Na invertující vstup se přivádí zpětnovazební napětí z odporového děliče tvořeného rezistory R2 a R3. Pokud se výstupní napětí zvýší nad referenční, výstupní napětí zesilovače se zmenší, a tím se začne uzavírat regulační tranzistor. Zvýší se tím jeho odpor a výstupní napětí klesne.



Obrázek 7 - Zpětnovazební stabilizátor s OZ jako zesilovačem odchyšky

2.2.3 Zapojení stabilizátoru se zpětnou vazbou pomocí tranzistoru

Toto zapojení (obr. 8) je navrženo tak, aby stačilo vstupní napětí jen nepatrně větší než je saturační napětí regulačního tranzistoru. Proud procházející rezistorem R1 otevírá tranzistor T1 a kolektorovým proudem tranzistoru T1 se otevírá T2. Zvětší-li se výstupní napětí nad velikost nastavenou děličem R3 a P, zvětší se i napětí na bázi T3. Tranzistor T3 se otevírá a proud tekoucí do báze T2 se zmenší. Následně se přivřou i tranzistory T1 a T2 a výstupní napětí se vyrovná. Zesílení v uzavřené smyčce zpětné vazby je značné - aby se stabilizátor nerozkmital, je nutno doplnit zapojení o kondenzátor C2.



Obrázek 8 – Zapojení zpětnovazební stabilizátoru bez referenčního napětí

Trimrem P nastavíme požadované výstupní napětí. Pro menší výstupní napětí bude třeba zmenšit odpor rezistoru R3. V uvedeném zapojení je rozsah výstupních napětí od 1 do 6 V. Odpor rezistoru R3 je přitom třeba měnit od 2,7 do 33 kOhm.

Zapojení z diskretních prvků občas nemusí vyhovovat některým nárokům na parametry a velikost. Tyto nároky pak většinou uspokojí integrované stabilizátory.

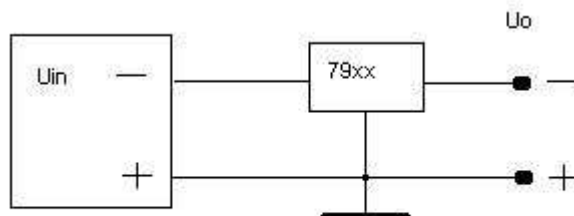
2.3 Lineární třívorkové stabilizátory napětí

Lineární třívorkové stabilizátory lze rozdělit do pěti základních skupin. A to na kladné, záporné, s pevným výstupem, sledovací a plovoucí stabilizátory. Každá z těchto skupin má své zvláštní charakteristiky a možnosti využití. Výběr je závislý nejen na vlastnostech a návrháři, ale i na ceně. [2]

2.3.1 Kladné a záporné stabilizátory

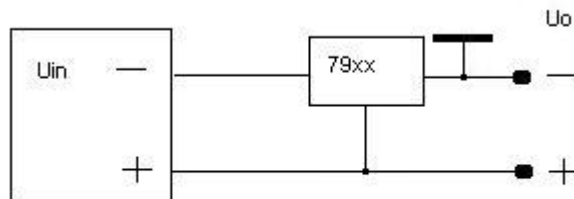
Kladné stabilizátory bývají používány nejčastěji pro získání kladných napětí a záporné pro získání záporných napětí. Avšak s určitým způsobem uzemnění lze tyto stabilizátory použít i v opačném funkci. [2]

Na obrázku 9 je obvyklé zapojení obvodu řady 79xx. V tomto případě dává obvod záporné napětí.



Obrázek 9 – Obvyklé zapojení obvodu řady 79xx

Za předpokladu, že napájecí zdroj nemusí být uzemněn, lze stabilizátory zapojit i podle následujícího obrázku, kde je ukázáno zapojení tohoto typu stabilizátorů v opačné funkci. Podmínkou pro provedení tohoto zapojení je plovoucí napájecí zdroj. Plovoucí napájecí zdroj je zdroj, který nemá žádnou elektrodu spojenou se zemí.



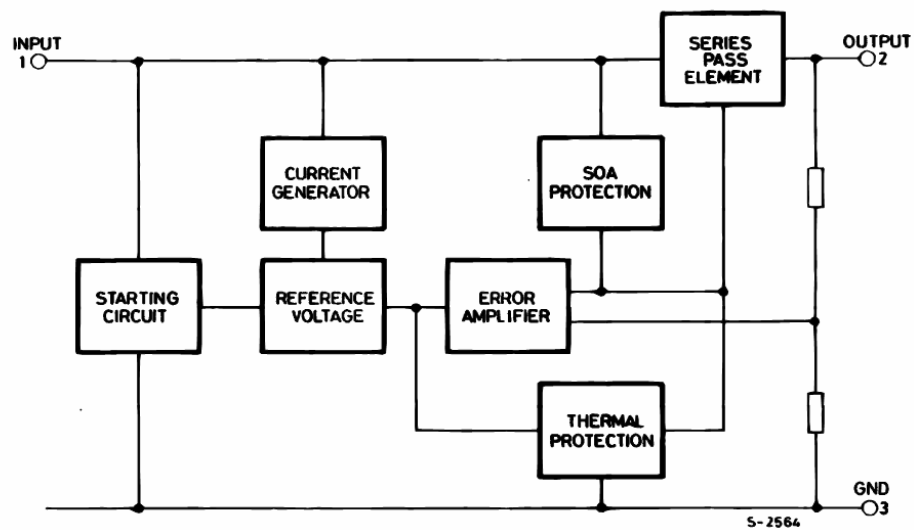
Obrázek 10 – Zapojení stabilizátoru záporného napětí v opačné funkci

2.3.2 Stabilizátory s pevným výstupním napětím

Návrh stabilizátorů s využitím obvodů, které poskytují pevné výstupní napětí,

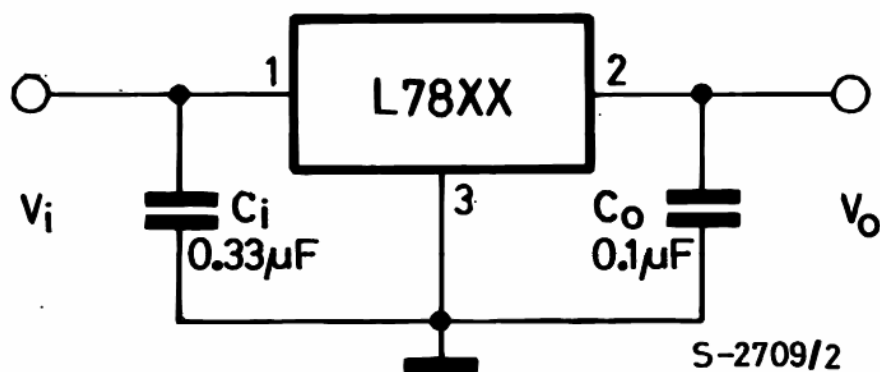
je nejjednodušší, přičemž využití těchto stabilizátorů nevylučuje získání pevného nebo nastavitelného napětí. Mezi příklady těchto stabilizátorů lze uvést IO řady 78xx a 79xx.

[2]



Obrázek 11 – Blokové schéma stabilizátoru s pevným výstupním napětím řady 78xx

Spouštěcí obvod zajišťuje spuštění funkce stabilizátoru po zapnutí zdroje vstupního napětí. U řady 78XX zpravidla tento obvod nespustí stabilizátor, pokud je na výstupních svorkách zbytkové napětí. Prakticky se tato skutečnost projeví při krátkodobém výpadku síťového napájení, když spotřebič obsahuje větší blokovací kapacity a jeho odběr při poklesu napětí rychle klesá k nule. Obvody tepelné ochrany zajišťují, aby nedošlo ke zničení stabilizátoru dlouhodobým ohřevem. Ochrana je založena na nárůstu klidového proudu tranzistoru se vzrůstající teplotou. Přepětěová ochrana vypne výstupní napětí při překročení dovoleného vstupního napětí. Sériový regulační prvek je vybaven obvodem pro omezení výstupního proudu.



Obrázek 12 – Ukázkové zapojení stabilizačního obvodu řady 78xx

Na obrázku 12 je ukázkové zapojení obvodu řady 78xx, přičemž kondenzátory slouží k vyhlazení vstupního a výstupního napětí. Zapojení stabilizačního obvodu řady 79xx je obdobné jako zapojení pro řadu 78xx, rozdíl je v tom, že je na vstup přivedené záporné napětí a kladná svorka je uzemněna.

Základní technické parametry IO řady 78xx a 79xx :

78xx - kladné výstupní napětí

79xx - záporné výstupní napětí

$U_{in \text{ max.}} = 35V$

$U_{out} =$ druhé dvojčíslí v názvu stabilizátoru (7805 = 5V)

$I_{out \text{ max.}} = 1,5A$, u označení 78Sxx = 2A , 78Txx = 3A (s chlazením, pouzdro TO220),
pouzdro TO92 = 0,1A

$T_{op} = 0..+150^{\circ}C$

[8]

Výhody těchto stabilizátorů jsou:

- jednoduché aplikace
- vnitřní proudové omezení a tepelná pojistka
- obvod není nutné nastavovat
- nízká cena

Nevýhody jsou:

- výstupní napětí nemusí být nastaveno přesně
- k dispozici jsou jen určité hodnoty výstupního napětí (5,12V atd.)

Tyto stabilizátory mohou být doplněny o velké množství externích zapojení. Jako příklad lze uvést zapojení pro zvýšení výstupního proudu, zapojení pro vysoké vstupní napětí atd.

2.3.3 Stabilizátory s nastavitelným výstupním napětím

Pomocí třísvorkového stabilizátoru s pevným výstupním napětím lze zkonstruovat i stabilizátory s nastavitelným výstupním napětím. Tyto stabilizátory pracují na principu přičítání proměnného napětí k pevnému referenčnímu napětí, jež je tvořeno vnitřním stabilizátorem napětí. Obvykle lze nastavit výstupní napětí v rozsahu od 1,2V až do 40V, nejčastěji pomocí externího odporového děliče tvořeného dvěma odpory. Z hlediska proudové zatížitelnosti jsou k dispozici stabilizátory od 0,1A do 3A. [2]

Jako zástupce této kategorie stabilizátorů lze uvést obvod LM317.

