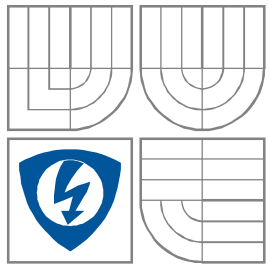


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

SPÍNANÉ MĚNIČE S OBVODY TOPSWITCH

SWITCHING POWER SUPPLIES BASED ON TOPSWITCH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

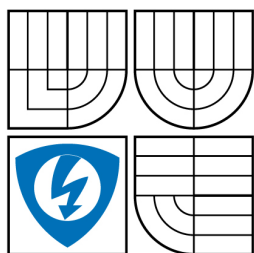
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Robert Wolfshörndl

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Robert Wolfshörndl

ID: 98565

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Spínané měniče s obvody TOP Switch

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se podrobně s využitím obvodů TOP Switch pro spínané DC/DC měniče napájené z elektrorozvodné sítě. Navrhněte silovou část dvou zdrojů s pevným výstupním napětím s melým a větším výkonem využívajícím obvody TOP Switch.

Navrhněte celkové zapojení dvou zdrojů včetně ochranných obvodů a mechanického provedení. Navrhněte desky plošných spojů. Zdroje realizujte a oživte. Změřte základní parametry jednotlivých zdrojů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KREJČIŘÍK, A. Spínané napájecí zdroje s obvody TOP Switch. Praha: BEN - technická literatura, 2002.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 5.6.2009

Vedoucí práce: Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Název práce:

Spínané měniče s obvody TOPSwitch

Autor: Robert Wolfshörndl

Obor: Elektronika a sdělovací technika

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jiří Šebesta, Ph.D. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, Vysoké učení technické v Brně

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá využitím obvodů TOPSwitch pro spínané DC/DC měniče napájené z elektrorozvodné sítě. Hlavním obsahem práce je samotný program (Excelovská tabulka), který provádí veškeré výpočty nutné pro výběr optimálního obvodu TOPSwitch, transformátoru, zpětnovazebního obvodu a externích součástí, nutných pro sestavení spínaného zdroje. První kapitola obecně popisuje popis a rozdělení spínaných zdrojů s transformátorem. Následující tři části práce popisují základní parametry jednotlivých výrobních řad obvodů TOPSwitch. Další kapitola popisuje postup návrhu spínaného zdroje (krok za krokem) s využitím Excelovského programu. Poslední tři kapitoly práce se zabývají konkrétním návrhem spínaného zdroje včetně konstrukce transformátoru a změření základních parametrů zkonstruovaného zdroje.

Klíčová slova: zdroj, TOPSwitch, program, konstrukce

Title:

Switching Power Supplies Based on TOP Switch

Author: Robert Wolfshörndl

Abstract:

This bachelor's thesis deals with the use of the TOPSwitch switching devices for DC / DC converters powered from the supply voltage 230 VAC. The main part of the Semestral thesis is a program (MS Excel sheet), which conducts all the calculations necessary for the selection of the optimum TOPSwitch device, transformer, feedback circuit and external components required for the design of the switching power supply. The first chapter of the Semestral thesis contains the general description and categorization of the switching power supplies utilizing the transformer. The following three chapters concern themselves with the basic parameters of each of the TOPSwitch device production series. Next chapter describes the step-by-step technique of the switching power supply design using the Excel program. The last three chapters deal with the design of the specific switching power supply, including the design of a transformer and measure the basic parameters designed resources.

Key words: power supply, TOPSwitch, program, design

Bibliografická citace mé práce:

WOLFSHÖRNDL, R. *Spínané měniče s obvody TOP Switch*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 41 s., 3 přílohy.

Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Spínané měniče s obvody TOPSwitch jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Šebestovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Obecně o spínaných zdrojích s transformátorem	1
2.1	Základní princip	1
2.2	Základní zapojení spínaných zdrojů.....	2
2.2.1	Propustné zapojení	2
2.2.2	Akumulující (blokuující) zapojení	2
3.	Základní uspořádání spínaného zdroje s obvodem TOPSwitch	3
4.	Obecně o TOPSwitch	3
4.1	Přednosti.....	3
4.2	Nevýhody	4
4.2.1	Obvody TOPSwitch první generace.....	4
4.2.2	Popis obvodu	4
4.3	Obvody TOPSwitch druhé generace	6
4.4	Obvody TOPSwitch řady FX	6
4.4.1	Přednosti.....	7
4.4.2	Popis obvodu	7
4.5	Obvody TOPSwitch řady GX	8
4.5.1	Přednosti.....	8
4.5.2	Popis obvodu	8
4.6	Obvody TOPSwitch řady HX	9
4.6.1	Přednosti.....	9
4.6.2	Popis obvodu	9
5.	Návrh spínaného zdroje.....	10
5.1	Vývojový diagram návrhu spínaného zdroje	11
5.2	Postup návrhu krok za krokem.....	12
5.2.1	Zadání vstupních a výstupních parametrů, volba zpětnovazebního obvodu.....	12
5.2.2	Výpočet maximálního / minimálního vstupního napětí a výstupního výkonu.....	14
5.2.3	Výpočet (volba) parametrů vstupního kondenzátoru	14
5.2.4	Výpočet maximálního / minimálního vstupního stejnosměrného napětí.....	15
5.2.5	Zadání velikosti zpětného indukovaného napětí	15
5.2.6	Výpočet velikosti omezovacího napětí, Zenerova omezovacího napětí a maximálního napětí na obvodu TOPSwitch.....	15
5.2.7	Nastavení hodnoty napětí kolektor-emitor (DRAIN-SOURCE)	16
5.2.8	Výpočet maximální hodnoty střídavy	16
5.2.9	Zadání koeficientu poměru zvlněného a špičkového proudu.....	16
5.2.10	Výpočet střední hodnoty / špičkové hodnoty / efektivní hodnoty vstupního proudu.....	16
5.2.11	Výpočet minimální hodnoty limitního proudu.....	16
5.2.12	Volba kmitočtu spínání a obvodu TOPSwitch, zadání hodnoty koeficientu pro externí nastavení hodnoty limitního proudu	16
5.2.13	Výpočet externě redukováného limitního proudu a výpočet teploty přechodů čipu.....	17
5.2.14	Kontrola špičkové hodnoty primárního proudu vzhledem k nastavenému limitnímu proudu.....	17
5.2.15	Výpočet indukčnosti primárního vinutí transformátoru.....	18
5.2.16	Výběr typu jádra a cívky a zadání šířky okrajů.....	18
5.2.17	Nastavení počtu vrstev primárního vinutí cívky, konstanty transformátoru a napětí na výstupních usměrňovacích diod	18

5.2.18	Výpočet počtu závitů primárního a zpětnovazebního vinutí.....	18
5.2.19	Určení vnějšího průměru vodiče primárního vinutí	18
5.2.20	Volba čistého průměru vodiče primárního vinutí	19
5.2.21	Výpočet hustoty magnetického toku v jádře (magnetická indukce)	19
5.2.22	Kontrola vypočtené hustoty magnetického toku v jádře	19
5.2.23	Určení mezery v jádře a proudové kapacity vodiče	19
5.2.24	Kontrola vypočtené mezery v jádře	19
5.2.25	Kontrola vypočtené proudové kapacity vodiče	19
5.2.26	Změna počtu vrstev primárního vinutí cívky a konstanty transformátoru	20
5.2.27	Výpočet magnetické indukce při zvoleném koeficientu externího nastavení limitního proudu	20
5.2.28	Kontrola vypočtené magnetické indukce při zvoleném koeficientu externího nastavení limitního proudu	20
5.2.29	Výpočet velikosti napětí na jeden závit vinutí	20
5.2.30	Výpočet špičkové / efektivní hodnoty sekundárního proudu a poměru efektivního a středního proudu	21
5.2.31	Výpočet počtu závitů jednotlivých sekundárních vinutí	21
5.2.32	Výpočty: efektivní hodnoty proudu v jednotlivých sekundárních vinutích, průměrů sekundárních vodičů a efektivních hodnot zvlněného proudu	21
5.2.33	Výpočty maximálních hodnot závěrného špičkového napětí na usměrňovacích sekundárních diodách (zpětnovazební usměrňovací diody)	22
5.2.34	Stanovení maximálního závěrného napětí a maximálního propustného proudu pro jednotlivé usměrňovací sekundární diody	22
5.2.35	Volba jednotlivých usměrňovacích sekundárních diod a zpětnovazební usměrňovací diody	24
5.2.36	Výběr typu výstupního kondenzátoru	25
5.2.37	Přidání výstupního LC filtru	25
5.2.38	Výběr zpětnovazebního kondenzátoru	25
5.2.39	Výběr kondenzátoru řídicí elektrody CONTROL a jeho sériového odporu	25
5.2.40	Výběr omezovací Zenerovy diody (transilu) a blokovací diody	25
5.2.41	Výběr typu vstupního můstkového usměrňovače	26
6.	Dokončení návrhu spínaného zdroje	26
6.1	Dodatečné výpočty (návrhy)	26
6.1.1	Nastavení ochrany proti podpětí a přepětí	26
6.1.2	Úprava zpětnovazebního obvodu	26
6.1.3	Chlazení aktivních součástí	27
6.2	Konstrukce transformátoru	28
6.2.1	Postup při vinutí transformátoru	29
6.3	Schéma zapojení	30
6.4	Deska plošného spoje	30
7.	Konstrukce zdroje	30
8.	Měření charakteristik zdroje	32
8.1	Postup měření	32
8.2	Výsledky měření	33
8.2.1	Statická zatěžovací charakteristiky výstupu 3,3 V	33
8.2.2	Statická zatěžovací charakteristiky výstupu 5 V	35
8.2.3	Statická zatěžovací charakteristiky výstupu 12 V	37
8.2.4	Příklad výpočtů	38
8.2.5	Použité měřicí přístroje a pomůcky	39
9.	Závěr	40