2.3.4 Obvod LM317

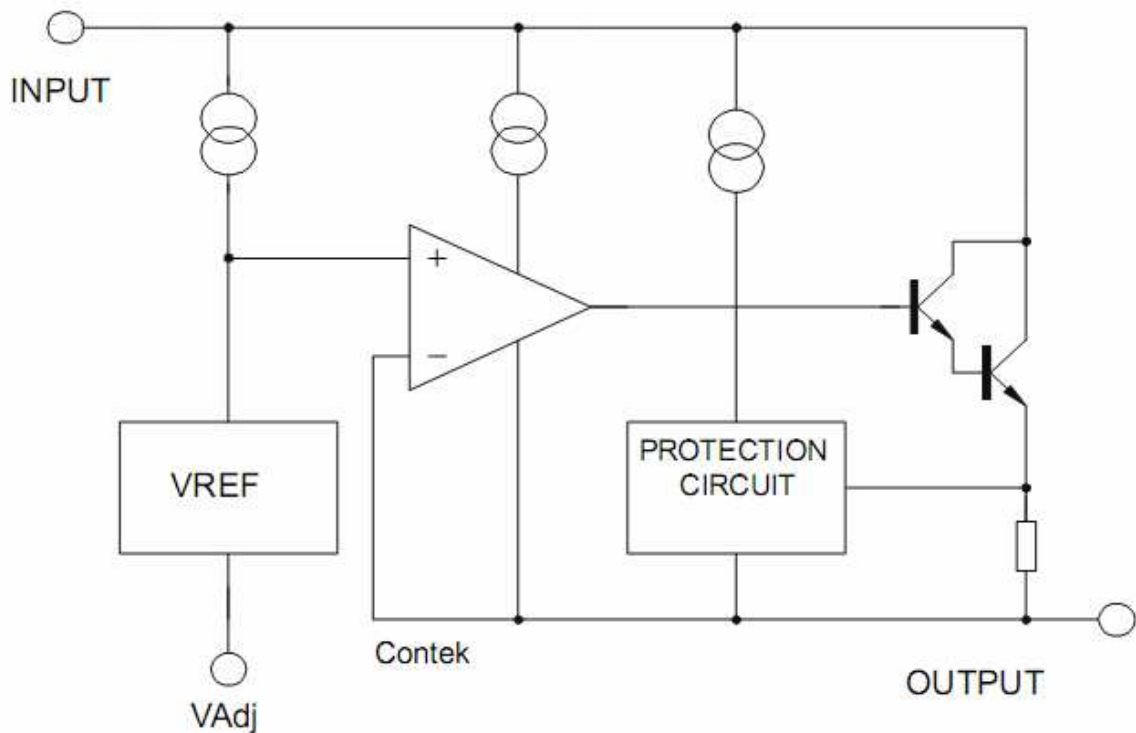
Tento obvod patří mezi nejpoužívanější třísvorkové stabilizátory s nastavitelným výstupním napětím. Stabilizuje kladné napětí. Ekvivalent pro záporné napětí je veden pod názvem LM337. [7] Základní parametry tohoto obvodu jsou:

- výstupní napětí: 1,2 – 37V
- výstupní proud: 0,1 – 1,5 A dle specifikace (písmeno za označením obvodu)
- 0,1% napájecí a zatížená regulace
- kompletní sada ochran: proudová ochrana, tepelná a SOA
- plovoucí operace pro vysoké napětí

Pro všechny typy stabilizátorů LM317 platí následující maximální parametry:

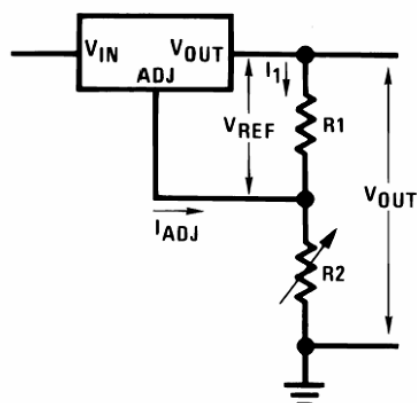
Tabulka 1 – Maximální parametry obvodu LM317

Parameter	Symbol	Value	Unit
Input-Output Voltage Differential	$V_I - V_O$	40	V
Lead Temperature	T_{LEAD}	230	°C
Power Dissipation	P_D	Internally limited	W
Operating Junction Temperature Range	T_j	0 ~ +125	°C
Storage Temperature Range	T_{STG}	-65 ~ +125	°C
Temperature Coefficient of Output Voltage	$\Delta V_o / \Delta T$	± 0.02	%/°C



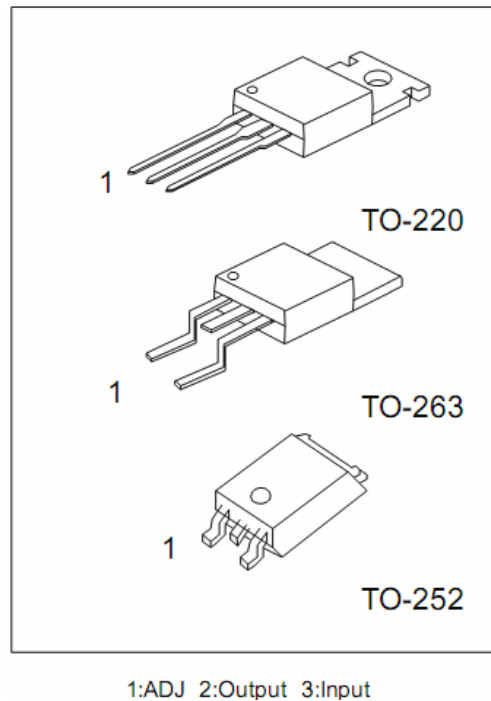
Obrázek 13 – Blokové schéma vnitřního zapojení obvodu LM317

Blokové schéma přesně vystihuje princip nastavitelného stabilizátoru. Zdroj referenčního napětí je napájen konstantním proudem. Stabilizace probíhá pomocí sériového stabilizačního prvku, který je řízen generátorem odchylky výstupního napětí a referenčního napětí. Pro nastavení napětí se používá externího rezistoru, pomocí něho se k referenčnímu napětí přičítá další napětí.



Obrázek 14 – Základní zapojení s LM 317

Integrované stabilizátory se prodávají v několika různých pouzdech. Na následujícím obrázku je jejich znázornění a popis vývodů



Obrázek 15 – Pouzdra pro LM317 a označení vývodů

Device	Package Type	Output
LM317T	TO-220	1.5 Amp
LM317N	SOT-223	1.0 Amp
LM317S	TO-263	1.5 Amp
LM317D	TO-252	1.5 Amp

Obrázek 16 - Typy obvodů LM317

2.4 Vícesvorkové stabilizátory

[5,2]

Vícesvorkové stabilizátory nabízejí velké množství funkčních možností, jež třísvorkové stabilizátory nenabízejí. A to pomocí dalších vývodů. Tyto vývody (elektrody) lze zařadit do několika skupin dle jejich účelu. Rozdělujeme je na:

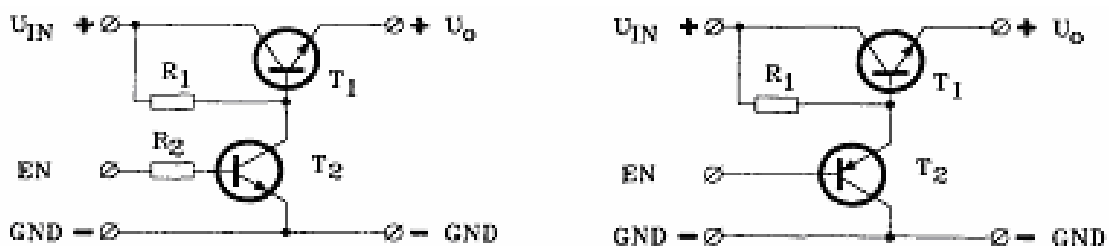
- a) elektrody umožňující nastavení nebo dostavení hodnoty výstupního napětí, které jsou obvykle značené jako nastavovací (SET, ADJ),

- b) elektrody umožňující nastavit omezení výstupního proudu označované jako SENSE nebo CURRENT LIMIT - obvykle mezi touto elektrodou a výstupem se umísťuje odpor, na kterém průchodem proudu vzniká úbytek aktivující limitaci výstupního proudu,
- c) elektrody pomocných výstupních napětí spojených s hlavním výstupním napětím, nebo i samostatné
- d) elektrody umožňující pomocí signálu (obvykle v úrovních TTL) výstup zdroje zapnout či vypnout jsou označovány jako SHDN (shutdown) nebo EN (enable),
- e) elektrody, na které je vyvedeno vnitřní referenční napětí a elektrody pro vstup vnějšího referenčního napětí.

2.4.1 Vypínatelné stabilizátory

Nejjednodušší z integrovaných lineárních stabilizátorů mají pouze jednu elektrodu navíc a tou bývá elektroda, která umožňuje zapínání a vypínání výstupního napětí, případně i jeho pomalý náběh, pokud není žádoucí skoková změna.

Tato ovládací elektroda je spojena uvnitř integrované struktury s bází tranzistoru T_2 , který při svém sepnutí uzemňuje bázi hlavního sériového regulačního tranzistoru T_1 , z toho vyplývá, že způsob ovládání elektrody ENABLE (EN) může být dvojit:



Obrázek 17 – Ovládání stabilizátoru NPN a PNP tranzistorem

- pro stabilizátor kladného napětí je užit ovládací tranzistor T_2 typu NPN, a pak k jeho spínání dochází přivedením kladného napětí na bázi, obvykle velikost logické jedničky TTL úrovně zabezpečí jeho plné sepnutí, zkratování báze hlavního regulačního tranzistoru T_1 , na zem, a tedy pokles výstupního napětí na nulu – obrázek 17 vlevo,

- pro stabilizátor kladného napětí je užít ovládací tranzistor T_2 typu PNP, a pak k jeho sepnutí stačí bázi uzemnit a opět po jeho sepnutí klesá výstupní napětí na nulu, jak je ukázáno na obrázek 17 vpravo. Aby stabilizátor pracoval s normálním výstupním napětím U_o , nepřipojuje se ovládací elektroda EN nikam, nebo se na ni připojuje logická jednička.

2.4.2 Nastavitelné stabilizátory

Nastavování výstupního napětí integrovaných lineárních stabilizátorů je možné

i u třísvorkových stabilizátorů. U nich se však vyskytuje komplikace, kterou je proud I_{ADJ} (I_Q). Proud I_{ADJ} reprezentuje vlastní spotřebu lineárního stabilizátoru. Tato spotřeba bývá závislá na velikosti vstupního napětí případně na velikosti výstupního proudu.

Z tohoto důvodu se pro velmi přesné nastavení výstupního napětím užívají stabilizátory, které mají nastavovací svorku oddělenou od svorky zemnicí, kterou protéká proud vlastní spotřeby. [2]

2.4.3 Stabilizátory s omezením proudu

U většiny integrovaných lineárních stabilizátorů je proudová limitace pevně nastavena na konstantní hodnotu díky vnitřnímu zapojení stabilizátoru. Přesto je celá řada stabilizátorů, u nichž lze nastavit hodnotu, při které dojde k omezení výstupního proudu pomocí vnějších součástek. Nejčastěji se používá rezistoru zapojeného z hlediska vnitřní struktury stabilizátoru mezi bázi a emitor pomocného tranzistoru.

2.4.4 Stabilizátor LP2951

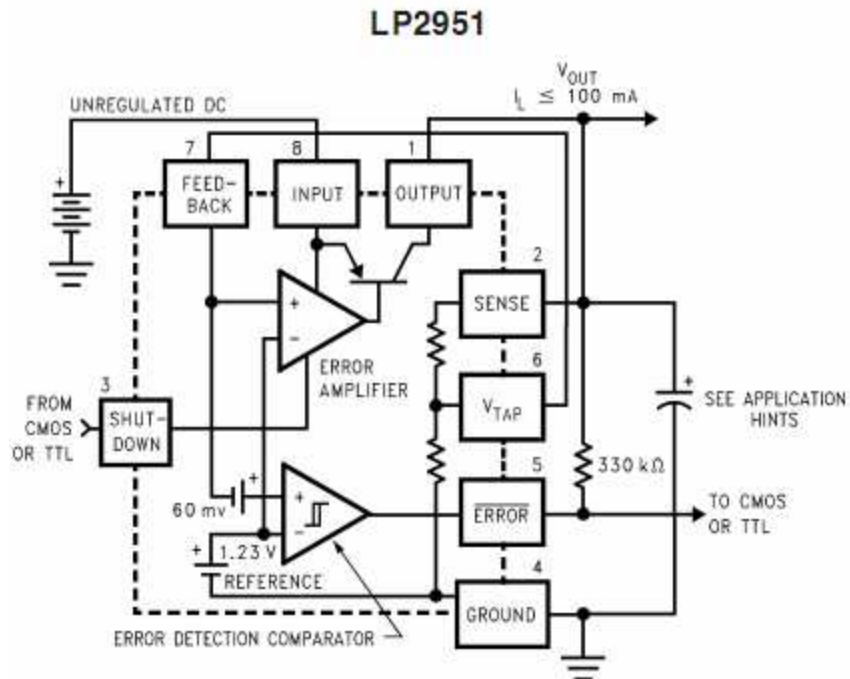
Obvod LP 2951 lze uvést jako příklad vícesvorkového integrovaného stabilizátoru napětí.

Základní vlastnosti LP2951:

- vysoká přesnost výstupního napětí
- garantovaný výstupní proud 100mA
- extrémně nízký klidový proud
- nízká vnitřní spotřeba
- proudová a tepelná ochrana
- nastavitelné výstupní napětí 1,24-29V

- možnost vypínání logickými signály

Vnitřní zapojení tohoto obvodu je docela složité, proto bude uvedeno jen blokové schéma (obrázek 18).



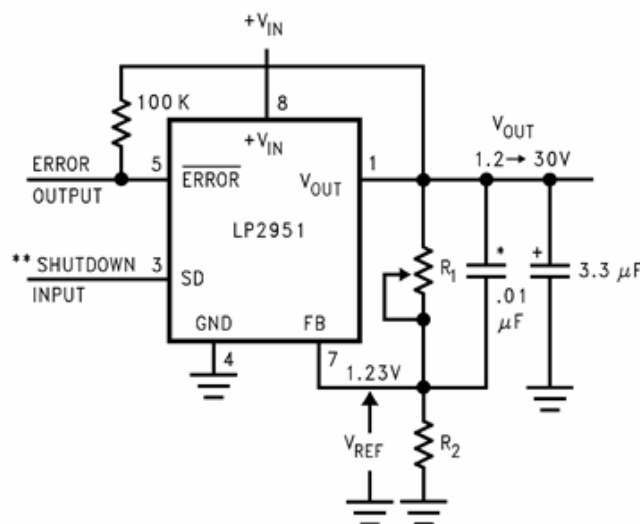
Obrázek 18 – Blokové schéma obvodu lp2951

Výrobce udává maximální parametry, které jsou uvedené na následujícím obrázku.

Input Supply Voltage	-0.3 to +30V
SHUTDOWN Input Voltage, Error Comparator Output Voltage, (Note 9)	
FEEDBACK Input Voltage (Note 9) (Note 10)	-1.5 to +30V
Power Dissipation	Internally Limited
Junction Temperature (T _J)	+150°C
Ambient Storage Temperature	-65° to +150°C
Soldering Dwell Time, Temperature	
Wave	4 seconds, 260°C
Infrared	10 seconds, 240°C
Vapor Phase	75 seconds, 219°C

Obrázek 19 – Maximální parametry obvodu LP2951

Z obrázku 19 lze vyčíst, že vstupní napětí může být od -0,3 do 30V, výkonová ztráta je vnitřně limitována. Dále je uvedena dovolená teplota okolí pouzdra a časy krátkodobé výdrže při vyšších teplotách.



Obrázek 20 – Typické zapojení stabilizátoru LP2951

V zapojení uvedeném na obrázku 20 je několik externích součástek. Následně bude vysvětlena jejich funkce a případná doporučení výrobce.

Kondenzátor mezi výstupem a zemí zabraňuje rozkmitání obvodu. Při výstupních napětích 5V a vyšších se jeho kapacita volí 0,1 μ F nebo větší. Při napětí menším než 5V je potřeba větší kapacity (2,2 μ F nebo větší). Důležité parametry tohoto kondenzátoru jsou ESR okolo 5 Ω a rezonanční frekvence okolo 500kHz. Hodnota tohoto kondenzátoru může být navyšována bez limitu.

Keramické kondenzátory, jejichž hodnota je větší než 1000pF by neměly být připojeny přímo z výstupu LP2951 do země. Jejich typické ESR je v rozsahu hodnot 5 až 10m Ω , což je hodnota pod limitem pro stabilní operace.

Při nižších hodnotách výstupního proudu je pro stabilitu obvodu potřebná menší výstupní kapacita. Kondenzátor může být redukován až na 0,33 μ F pro proudy pod 10mA, nebo 0,1 μ F pro proudy pod 1mA.

Pokud je u LP2951 použito externích rezistorů pro nastavení výstupního napětí je doporučeno zatížení výstupu minimálně 1 μ F. Při použití vysokých hodnot rezistorů může vzniknout nestabilita díky odchylkové kapacitě při zpětnovazebním vstupu.

Nastavení výstupního napětí:

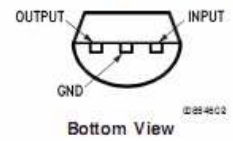
Stabilizátor LP2951 může být programován pro libovolné výstupní napětí v rozsahu od 1,235V (referenční hodnota) do 30V (maximální hodnota). K tomu jsou potřeba dva externí rezistory. Celá rovnice pro výstupní napětí je:

$$V_{OUT} = V_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + I_{FB} R_1 \quad (14)$$

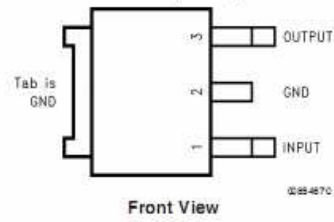
Kde V_{REF} je nominální reference elektrického napětí (1,235V) a I_{FB} je proud zpětnovazebním pinem, nominálně -20nA. Minimální doporučený zatěžovací proud je $1\mu\text{A}$, což limituje hodnotu odporu R_2 na $1,2\text{M}\Omega$, pokud musí stabilizátor pracovat bez zatížení. I_{FB} bude způsobovat 2% typické chyby V_{OUT} , kterou lze eliminovat nastavením R_1 . Pro lepší přesnost se volí $R_1=100\text{k}\Omega$, což zredukuje chybu na 0,17%, zatímco vzrůstá proud rezistorového programu na $12\mu\text{A}$. Vzhledem k tomu, že LP2951 typicky utáhne $60\mu\text{A}$ bez zatížení s hrotem dva bez připojení k obvodu, je to malá cena za zlepšení.

Connection Diagrams

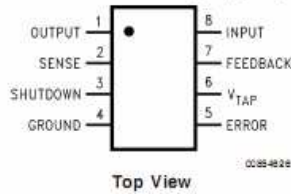
TO-92 Plastic Package (Z)



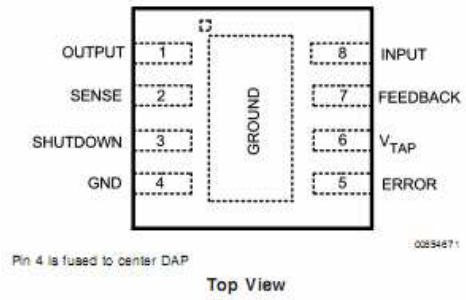
TO-252 (D-Pak)



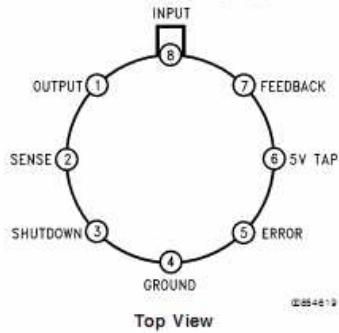
**Dual-In-Line Packages (N, J)
Surface-Mount Package (M, MM)**



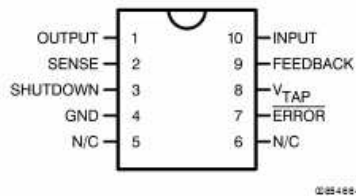
8-Lead LLP



Metal Can Package (H)



10-Lead Ceramic Surface-Mount Package (WG)



Obrázek 21 – Popis pouzder pro LP2951

3 POROVNÁNÍ PARAMETRŮ JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ STABILIZÁTORŮ

V této kapitole bude provedeno obecné porovnání parametrů jednotlivých druhů stabilizátorů. Konkrétní hodnoty některých parametrů budou uvedeny v praktické části u simulovaných zapojení.

3.1 Možná velikost vstupního a výstupního napětí

Velikost výstupního a vstupního napětí je klíčovou vlastností stabilizátoru napětí, která determinuje druh stabilizátoru na konkrétní aplikaci.

Z hlediska vstupního napětí jsou dva druhy stabilizátorů. A to s pevným, anebo s nastavitelným napětím. Pevné výstupní napětí (Zenerova dioda, obvod 78xx atd.) je výhodné pro aplikace, kde se dané napětí shoduje s potřebným stabilizovaným napětím, případně není požadována velmi přesná hodnota stabilizovaného napětí. Stabilizátory s nastavitelným výstupním napětím jsou vhodné v případech, kde je požadována hodnota stabilizovaného napětí, která není ve schopnostech stabilizátorů s pevným výstupním napětím. Stabilizátory s nastavitelným napětím mají udávanou hodnotu minimálního výstupního napětí, která je rovna hodnotě referenčního napětí. Toto napětí se dá snížit až k nule pomocí vnějších obvodů.

Rozsah možného vstupního napětí přímo souvisí s vlastní spotřebou stabilizátoru. Díky ní musí být minimální hodnota nestabilizovaného napětí o určitou hodnotu větší.

U parametrických stabilizátorů je minimální vstupní napětí dáno použitou stabilizační součástkou. Vstupní napětí se pak rozdělí mezi předřadný rezistor a stabilizační prvek (např. Zenerova dioda). Případný přebytek napětí pak zůstává na předřadném (srážecím) rezistoru. Z energetického hlediska to není efektivní.