Použitá literatura.....	41
Seznam příloh	42

Seznam obrázků

Obr. 1	Blokové schéma spínaného zdroje.....	1
Obr. 2	Propustné zapojení s demagnetizačním vinutím.....	2
Obr. 3	Akumulující (blokující) zapojení.....	2
Obr. 4	Typické názvy jednotlivých součástí spínaného zdroje s obvodem TOPSwitch.....	3
Obr. 5	Typické aplikační zapojení blokujícího měniče s obvodem TOPSwitch.....	4
Obr. 6	Blokové schéma zapojení obvodu TOPSwitch.....	4
Obr. 7	Typické aplikační zapojení blokujícího měniče s obvodem TOPSwitch-FX.....	6
Obr. 8	Blokové schéma vnitřního zapojení TOPSwitch-FX.....	7
Obr. 9	Typické aplikační zapojení blokujícího měniče s obvodem TOPSwitch-GX.....	8
Obr. 10	Typické aplikační zapojení blokujícího měniče s obvodem TOPSwitch-HX.....	9
Obr. 11	Vývojový diagram návrhu spínaného zdroje s obvodem TOPSwitch.....	11
Obr. 12	Zpětná vazba s odporem.....	13
Obr. 13	Zpětná vazba s odporem a Zenerovou diodou.....	13
Obr. 14	Zpětná vazba s optronem a Zenerovou diodou.....	14
Obr. 15	Zpětná vazba s optronem a obvodem TL431.....	14
Obr. 16	Řez profilem chladiče pro výstupní usměrňovací diody.....	28
Obr. 17	Schéma zapojení vinutí transformátoru.....	28
Obr. 18	Schéma provedení jednotlivých vinutí transformátoru (řez).....	29
Obr. 19	Uspořádání jednotlivých částí zdroje v plastové krabici (pohled shora).....	31
Obr. 20	Uspořádání jednotlivých částí zdroje na zadním panelu.....	31
Obr. 21	Uspořádání jednotlivých částí zdroje na předním panelu.....	31
Obr. 22	Měřicí zapojení zdroje.....	32
Obr. 23	Graf statické zatěžovací charakteristika a účinnosti výstupu 3,3 V.....	34
Obr. 24	Graf statické zatěžovací charakteristika a účinnosti výstupu 5 V.....	36
Obr. 25	Graf statické zatěžovací charakteristika a účinnosti výstupu 12 V.....	38

Seznam tabulek

Tab. 1	Význam barev jednotlivých buněk v Excelovské tabulce.....	12
Tab. 2	Základní vlastnosti zpětnovazebních obvodů.....	13
Tab. 3	Naměřené hodnoty statické zatěžovací charakteristiky výstupu 3,3 V.....	33
Tab. 4	Naměřené hodnoty statické zatěžovací charakteristiky výstupu 5 V.....	35
Tab. 5	Naměřené hodnoty statické zatěžovací charakteristiky výstupu 12 V.....	37

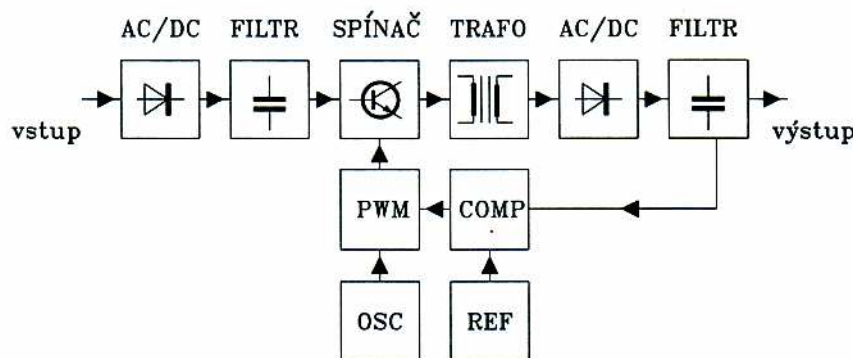
1. Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem spínaných DC/DC měničů napájených z elektrorozvodné sítě s využitím obvodů TOPSwitch. K této návrhové proceduře jsem vytvořil samostatný program v Excelu, který obsahuje veškeré vzorce pro výpočty a automaticky přepočítává jakékoliv další pole kdykoliv dojde ke změně parametru, který je zahrnut do výpočtu. Zároveň tento program u některých výpočtů kontroluje, zda jsou splněny podmínky pro správnou funkci obvodu (OK nebo CHYBA). Základní tabulka Excelu je dynamicky spojená s dvěma dalšími tabulkami, což umožňuje u některých buněk zvolit předdefinované hodnoty (parametry). Součástí této bakalářské práce je zároveň návrh spínaného zdroje s vícenásobným výstupním napětím.

2. Obecně o spínaných zdrojích s transformátorem

Nejvyšší výhodou spínaných zdrojů je jejich vysoká účinnost, jejich váha a rozměry. Dá se říci, že jejich nasazení je zajímavé u všech zdrojů s požadovaným výstupním výkonem přesahujících hodnotu 20 W.