3.2 Proudová zatížitelnost

Proudová zatížitelnost stabilizátoru je určena maximální dovolenou výkonovou ztrátou na stabilizujícím prvku (jde-li o diskrétní součástku) nebo výkonovou ztrátou na stabilizátoru (jde-li o integrovaný obvod), a nebo omezením maximálního proudu na součástce. Výkonová ztráta reprezentuje tepelné zničení součástky. Omezení maximálního

proudu zabraňuje elektrické poškození součástky (například destruktivní průraz PN přechodu)

Obecně se dá říci, že nejmenší proudovou zatížitelnost mají parametrické stabilizátory tvořené diodou nebo Zenerovou diodou (hodnoty dle typu). Dioda použitá v simulacích v praktické části má povolenou výkonovou ztrátu 250mW a maximální povolený špičkový proud 83mA. Zapojení stabilizátoru s tranzistorem jako stabilizačním prvkem značně zvyšuje proudovou zatížitelnost. Hodnota maximálního proudového zatížení závisí na tom, zda jde o „obyčejný“ anebo o výkonový tranzistor. Maximální proud I_C u obyčejného se pohybuje v desetinách ampéru, u výkonového v jednotkách ampér (cca 0,2A až 10A). Integrované obvody většinou mají vnitřní proudovou pojistku a jejich maximální proudové zatížení je uvedeno v katalogu. Jeho hodnoty se liší podle daného typu. Obvyklá hodnota bývá mezi 1A a 3A. Proto se občas doplňují obvody s externími tranzistory.

3.3 Vlastní spotřeba stabilizátoru

Z hlediska vlastní spotřeby by se daly stabilizátory rozdělit do dvou skupin,

tj. na stabilizátory se spotřebou danou stabilizujícím prvkem (např. Zenerova dioda)

a stabilizátory s minimalizovanou vlastní spotřebou (Low-Drop). Za normální vlastní spotřebu se dá považovat úbytek napětí cca 2-3V na činnost stabilizátoru. Stabilizátory Low-Drop mají úbytek napětí okolo 0,2V. V zapojeních integrovaných obvodů lze najít případy obou variant.

3.4 Klidový proudový odběr

Jedná se o ekvivalentní vlastnost k vlastní spotřebě stabilizátoru. Z hlediska vlastní spotřeby vykazují nejhorší vlastnosti parametrické stabilizátory. Zde se projevuje hlavně vliv předřadného rezistoru. U ostatních stabilizátorů je klidový proudový odběr roven minimální hodnotě proudu, při kterém ještě dochází ke stabilizaci napětí. Vliv má pochopitelně proudový odběr jednotlivých použitých součástek. Srovnání je k nalezení v praktické části.

3.5 Cena

Cena je vedle rozměrů a funkčních vlastností stabilizátorů dalším velmi důležitým parametrem. Nejlevnější stabilizátory napětí jsou parametrické s diodou nebo Zenerovou diodou. Tyto stabilizátory v základním zapojení se pohybují v rozsahu cca 2-4 koruny. Kombinací parametrických stabilizátorů se zpětnou vazbou se pak cena nepatrně zvýší. Nejdražší variantou jsou integrované obvody. Jejich cena se pohybuje v rozmezí desítek až stovek korun (cca 10 až 600 korun). Většina integrovaných stabilizátorů se vejde do cenové hladiny sta korun, pouze několik velmi kvalitních obvodů se pohybuje ve vyšších cenových hladinách.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 NÁVRH STABILIZÁTORU NA ZÁKLADĚ ZADANÝCH PARAMETRŮ

Na základě zadání vedoucím práce má být zkonstruován stabilizátor splňující následující požadavky:

- vstupní napětí: $\pm 12\text{V}$
- výstupní napětí: $1,5\text{V}$
- klidový proud (klidová spotřeba): co nejmenší

Proudové odběry zátěže:

- maximální proudový odběr: $46,3\text{ mA}$
- minimální proudový odběr: $4\text{ }\mu\text{A}$

Pomocí Ohmova zákona byly vypočítány mezní hodnoty ekvivalentního odporu zátěže.

A to:

$$R_{Z\min}=32,4\Omega$$

$$R_{Z\max}=375\text{k}\Omega$$

Za účelem realizace stabilizátoru byla provedena studie několika různých zapojení

a vyhodnoceny jejich parametry z hlediska použitelnosti k našim účelům. Obvody byly ověřeny s pomocí software „Multisim“, který umožňuje simulace blížící se experimentům na reálných obvodech. Popis vybraných obvodů a jejich simulací je uveden další části mé práce.

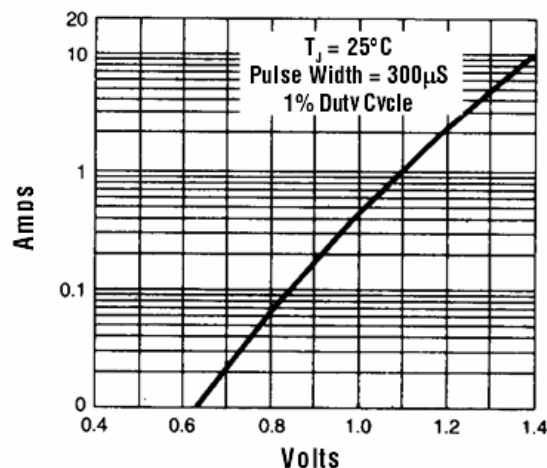
V této kapitole bude proveden návrh stabilizátoru podle zadaných parametrů pro různá zapojení. Pomocí simulací v programu MULTISM 10 bude ověřena jejich funkce a jejich vlastnosti.

4.1 Stabilizátor s diodou

Parametrický stabilizátor s diodou se zdá být nejjednodušším řešením pro stabilizaci malého napětí. Pomocí jedné diody lze přibližně dosáhnout stabilizovaného napětí v rozmezí 0,6 až 0,8V.

Pro simulaci tohoto zapojení byla zvolena dioda GP08A. Její charakteristika v propustném směru se nachází na obrázku 22.

Typical Instantaneous Forward Characteristics



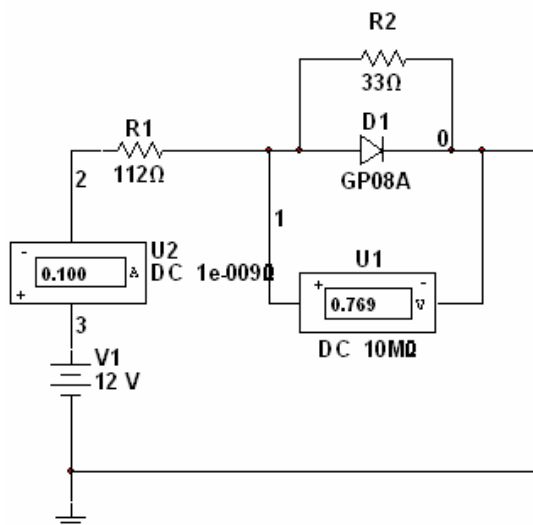
Obrázek 22 – Charakteristika v propustném směru diody GP08A

Proud diodou je třeba volit poněkud vyšší, a to z důvodu zachování funkce stabilizátoru a také proudové dimenzace diody. Celkový proud ($I_F + I_2$) tudíž stanovím na 100mA. Dle charakteristiky se stabilizované napětí, při proudu 100mA, bude pohybovat okolo 0,8V. Srážecí odpor se vypočte z rovnice 7.

$$R_s = \frac{U_1 - U_F}{I_1} = \frac{12 - 0,8}{0,1} = \frac{11,2}{0,1} = 112\Omega \quad (15)$$

Nyní známe vše potřebné pro sestavení simulačního zapojení, které se nachází na obrázku 23 (zapojení je převzato přímo ze simulací prováděných v programu „Multisim“).

V zapojení je R_1 předřadný odpor, D_1 je stabilizační dioda a R_2 představuje zátěž.



Obrázek 23 – Zapojení pro simulaci stabilizátoru s diodou

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty získané simulací.

Tabulka 2 – Nasimulované parametry zapojení s jednou diodou

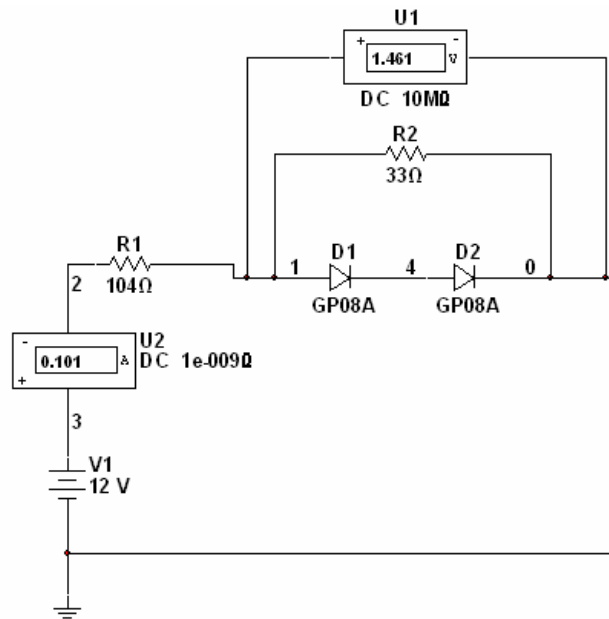
parametry na prázdkno		min proud. zatížení		max proud. zatížení	
I_q [mA]	U_o [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]
100	0,803	100	0,803	100	0,769

4.2 Stabilizátor s dvěma diodami

Zapojení se dvěma diodami je modifikací předchozího zapojení. Jeho hlavní výhodou je dosažení vyššího napájecího napětí. Podmínka pro realizaci zapojení se dvěma diodami je udržení pracovního bodu obou diod za kolenem charakteristiky v propustném směru. Předřadný odpor lze vypočítat z rovnice 15 s tím rozdílem, že U_F je dvojnásobek hodnoty při zapojení s jednou diodou.

Pro možnost srovnání použijí v simulaci stejného typu diody jako v předchozím případě.

$$R_s = \frac{U_1 - 2U_F}{I_1} = \frac{12 - 1,6}{0,1} = \frac{10,4}{0,1} = 104\Omega \quad (16)$$



Obrázek 24 – Zapojení stabilizátoru se dvěma diodami

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty získané simulací.

Tabulka 3 – Nasimulované parametry zapojení s dvěma diodami

parametry na prázdnou		min proud. zatížení		max proud. zatížení	
I_q [mA]	U_o [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]
100	1,605	100	1,605	101	1,461

Ze srovnání tabulek 2 a 3 je zřejmé, že stabilizace jednou diodou má lepší vlastnosti z hlediska změny zátěže. Dále obě zapojení nejsou vhodná pro praktickou realizaci, jelikož klidový proud je velký (z důvodu dimenzování proudu diodou). Zapojení s jednou diodou taktéž nevyhovuje z hlediska požadovaného napětí.