Spínaný zdroj se obecně skládá z několika základních částí, znázorněných na obr. 1.



Obr. 1 Blokové schéma spínaného zdroje (převzato z [2])

2.1 Základní princip

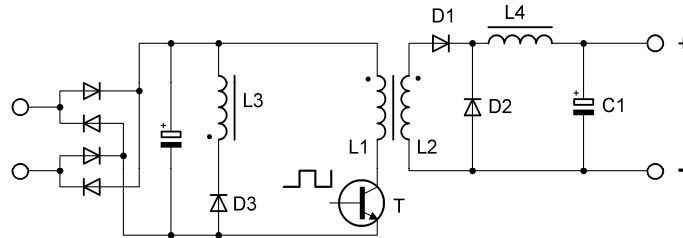
Síťové napětí ze vstupu se po průchodu vysokofrekvenčním odrušovacím filtrem (není zakreslen ve schématu – Obr. 1) usměrňuje primárním usměrňovačem, vyhlazuje filtračním kondenzátorem a přivádí na vstup měniče. Podmínkou činnosti měniče je stejnosměrné vstupní napětí, pokud možno co nejvíce zbavené střídavé složky. Při napájení z rozvodné sítě je tedy nutné, aby vstupní filtr byl dostatečně účinný na síťovém kmitočtu 50 Hz. Usměrněné a vyhlazené vstupní napětí se přivede na spínací prvek realizovaný bipolárním či FET tranzistorem, který jej převede střídavé napětí obdélníkového průběhu. Napětí přerušované tranzistorem se přivádí na primární vinutí transformátoru, jenž zajišťuje potřebný napěťový převod a galvanické oddělení sekundární části od sítě. Napětí ze sekundárního vinutí transformátoru se usměrňuje v sekundárním usměrňovači a filtruje výstupním filtrem.

Všechny spínané zdroje jsou řízeny zpětnou vazbou. Z napájecího napětí pro řídicí blok je nejprve odvozeno referenční napětí (REF) a to je v zesilovači odchylky (komparátoru - COMP) porovnáno s chybovým napětím, které je úměrné výstupnímu napětí. Získaný analogový spojitý chybový signál ze zesilovače je pak porovnáván v komparátoru s pilovitým napětím z oscilátoru (OSC). Výsledkem komparace je šířkově modulovaný signál (PWM). Šířka budících impulsů na výstupu komparátoru je přímo úměrná velikosti a nepřímo úměrná smyslu odchylky. Budícími impulsy je pak ovládán výkonový spínač.

2.2 Základní zapojení spínaných zdrojů

Spínané zdroje lze rozdělit podle jejich zapojení a funkce do několika základních skupin. Jednotlivá zapojení se obvykle rozlišují podle způsobu přenosu energie z primárních obvodů do obvodů sekundárních.

2.2.1 Propustné zapojení

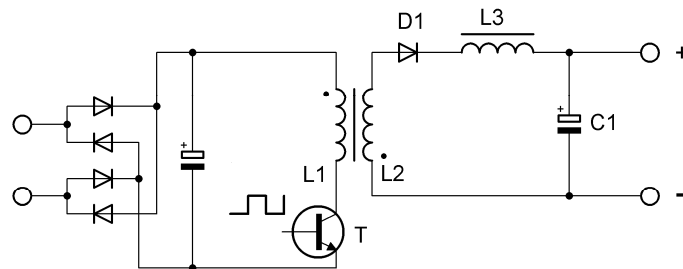


Obr. 2 Propustné zapojení s demagnetizačním vinutím

V okamžiku, kdy je tranzistor T na obr. 2 sepnut, začne lineárně narůstat proud tekoucí primárním vinutím transformátoru $L1$ a teče i současně proud vinutím sekundárním $L2$. Toto je určeno vzájemnou polaritou primárního a sekundárního vinutí a polaritou výstupní usměrňovací diody $D1$. Jakmile tranzistor rozpne, přechází výstupní tlumivka $L4$ z režimu spotřebiče do režimu zdroje a společně s výstupním kondenzátorem $C1$ dodávají přes diodu $D2$ proud do zátěže. V době, kdy není tranzistor sepnut (změní se polarita napětí na všech cívkách), není z transformátoru odebírána žádná energie a pokud v něm nějaká zůstává, roste napětí na primární cívce transformátoru, které ohrožuje vypnutý tranzistor. Jedním z možných řešení omezení tohoto nežádoucího napětí je přidat transformátoru další vinutí $L3$, které transformátor zatíží tak, že hodnota tohoto napětí klesne. Dioda $D3$ zabezpečuje, aby průchod proudem cívkou $L3$ mohl nastat pouze v době, kdy je tranzistor T vypnut.

Využití: Vzhledem k menší velikosti transformátoru se toto zapojení používá u spínaných zdrojů s maximálním výkonem 250 W.