4.3 Stabilizátor se Zenerovou diodou

Jde o nejpoužívanější zapojení parametrického stabilizátoru (obrázek 3). Zenerovo napětí je zvoleno 2,2V. Zenerovo napětí je voleno s ohledem na možnost dosáhnout pomocí dalšího prvku (diody v propustném směru) požadovaného stabilizovaného napětí. Dále musí být dioda proudově naddimenzovaná. Maximální proud diodou budu volit z předpokladu, že zátěž nebude odpojena – jde o nejlepší možnost z hlediska malého

proudu diodou a dimenzace diody. Za tohoto předpokladu se volí $I_z > I_{2\min}$, kde I_z je proud diodou a $I_{2\min}$ je minimální zatěžovací proud. Zvolí se $I_z = I_{2\max}$. Tato volba je založena na skutečnosti, že minimální zatěžovací proud je velmi malý, tudíž skoro celý maximální zatěžovací proud bude protékat Zenerovou diodou. Vypočítáme ztrátový výkon na diodě:

$$P_{zD} = U_z \cdot I_z = 2,2 \cdot 47 \cdot 10^{-3} = 0,1034[W] \quad (17)$$

Z dostupných diod pro simulaci v programu Multisim byla zvolena Dioda 02BZ2.2

CHARACTERISTIC		SYMBOL	RATING	UNIT
Power Dissipation		P	250	mW
Surge Power Dissipation (Note 1)		PSURGE	1250	mW
Maximum(Peak) Zener Current		I _{ZM}	(Note 2)	mA
Junction Temperature		T _j	175	°C
Storage Temperature Range		T _{stg}	-65~175	°C

TYPE (Note 2)	ZENER VOLTAGE			ZENER IMPEDANCE		TEMPERATURE COEFFICIENT OF ZENER VOLTAGE		ZENER CURRENT I _Z (mA)	REVERSE CURRENT	REVERSE VOLTAGE	MAXIMUM (PEAK) ZENER CURRENT I _{ZM} (mA)
	V _Z (V)			r _d (Note 4) (Ω)		r _Z (%/°C)			I _R (μA)	V _R (V)	
	MIN.	TYP.	MAX.	TYP.	MAX.	TYP.	MAX.		MAX.		
02BZ2.2	1.88	2.2	2.56	15	28	-0.088	-0.100	10	10	1.0	82

Obrázek 25 – Katalogové údaje o diodě 02BZ2.2

Ze základního stabilizačního obvodu se Zenerovou diodou (obrázek 3) vyplývá, že zbývá jen vypočítat hodnotu předřadného odporu.

Pro výpočet hodnoty odporu zvolím rovnici :

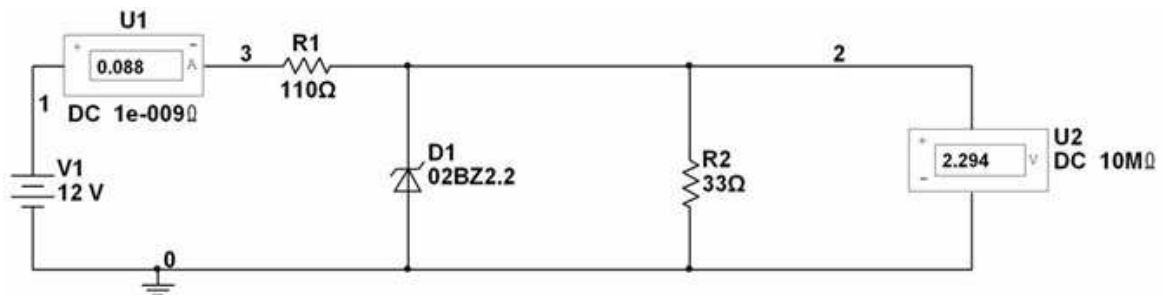
$$R_1 = \frac{U_1 - U_Z}{I_Z + I_2} = \frac{12 - 2,2}{0,047 + 0,047} = \frac{9,8}{0,09} = 108,8[\Omega] \quad (18)$$

Výkonová ztráta na rezistoru je:

$$P_{R1} = \frac{(U_1 - U_Z)^2}{R_1} = \frac{(12 - 2,2)^2}{110} = 0,873[W] \quad (19)$$

Na základě provedeného výpočtu volím rezistor R_1 , jako nejbližší vyšší standardizovanou hodnotu. Pro tento případ je tato hodnota 110Ω . Rezistor by měl mít povolenou výkonovou ztrátu $2W$.

Díky vypočítaným hodnotám lze sestavit obvod. Obrázek 26 znázorňuje, jak vypadá zapojení v simulačním programu. Odpor R_2 představuje zátěž.



Obrázek 26 – Zapojení simulace stabilizátoru se Zenerovou diodou

V programu Multisim byla provedena simulace, jejíž výsledky jsou zaznamenané v tabulce 4.

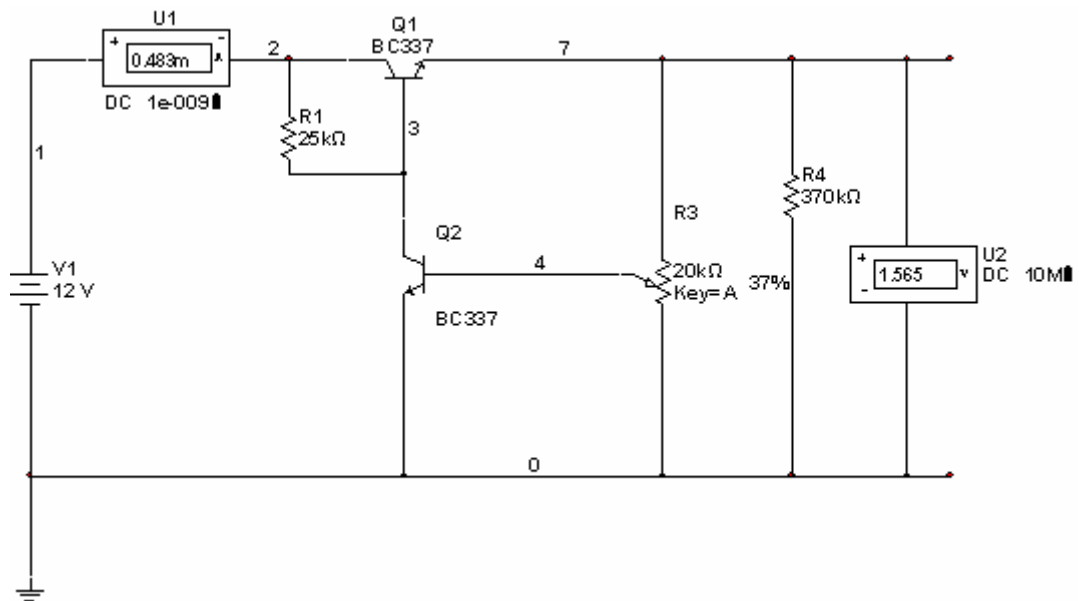
Tabulka 4 – Nasimulované parametry zapojení s Zenerovou diodou

parametry na prázdnou		min proud. zatížení		max proud. zatížení	
I_q [mA]	U_o [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]
100	1,605	100	1,605	101	1,461

Ze simulací vyplývá, že toto zapojení není vhodné pro zadané parametry z důvodu příliš velkého klidového odběru.

4.4 Parametrický stabilizátor se zpětnou vazbou pomocí dvou tranzistorů

Jedná se o parametrický stabilizátor s tranzistorem jako stabilizační součástí (na obrázku zapojení Q_1). Zapojení je velmi podobné zapojení na obrázku 6. Jediný rozdíl je, že není použitý zdroj referenčního napětí (Zenerova dioda). Pomocí rezistoru R_1 je nastaven pracovní bod tranzistoru 1 (Q_1). Zpětnovazební napětí (poměrná část výstupního) je přiváděno pomocí napěťového děliče na bázi tranzistoru 2 (Q_2). Pokud výstupní napětí vzroste otevře se tranzistor 2 (Q_2), tím se přivírá tranzistor 1 (Q_1). Zvyšování hodnot rezistorů má negativní vliv na stabilizaci.



Obrázek 27 – Zapojení zpětnovazebního stabilizátoru pomocí dvou tranzistorů

Simulace tohoto zapojení byla brána jako experiment, jelikož nebyly nalezeny konkrétní rovnice pro stanovení hodnot rezistorů. V následující tabulce jsou zaznamenány nejlepší dosažené výsledky.

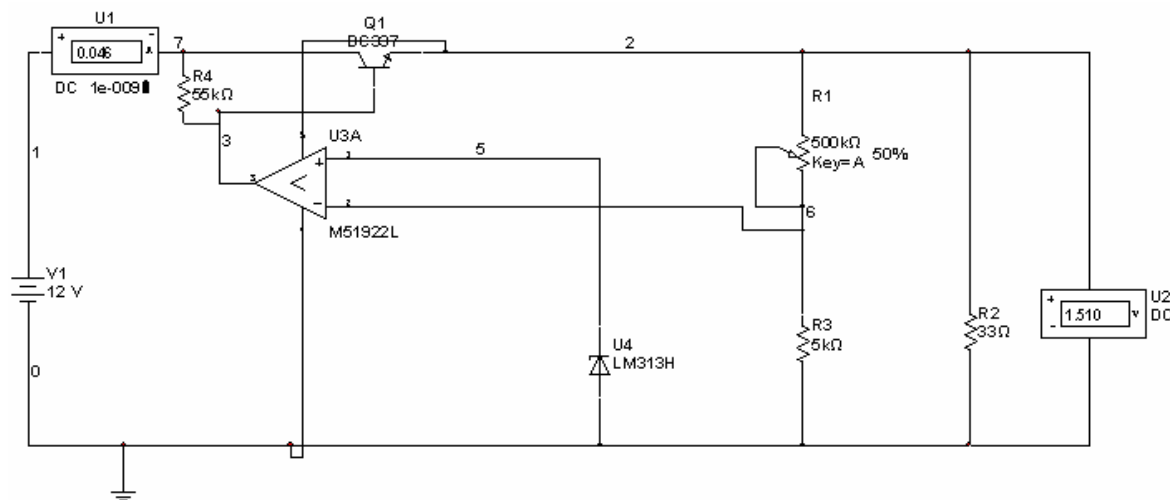
Tabulka 5 – Nasimulované parametry zpětnovazebního stabilizátoru se dvěma tranzistory

parametry na prázdnno		min proud. zatížení		max proud. Zatížení	
I_q [mA]	U_o [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]
0,478	1,524	0,481	1,524	46	1,474

Výsledky simulace vykazují přijatelnou velikost klidového proudového odběru. Stabilizace napětí vzhledem k změně zátěže není optimální, ale ještě se nachází v přijatelných mezích. Tyto meze stanovuje reálné chování alkalického 1,5V článku.

4.5 Parametrický stabilizátor se zpětnou vazbou s OZ

Zvolené zapojení reprezentuje klasické zapojení parametrického stabilizátoru se zpětnou vazbou. Jako stabilizační součástka je použit tranzistor, obvod pro referenci napětí LM313H a ve zpětné vazbě je použit operační zesilovač. Zdroj referenčního napětí LM313 má napětí 1,28V. Rezistor R4 slouží k nastavení pracovního bodu stabilizačního tranzistoru. Hodnoty jednotlivých rezistorů byly určeny experimentálně.



Obrázek 28 – Simulační zapojení zpětnovazebního stabilizátoru s OZ

Zapojení na obrázku 28 bylo nasimulováno v programu Multisim, dosažené výsledky jsou zaznamenány v tabulce 6.

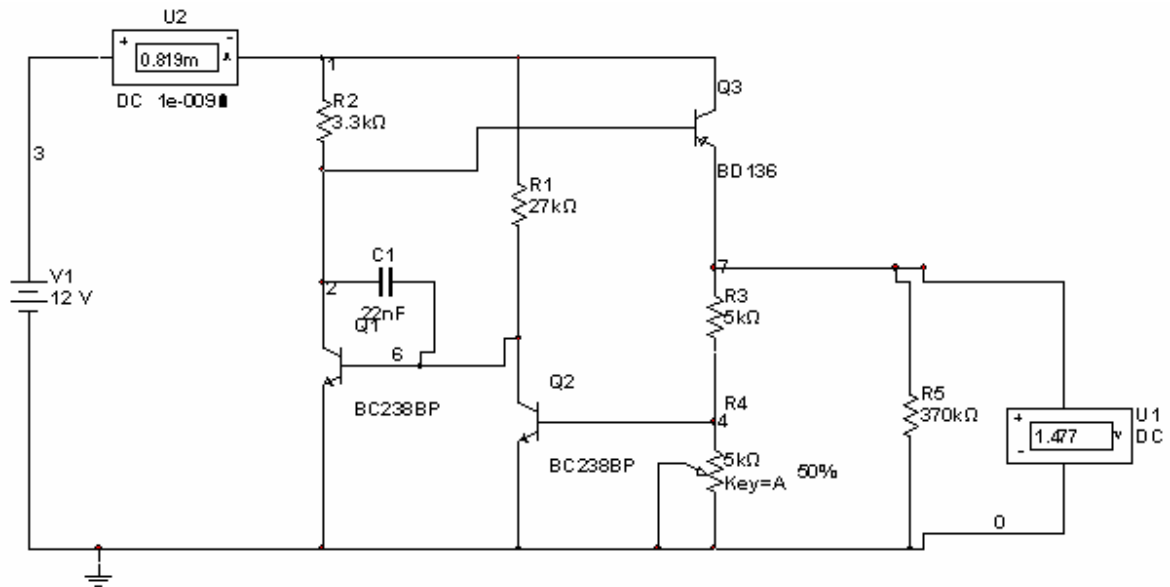
Tabulka 6 – Nasimulované parametry zpětnovazebního stabilizátoru s OZ

parametry na prázdkno		min proud. zatížení		max proud. Zatížení	
I_q [mA]	U_o [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]
0,368	1,516	0,372	1,516	46	1,51

Dosažené parametry jsou ještě lepší než v předchozím případě.

4.6 Parametrický stabilizátor se zpětnou vazbou pomocí 3 tranzistorů

Princip tohoto zapojení je vysvětlen v kapitole 2.2.3. Jedná se o atypické zapojení zpětnovazebního stabilizátoru, v němž neexistuje referenční zdroj napětí, pouze se přivádí část výstupního napětí do zpětné vazby.



Obrázek 29 – Simulační zapojení stabilizátoru ze tří tranzistorů

Simulační schéma je na obrázku 29. Hodnoty rezistorů jsou převzaty ze zdrojové literatury. Výsledky simulace jsou zaneseny v tabulce 7.

Tabulka 7 – Nasimulované parametry stabilizátoru ze tří tranzistorů

parametry na prázdkno		min proud. zatížení		max proud. Zatížení	
I_q [mA]	U_o [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]
0,876	1,695	0,818	1,513	128	3,689

Z nasimulovaných parametrů lze usoudit, že toto zapojení nefunguje uspokojivě. Simulace prokázala dobrou funkčnost pouze do zatížení odpovídajícímu odporu zátěže o hodnotě 1kΩ.

4.7 Stabilizátor s obvodem typu 723

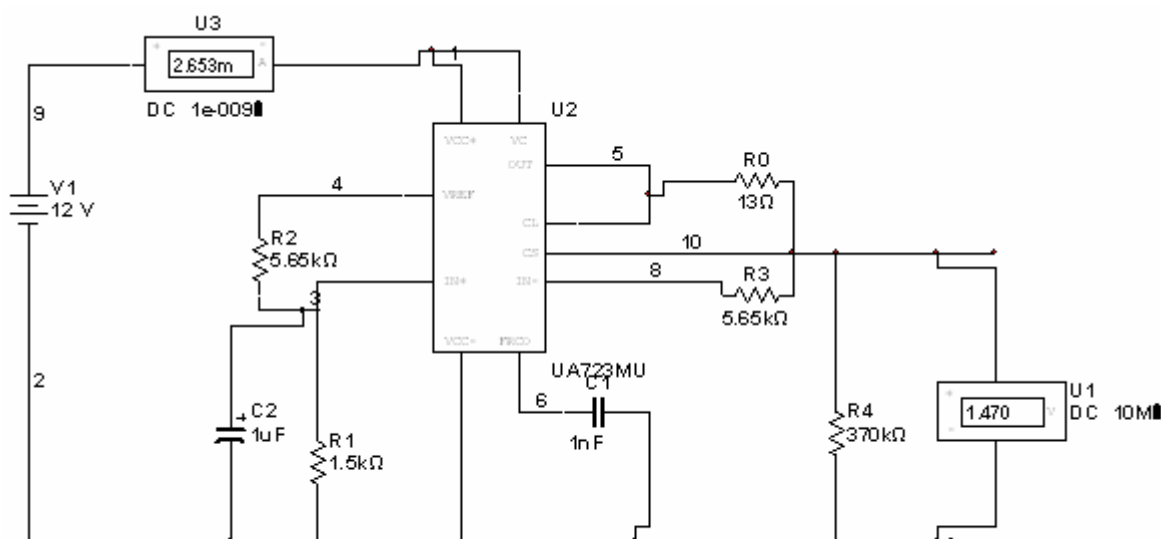
V této kapitole bude provedena simulace stabilizátoru napětí s integrovaným obvodem typu 723. Integrovaný obvod vyráběl i český podnik Tesla pod označením MAA723.

$$R_0 = \frac{0,6}{0,047} = 13\Omega \quad (24)$$

Kondenzátor C_3 má výrobcem doporučenou hodnotu $C_3 = 1000 \text{ pF}$.

Kondenzátor C_2 filtruje dodatečně vydělené referenční napětí a jeho hodnota není kritická, obvykle se volí $1 \div 10 \mu\text{F}$. Kondenzátor C_1 je součástí předřazeného usměrňovače a jeho hodnota se volí tak, aby zvlnění napětí U_1 nepřesáhlo $10\% U_2$.

Z výše uvedených údajů lze sestavit simulační zapojení, které se nachází na obrázku 31.



Obrázek 31 – Zapojení stabilizátoru s obvodem typu 723 pro simulaci

Tabulka 8 – Nasimulované parametry stabilizátoru s obvodem typu 723

parametry na prázdkno		min proud. zatížení		max proud. zatížení	
I_q [mA]	U_o [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]
2,649	1,47	47	1,465	2,653	1,47

4.8 Stabilizátor s obvodem LM317 v základním zapojení

Základní poznatky k obvodu LM317 byly uvedeny v kapitole 2.3.4.. Pro první ze simulací s obvodem LM317 bylo zvoleno základní zapojení (Obrázek 14) bez filtračních kondenzátorů. Výrobce obvodu udává vztah mezi výstupním a referenčním napětím podle rovnice 19. Proud vlastní spotřeby obvodu (I_{ADJ}) je typicky $50\mu A$ a referenční napětí U_{REF} je rovno $1,25V$.

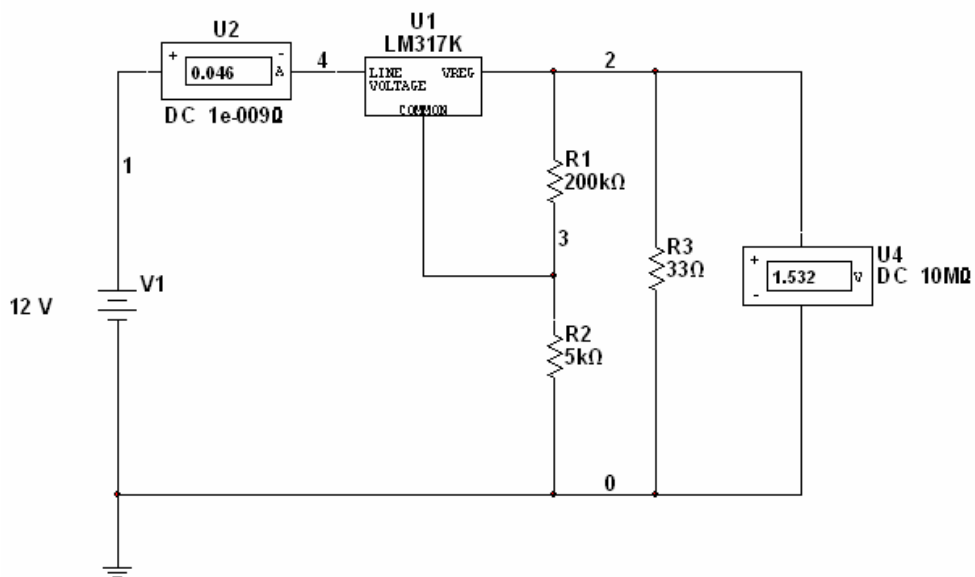
$$U_2 = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{ADJ} \cdot R_2 \quad (25)$$

Pomocí rovnice 19 se hledají hodnoty rezistorů R_1 a R_2 . Na internetu jsou k nalezení online kalkulátory, které tyto hodnoty vypočítávají a některé taky počítají i další veličiny, jako například proudy rezistory a výkonový úbytek na nich. Jeden z těchto kalkulátorů jsem použil (zdroj 9). Pomocí simulace lze lehce ověřit správnost jeho výpočtu.

Po několika experimentech byly pomocí kalkulátoru vybrány hodnoty odporů následovně:

- $R_1=200k\Omega$
- $R_2=5k\Omega$

Tyto hodnoty by měly výstupní napětí nastavit na $1,53V$ při velmi nízkém klidovém proudu.