2.2.2 Akumulující (blokující) zapojení



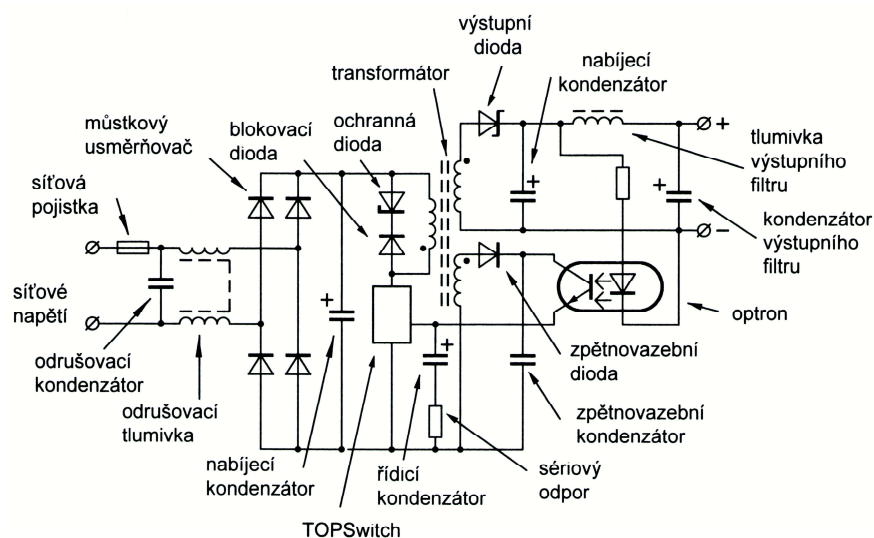
Obr. 3 Akumulující (blokující) zapojení

V okamžiku, kdy je tranzistor T na obr. 3 sepnut, protéká proud primární vinutím transformátoru $L1$, sekundárním vinutím $L2$ proud neteče a kondenzátor $C1$ se vybíjí do zátěže. Toto je určeno vzájemnou polaritou obou vinutí k polaritě výstupní usměrňovací diody $D1$. Veškerá energie je tedy akumulována do magnetického pole primární cívky $L1$. Jakmile tranzistor rozpne, je přerušen primární proud a energie akumulovaná v magnetickém poli cívky $L1$ je odebírána cívkou $L2$, na které se změnila polarita napětí. Diodou $D1$ začne téct proud do zátěže a zároveň se dobíjí kondenzátor $C1$. Do sekundárního vinutí však není odebrána veškerá energie. Následkem toho se tato energie mění opět na elektrickou energii na primární straně transformátoru a je tedy nutné ji eliminovat vhodným ochranným obvodem. Jednou z možností pro ochranu před tzv. zpětného indukovaného napětí je použití transilu a ochranné diody.

Využití: Obvykle se zapojení používá pro výkony do 150 W, ale např.: s obvody TOPSwitch lze až do 250 W.

3. Základní uspořádání spínaného zdroje s obvodem TOPSwitch

Vzhledem k vysoké úrovni integrace obvodu TOPSwitch je mnoho činností obvodu integrováno již přímo na čipu. Daleko méně činností je tedy nutné zajistit pomocí externích součástek, jejichž hodnoty jsou závislé na úrovni velikosti výstupního výkonu, nemění se však jejich zapojení, které zůstává nezměněno od aplikace k aplikaci. Jediná část konfigurace obvodu, která se může měnit, je pouze obvod zpětné vazby.



Obr. 4 Typické názvy jednotlivých součástek spínaného zdroje s obvodem TOPSwitch (převzato z [1])

4. Obecně o TOPSwitch

Jedná se o obvody s označením TOP 2xx vyráběných firmou Power Integrations, Inc., která na trhu funguje již od roku 1988, a postupně se stala vedoucím dodavatelem analogových napěťových měničů, které vynikají zejména vysokou efektivitou, nízkou vlastní spotřebou, kompaktností a širokými možnostmi použití. V roce 1994 přišla firma s prvním produktem z řady **TOPSwitch**.

Obvod TOPSwitch je monolitický čip, spojující vysokonapěťový MOSFET tranzistor ve funkci spínače s implementovanými analogovými a číslicovými řídicími obvody pro regulaci a ochranu obvodu. Vysoký pracovní kmitočet 100 KHz (u novější řady až 132 kHz) snižuje velikost transformátoru a tudíž i celého zdroje. V současné době nejmodernější obvody TOPSwitch (řady HX) mají výkon až do 333 W se vstupním střídavým napájecím napětím v rozsahu (195 – 265) V, nebo 254 W při univerzálním napájecím napětí (85 – 265) V.

4.1 Přednosti

Hlavními přednostmi použití obvodů TOPSwitch ve spínaných napájecích zdrojích oproti lineárním napájecím zdrojům jsou:

- Vysoká účinnost (>80%)
- Univerzální pro různá vstupní napětí (85-265 V)
- o 40% - 60% rozměrově menší než lineární zdroje
- o 80% menší hmotnost než lineární zdroje
- Nízká spotřeba při nulovém zatížení: < 0,2 W
-

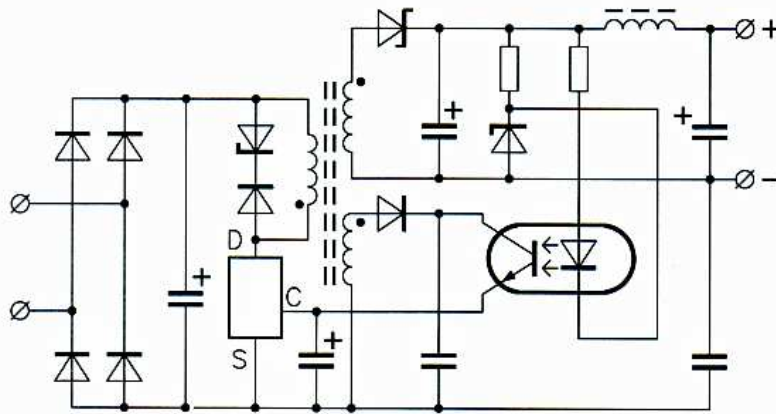
4.2 Nevýhody

Všechny obvody TOPSwitch jsou přednostně určeny do zapojení s transformátorem a zpětnou vazbou, která může být realizována z výstupu, nebo ze samostatného sekundárního zpětnovazebního vinutí transformátoru. Vzhledem k tomu, že tyto transformátory ve většině případů nelze koupit jako hotový produkt, je nutné je tedy navrhnout a sestavit.

4.2.1 Obvody TOPSwitch první generace

Tyto obvody lze vzhledem k jejich jednoduchosti zapojení přirovnat k třísvorkovým lineárním monolitickým stabilizátorům. Lze je tedy považovat za optimální volbu pro stavbu spínaného zdroje o výkonu od nuly do 100 W, nebo jako preregulátory (korektor účinnosti = PFC) v aplikacích od nuly do 150 W.

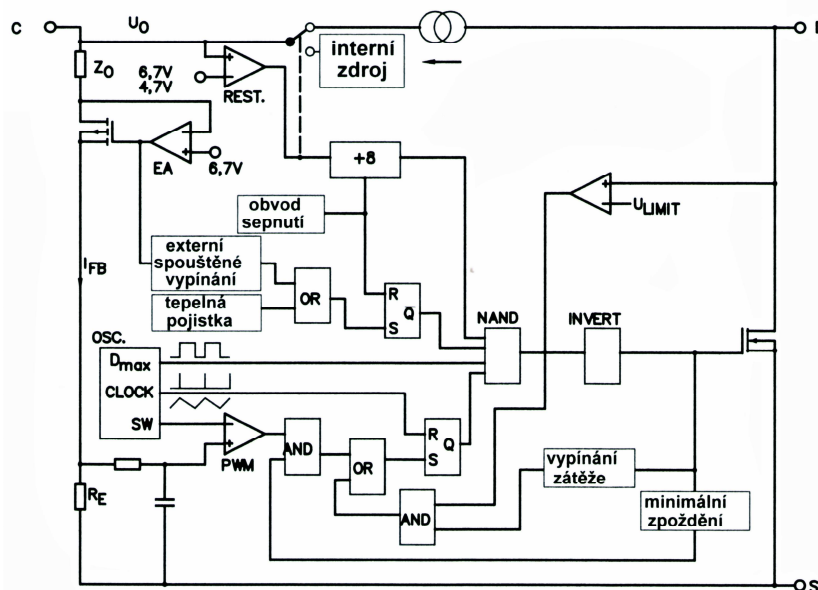
Typické aplikační zapojení je zobrazeno na následujícím obrázku – Obr. 2



Obr. 5 Typické aplikační zapojení blokujícího měniče s obvodem TOPSwitch (převzato z [1])

4.2.2 Popis obvodu

Obvody řady TOPSwitch se třemi vývody mají všechny funkce nutné pro spínací způsob řízení systému. Jedná se o: vysokonapěťový N-kanálový výkonový MOSFET tranzistor s řídicím obvodem hradla, pulzně šířkovou modulaci (PWM) – napěťový režim s integrovaným 100 kHz oscilátorem, obvod proudového omezení při startu z vysokého napětí, referenční napětí, zpětnovazební zesilovač regulační odchylky a ochranné obvody.



Obr. 6 Blokové schéma zapojení obvodu TOPSwitch (převzato z [1])

4.2.2.1 Popis funkce jednotlivých vývodů

Vývod **Drain (D)**

Vývod je kolektorem (Drain) tranzistoru MOSFET a odebírá se z něj i vnitřní proud pro zpětnovazební obvody přes vnitřní spínaný vysokonapěťový zdroj.

Vývod **SOURCE (S)**

Je emitorem interního tranzistoru MOSFET, zemí primárního obvodu i zpětnovazebního napětí a referenčním bodem celého zapojení.

Vývod **CONTROL (C)**

- Vstup chybového zesilovače a zpětné vazby pro řízení změnou střídy.
- Vnitřní zpětnovazební regulátor zapojený jako obvod paralelního regulačního členu.
- Spouštěcí vstup pro blokování ve stavu vypnutí.
- Jako vstupní svorka pro připojení kompenzačního kondenzátoru, jako vstup pro zpětnovazební obvody a obvody automatického restartu.

4.2.2.2 Popis funkce jednotlivých obvodů

Řídící napětí obvodů

Vstup CONTROL je napěťovým vstupem (proti SOURCE) s napětím U_{CTRL} , který je dodáván z výstupu jako řídicí veličina obvodu. Je schopen ovládat kombinovaně jak napájení obvodu, tak jeho řízení zpětnou vazbou. Pokud je výstupní spínací tranzistor MOSFET sepnut, je napětí U_{CTRL} také napájecím napětím celého obvodu z náboje vnějšího kondenzátoru C_T (spojující CONTROL a SOURCE), který rovněž zajišťuje pozvolný a automatický restart (jeho určitou dobu) a kompenzuje řídicí smyčku zpětné vazby.

Reference typu bandgap

Veškerá kritická vstupní napětí uvnitř obvodu TOPSwitch jsou odvozená z teplotně kompenzovaného referenčního napětí typu bandgap. Tato reference je rovněž použita při generování teplotně kompenzovaného proudového zdroje, který přesně nastavuje kmitočet oscilátoru a řídí tranzistor MOSFET.

Oscilátor

Vnitřní oscilátor lineárně nabíjí a vybíjí vnitřní kondenzátor mezi dvěma napěťovými úrovněmi pro vytvoření trojúhelníkového průběhu pro modulátor šířky pulzu (PWM).

Pulzně šířkový modulátor (PWM)

PWM pracuje v napěťovém řídicím režimu řízení výstupního tranzistoru MOSFET se střídou spínání inverzně závislou na hodnotě vstupního proudu řídicí elektrody CONTROL. Chybový proudový signál (protéká odporem R_E) je filtrovaný RC členem s typickým zlomovým kmitočtem 7 kHz a poté je porovnaný s vnitřním pilovým napětím oscilátoru. Jejich komparací se generuje obdélníkový průběh s požadovanou střídou. Pokud tedy vstupní proud roste, střída klesá.

Budič hradla tranzistoru MOSFET

Spíná výstup MOSFET řízenou rychlostí tak, aby byly minimalizovány vlivy EMI. Pro zlepšení účinnosti je proud řídicího hradla nastaven přesně nad minimální hranici.

Chybový zesilovač (EA)

Obvod ve funkci paralelního stabilizátoru je řízen napětím, určeným obvodem bandgap, a vykonává také funkci chybového zesilovače v aplikaci zpětné vazby. Zisk chybového je nastavený pomocí vývodu CONTROL a jeho dynamické impedance. Vývod CONTROL překlápí v reakci na napěťovou úroveň U_{CTRL} . Přebývajícím proudem do vývodu CONTROL teče přes interní odpor R_E jako chybový signál.

Proudové omezení

Kolektorový proud výstupního tranzistoru MOSFET je snímán v každém cyklu spínání zdroje na snímacím odporu proudu $R_{DS(ON)}$ jako napětí $U_{DS(ON)}$ a toto napětí pak komparátor porovná s prahovým napětím. Vysoká hodnota proudu kolektoru poté způsobuje vypnutí proudu výstupem tranzistoru MOSFET až do začátku následujícího cyklu.

Start obvodů

Pro minimalizaci ztrátového výkonu obvodu TOPSwitch po zapnutí je obvod vybaven startovacím obvodem. Po dobu trvání počátečního stavu (střída 5 %) se regulační napětí U_{CTRL} mění ze zpětnovazebního na startovací s hysterezí.

Vypínání vlivem zpětné vazby

Vysoká hodnota proudového impulsu do vstupu CONTROL má za následek aktivování obvodu přepětové ochrany, který rozpíná výstupní tranzistor MOSFET. Obvod poté nastaví opět vstupní napětí na plnou hodnotu, okamžitě se zotavuje buzení vstupu CONTROL a obvod TOPSwitch může pokračovat v normální činnosti.

Ochrana proti přehřátí

Při překročení teploty přechodů nad hodnotu nastavené mezní teploty (obvykle 145 °C) se vypne výstup tranzistoru MOSFET do doby než teplota poklesne.

Proudový regulátor pro vysokonapětové napájení

Proudový zdroj mezi svorkami DRAIN a CONTROL s vnějším kondenzátorem C_T pracuje během startu obvodu v hysterézním stavu. Tento hysterézní stav se rovněž vyskytuje během autorestartu obvodu a při jeho vypnutí přetížením. Proudový zdroj je vypínán během normální činnosti, kdy výstupní tranzistor MOSFET spíná.

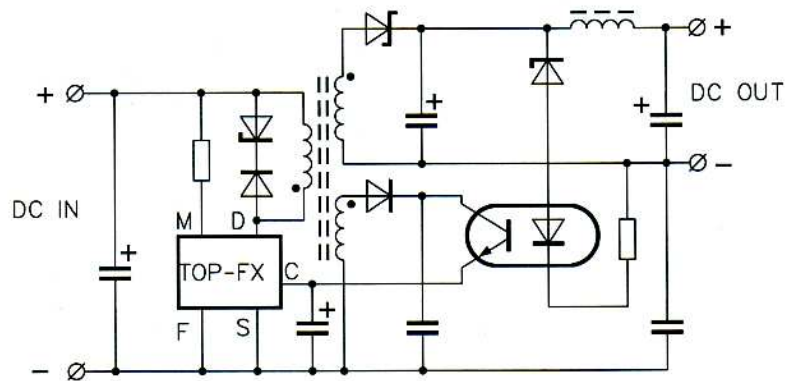
4.3 Obvody TOPSwitch druhé generace

Druhá generace obvodů TOPSwitch rozšiřuje rozsah výkonu ze 100 W na 150 W pro střídavá napětí 100 až 230 V a z 50 W na 90 W pro univerzální vstupní napětí (85-265) V.

Obvody této řady (v provedení DIP8 a SMD) jsou 4vývodové, mají oddělený a samostatný vývod emitoru vysokonapětového interního MOSFET tranzistoru. Vnitřní konstrukce standardního pouzdra DIP8 používá šest z jeho vývodů, čímž je zajištěn přenos tepla z čipu přímo do desky plošného spoje.

4.4 Obvody TOPSwitch řady FX

Obvody řady TOPSwitch-FX se odlišují od předcházejících typů zvýšeným počtem vývodů (pět místo tří) a tím i celou řadou nových funkcí.



Obr. 7 Typické aplikační zapojení blokujícího měniče s obvodem TOPSwitch-FX (převzato z [1])

4.4.1 Přednosti

- snížení počtu externích součástek
- úplně ignorují obvody pro měkké spuštění pro minimální překmit výstupního napětí
- externě nastavitelná hodnota proudového omezení
- zvýšení maximální hodnoty střídavé spínání (až 78 %) umožňuje použití menšího vstupního kondenzátoru
- detekce výstupního podpětí s potlačením vlivu rušivých impulzů na výstupu
- detekce vstupního přepětí přesahujícího vstupní povolené napětí
- redukce zvlnění a omezení střídavé při vysokém vstupním napětí
- nastavení OV (over voltage = vstupní přepětí) i UV (under voltage = výstupní podpětí) prahové hodnoty pouze jedním odporem
- reguluje i při nulovém zatížení výstupu
- kmitočet 130 kHz snižuje velikost transformátoru
- tepelná ochrana s hysterezí a funkcí automatické obnovy činnosti
- standardní pouzdra s vynechanými vývody pro dosažení velkých izolačních vzdáleností
- cyklické zapínání a vypínání v neaktivním (standby) režimu
- poloviční kmitočet v neaktivním režimu zvyšuje účinnost
- dovoluje zastavení činnosti a opětný rozběh přes vstupní port

4.4.2 Popis obvodu

Obvody řady TOPSwitch-FX používají prověřené funkce obvodů TOPSwitch první generace ale s dvěma přidanými vývody.

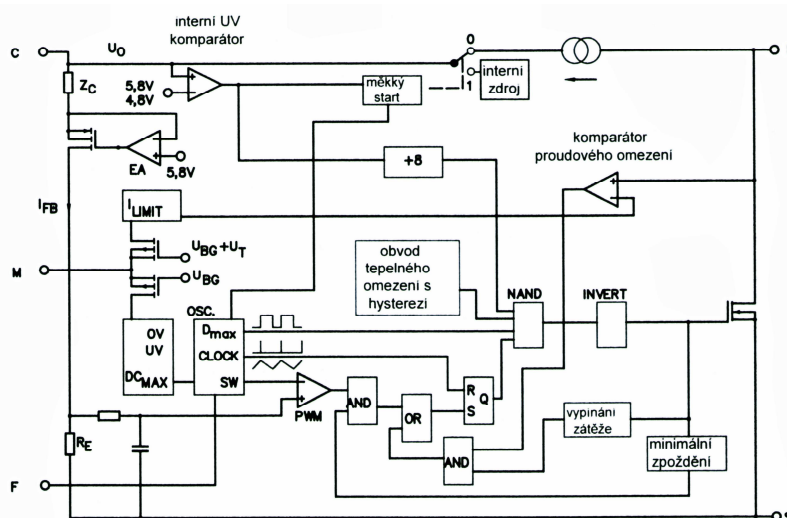
Prvním je vývod **MULTIFUNCTION (M)**, který:

- implementuje programovatelnou linku OV/UV a omezení střídavé spínání při vstupním přepětí.
- nastavení přesného proudového omezení,
- pro přechod obvodu do neaktivní činnosti a zpět (ON/OFF)
- může synchronizovat interní oscilátor externím kmitočtem nízké hodnoty

Druhým přidaným vývodem je **FREQUENCY (F)**. Tento vývod je k dispozici pouze u pouzdra TO-220 a:

- poskytuje možnost volby polovičního kmitočtu (65 kHz), pokud s ním spojíme vývod CONTROL (C) místo SOURCE (S)