Obrázek 32 – Zapojení stabilizátoru s obvodem LM317

Simulace tohoto zapojení s vypočítanými rezistory dopadla velmi dobře. Simulace ukázala možnost splnění podmínky malého klidového proudového odběru při zachování velmi velkého činitele stabilizace. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 9. Toto zapojení bude prakticky zkonstruováno.

Tabulka 9 – Nasimulované parametry stabilizátoru s LM317 v základním zapojení

parametry na prázdnou		min proud. zatížení		max proud. zatížení	
I_q [mA]	U_o [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]
0,055	1,532	0,06	1,532	46	1,532

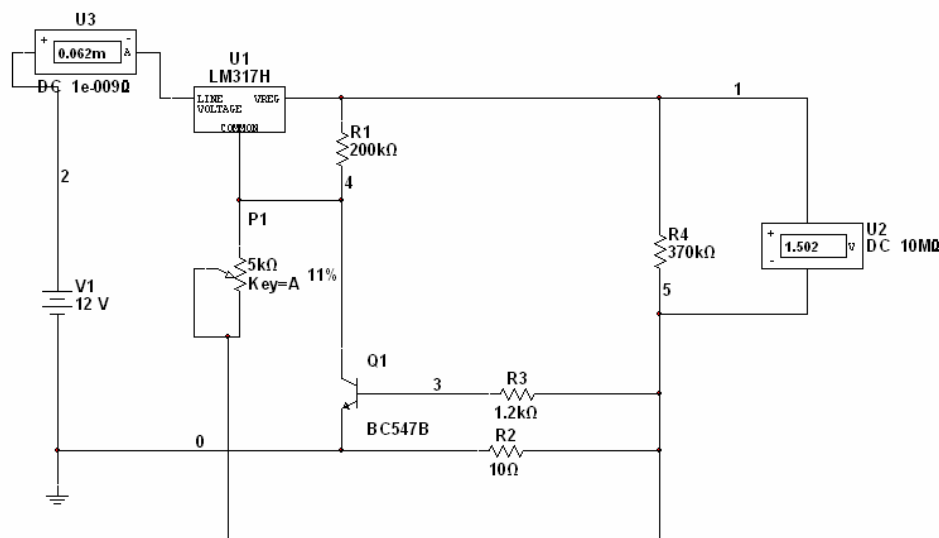
4.9 Stabilizátor s obvodem LM317 s omezením výstupního proudu

Jde o modifikaci zapojení použitého v předcházející kapitole. Oproti základnímu zapojení jsou přidány další externí součástky (tranzistor a odpory), které zajišťují omezení výstupního proudu ze stabilizačního obvodu. Tranzistor 1 (Q_1) pracuje jako proudová pojistka. Vzroste-li proud nad nastavenou mez, zvedne se úbytek napětí na rezistoru R_2 na 0,65V a tím se otevře tranzistor 1. Otevření tranzistoru 1 má za následek zmenšení napětí na vývodu ADJ a také zmenšení výstupního napětí. Výstupní napětí pak neodpovídá původní nastavené hodnotě.

Hodnota rezistoru R_2 se vypočítá ze vztahu:

$$I = \frac{0,65}{R} \quad (26)$$

Pomocí vztahu 26 je stanovena hodnota $R_2=10\Omega$



Obrázek 33 – Zapojení stabilizátoru s LM317 s omezením výstupního proudu

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky simulací tohoto obvodu.

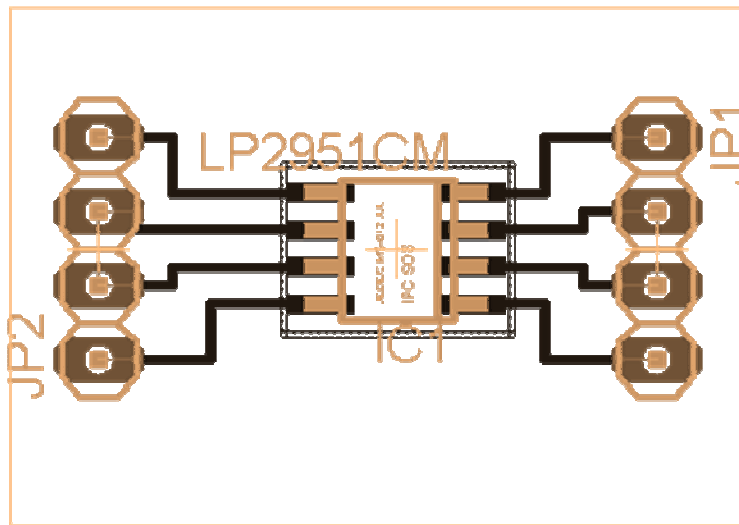
Tabulka 10 – Nasimulované parametry stabilizátoru s LM317 s proudovou ochranou

parametry na prázdnou		min proud. zatížení		max proud. zatížení	
I_q [mA]	U_o [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]
0,057	1,501	0,062	1,501	45	1,496

4.10 Stabilizátor s obvodem LP2951

Stabilizátor s obvodem LP2951 nelze nasimulovat v programu Multisim, jelikož spice model (programátorský model popisující chování součástky, používající se při simulacích), který používá software Multisim, pro tento obvod nelze nalézt. Pro ověření jeho vlastností

bude prakticky zkonstruován přípravek, pomocí nějž se budou zkoumat vlastnosti stabilizátoru s tímto obvodem.



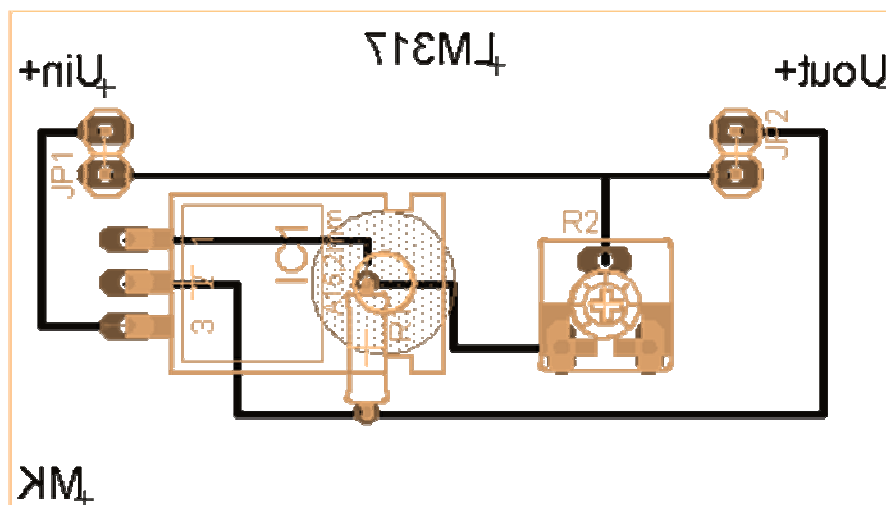
Obrázek 34 – Přípravek na zkušební zapojení stabilizátoru s obvodem LP2951

Návrh obvodu je velmi obdobný jako u stabilizátoru s LM317. Stabilizátor s obvodem LP2951 bude zapojen v základním zapojení doporučeným v datasheetu (obrázek 20). Základní rovnice pro stanovení rezistorů nastavujících výstupní napětí (rovnice 14) je shodná s rovnicí pro obvod LM317. Dle teoretických poznatků by mělo být dosaženo přibližně stejných výsledků jako při simulaci s obvodem LM317 v základním zapojení.

5 PRAKTICKÁ KONSTRUKCE OBVODŮ

Na vytvoření desek plošných spojů byl použit softwarový program Eagle v4.16. V prostředí tohoto programu lze vytvořit schéma zapojení pomocí knihoven součástek. Další možnosti, které program nabízí, jsou editace součástek (fyzické velikosti, počet pinů atd.) nebo také vytvoření vlastní součástky. Vytvořené schéma zapojení se importuje do editoru plošných spojů. V tomto editoru se pomocí přesunů a rotací součástek dá zvolit nejvhodnější pozice pro dané součástky a pospojovat je vodivými spoji. Program nabízí i automatické umístění a pospojování součástek, ale tento režim není vždy ideální.

První z konstruovaných obvodů je základní zapojení stabilizátoru s LM317. Vstupní a výstupní napětí bude ve finální fázi připojeno přes šroubovací nebo zástrčné konektory.



Obrázek 35 – DPS stabilizátoru s LM317

Při realizaci stabilizátoru s LM317 se vyskytly problémy. Při použití navržených odporů obvod nefunguje. Za nefunkčnost obvodu zřejmě může vliv velikosti rezistoru R_1 na I_{ADJ} a také nutnost určitého minimálního zatížení. Při návrhu hodnot rezistorů použitých v simulaci bylo vycházeno z předpokladu $I_{ADJ}=55\mu A$ (rovnice 27)

$$\begin{aligned}
 U_{výst} &= U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{ADJ} \cdot R_2 = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{5 \cdot 10^3}{200 \cdot 10^3}\right) + 55 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3 = \\
 &= 1,25 + 0,03125 + 0,275 = 1,556V
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

Pomocí experimentů byly stanoveny nové hodnoty rezistorů, při kterých stabilizátor funguje. Pro rezistor R_1 jde o hodnotu $1k\Omega$ a pro rezistor R_2 je nevhodnější hodnota 200Ω .

Rovnice pro stanovení výstupního napětí pro nové hodnoty rezistorů:

$$\begin{aligned}
 U_{výst} &= U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{ADJ} \cdot R_2 = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{200}{1 \cdot 10^3}\right) + 55 \cdot 10^{-6} \cdot 200 = \\
 &= 1,25 + 0,25 + 0,011 = 1,511V
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

Vlastnosti obvodu s těmito rezistory jsou uvedené v následující tabulce.

Tabulka 11 – Parametry reálného stabilizátoru s LM317

parametry na prázdkno		min proud. zatížení		max proud. zatížení	
I_q [mA]	U_o [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]
1,3	1,59	1,3	1,534	49	1,499

Z porovnání tabulek 9 a 11 a rovnic 27 a 28 lze usoudit, že rovnice, kterou udává výrobce s jistou tolerancí platí.

Druhý prakticky zapojený obvod je stabilizátor se zpětnou vazbou tvořený dvěma tranzistory (kapitola 4.4). Obvod v simulaci vykazoval slušné vlastnosti. Cílem praktického zapojení je jejich ověření nebo vyvrácení. K tomuto kroku bylo přistoupeno po zkušenosti s realizací stabilizátoru s LM317. V praktické realizaci byly pozměněny hodnoty součástek na dostupné hodnoty, tj. $R_1=22k\Omega$ a trimr $25k\Omega$.

V následující tabulce jsou zaznamenány výsledky testů praktického zapojení.

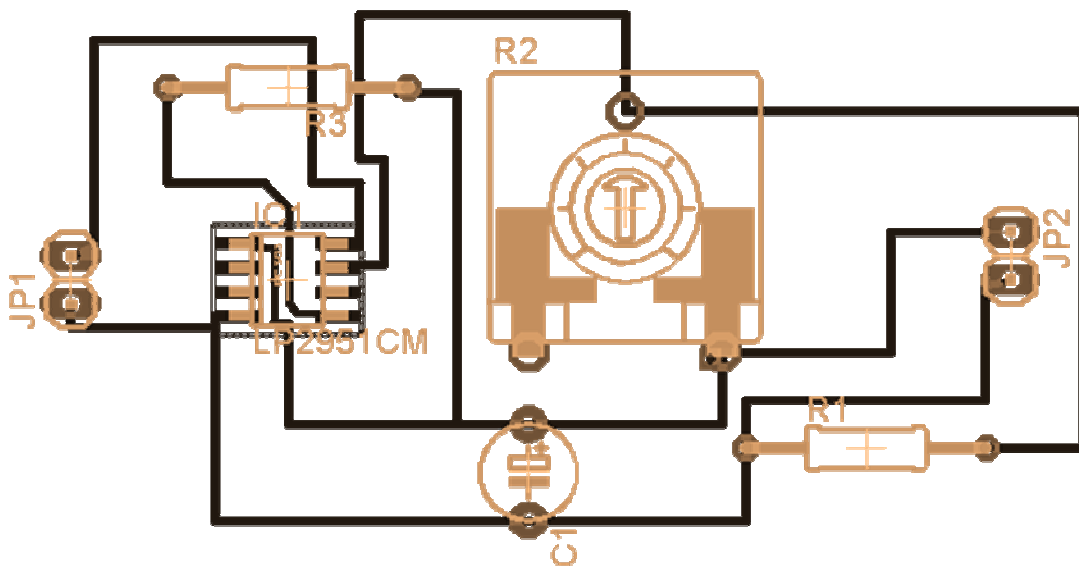
Tabulka 12 – Parametry reálného stabilizátoru s dvěma tranzistory

parametry na prázdkno		min proud. zatížení		max proud. zatížení	
I_q [mA]	U_o [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]
0,48	1,67	0,48	1,67	47,3	1,36

I při této realizaci jsou výsledky jiné než v simulaci. Může to být důsledkem výrobních odchylek nebo jiných vlivů (hodnoty rezistorů atd.).

Poslední realizovaný obvod je stabilizátor s integrovaným obvodem LP2951. Zapojení tohoto obvodu bylo převzato z katalogového listu jako základní zapojení pro tento obvod. V programu Eagle byla vytvořena deska plošného spoje (obrázek 36). Jako součástky byly použity:

- $R_1=900k\Omega$
- $R_2=500k\Omega$ - Trimr
- $R_3=100k\Omega$
- $C_1=3,3\mu F$



Obrázek 36 – DPS pro stabilizátor s IO LP2951

Zapojení s uvedenými součástkami bylo dosaženo vlastností, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 13 – Parametry reálného stabilizátoru s LP2951

parametry na prázdkno		min proud. zatížení		max proud. zatížení	
I_q [mA]	U_o [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]	I_{in} [mA]	U_z [V]
0,061	1,49	0,065	1,49	47,3	1,48

Z výsledků uvedených v tabulce lze usoudit, že stabilizátor s obvodem LP2951 nejlépe vyhovuje požadovaným parametrům a tudíž bude prakticky použit.

ZÁVĚR

V práci byl vypracován přehled základních zapojení používaných pro stabilizaci napětí. Vlastnosti zapojení byly obecně porovnány z hlediska funkčních vlastností a ceny. Z porovnání vyplynulo, že integrované obvody pro stabilizaci napětí mají většinou lepší vlastnosti. V praktické části byly obvody simulovány a některé i sestrojeny prakticky. Porovnáním simulací a praktických realizací byly zjištěny některé rozdílnosti. Simulace nezohledňují některé fyzické vlastnosti součástek a taky nemůžou postihnout tolerance vlastností, které vznikají při výrobě. Praktická část také ukázala, že v některých vlastnostech mohou být lepší klasická zapojení než integrované obvody. Ale také ukázala že ona lepší vlastnost je vykoupena jinou horší vlastností. Jako nejlepší řešení ze zkoumaných možností se ukázal obvod LP2951.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The work was a basic overview of the involvements used to stabilize the voltage.

Properties of involvements were generally against the involvements in terms of functional properties and prices. The comparison showed that integrated circuits for voltage stabilization are usually better properties. The practical part of the districts were circuits simulated and some of them made practice. Comparing simulations and practical implementation have been identified some differences. Simulations do not take into account certain physical characteristics of components and also can't affect tolerances of characteristics that arise in the production. Practical also showed that some properties can be better than the traditional involvement of integrated circuits. But they also showed that the better feature is dealt worse other properties. The best solution of the investigated options proved circuit LP2951.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Novotný Vl., Vorel P., Patočka M., Napájení elektronických zařízení :Přednášky . VUT Brno Fakulta elektrotechniky a informačních technologií Ústav radioelektroniky
- [2] Krejčířík Alexandr. Lineární napájecí zdroje. BEN. Praha 2005. ISBN 80-7300-002-4
- [3] Marek Stabrowski. Stabilizátory stejnosměrného napětí a proudu. SNTL. Praha 1975 .
- [4] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Stabiliz%C3%A1tor>
- [5] www.hellweb.cz
- [6] <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1858-Stejnoserne-zdroje-napeti.html>
- [7]<http://www.datasheetarchive.com/search.php?t=0&q=lm317&manyst=&sub.x=0&sub.y=0>
- [8]<http://www.datasheetarchive.com/search.php?t=0&q=7805&manyst=&sub.x=0&sub.y=0>
- [9]<http://www.elektronika.opatnet.cz/storage/www/lm317/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

B	-	přenos napětí
D	-	dioda
h_{21}	-	proudový zesilovací činitel
I_2	-	proud zatěží
$I_{2\max}$	-	maximální proud do zátěže
$I_{2\min}$	-	minimální proud do zátěže
I_Z	-	proud při Zenerovém napětí
I_Z	-	proud Zenerovou diodou
K	-	teplotní součinitel
P	-	přenos zvlnění
P	-	potenciometr
P'	-	logaritmický přenos zvlnění
P_{R1}	-	výkonová ztráta na rezistoru R_1
P_{ZD}	-	ztrátový výkon Zenerovy diody
R_O	-	vnitřní odpor
R_s	-	předřadný (srážecí) rezistor
R_x	-	rezistor x
S	-	činitel stabilizace
T	-	tranzistor
U_1	-	vstupní napětí
U_2	-	výstupní napětí
U_{BE}	-	napětí báze-emititor
U_F	-	propustné napětí diody
U_{in}	-	vstupní napětí
U_{out}	-	výstupní napětí
U_{vst}	-	vstupní napětí
U_{vyst}	-	výstupní napětí
U_Z	-	Zenerovo napětí

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Příklady zapojení parametrických stabilizátorů napětí	13
Obrázek 2 - Příklad zapojení parametrického stabilizátoru napětí	14
Obrázek 3 – Zapojení parametrického stabilizátoru se Zenerovou diodou	15
Obrázek 4 – Nejjednodušší zapojení sériového stabilizátoru	16
Obrázek 5 – Blokové schéma zpětnovazebního stabilizátoru	18
Obrázek 6 – Zpětnovazební stabilizátor s tranzistorem jako zesilovačem odchylky	19
Obrázek 7 - Zpětnovazební stabilizátor s OZ jako zesilovačem odchylky.....	20
Obrázek 8 – Zapojení zpětnovazebního stabilizátoru bez referenčního napětí	20
Obrázek 9 – Obvyklé zapojení obvodu řady 79xx	21
Obrázek 10 – Zapojení stabilizátoru záporného napětí v opačné funkci.....	22
Obrázek 11 – Blokové schéma stabilizátoru s pevným výstupním napětím řady 78xx	23
Obrázek 12 – Ukázkové zapojení stabilizačního obvodu řady 78xx.....	23
Obrázek 13 – Blokové schéma vnitřního zapojení obvodu LM317	26
Obrázek 14 – Základní zapojení s LM 317.....	26
Obrázek 15 – Pouzdra pro LM317 a označení vývodů	27
Obrázek 16 - Typy obvodů LM317	27
Obrázek 17 – Ovládání stabilizátoru NPN a PNP tranzistorem	28
Obrázek 18 – Blokové schéma obvodu lp2951	30
Obrázek 19 – Maximální parametry obvodu LP2951	30
Obrázek 20 – Typické zapojení stabilizátoru LP2951	31
Obrázek 21 – Popis pouzder pro LP2951	33
Obrázek 22 – Charakteristika v propustném směru diody GP08A.....	39
Obrázek 23 – Zapojení pro simulaci stabilizátoru s diodou	40
Obrázek 24 – Zapojení stabilizátoru se dvěma diodami	41
Obrázek 25 – Katalogové údaje o diodě 02BZ2.2.....	42
Obrázek 26 – Zapojení simulace stabilizátoru se Zenerovou diodou.....	43
Obrázek 27 – Zapojení zpětnovazebního stabilizátoru pomocí dvou tranzistorů.....	44
Obrázek 28 – Simulační zapojení zpětnovazebního stabilizátoru s OZ	45
Obrázek 29 – Simulační zapojení stabilizátoru ze tří tranzistorů	46
Obrázek 30 – Typické zapojení obvodu typu 723 pro napětí menší než 7,5V	47
Obrázek 31 – Zapojení stabilizátoru s obvodem typu 723 pro simulaci	48
Obrázek 32 – Zapojení stabilizátoru s obvodem LM317	50

Obrázek 33 – Zapojení stabilizátoru s LM317 s omezením výstupního proudu	51
Obrázek 34 – Přípravek na zkušební zapojení stabilizátoru s obvodem LP2951	52
Obrázek 35 – DPS stabilizátoru s LM317	53
Obrázek 36 – DPS pro stabilizátor s IO LP2951	55

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Maximální parametry obvodu LM317.....	25
Tabulka 2 – Nasimulované parametry zapojení s jednou diodou.....	40
Tabulka 3 – Nasimulované parametry zapojení s dvěma diodami	41
Tabulka 4 – Nasimulované parametry zapojení s Zenerovou diodou	43
Tabulka 5 – Nasimulované parametry zpětnovazebního stabilizátoru se dvěma tranzistory.....	44
Tabulka 6 – Nasimulované parametry zpětnovazebního stabilizátoru s OZ	45
Tabulka 7 – Nasimulované parametry stabilizátoru ze tří tranzistorů	46
Tabulka 8 – Nasimulované parametry stabilizátoru s obvodem typu 723.....	48
Tabulka 9 – Nasimulované parametry stabilizátoru s LM317 v základním zapojení	50
Tabulka 10 – Nasimulované parametry stabilizátoru s LM317 s proudovou ochranou.....	51
Tabulka 11 – Parametry reálného stabilizátoru s LM317.....	54
Tabulka 12 – Parametry reálného stabilizátoru s dvěma tranzistory	55
Tabulka 13 – Parametry reálného stabilizátoru s LP2951	56

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY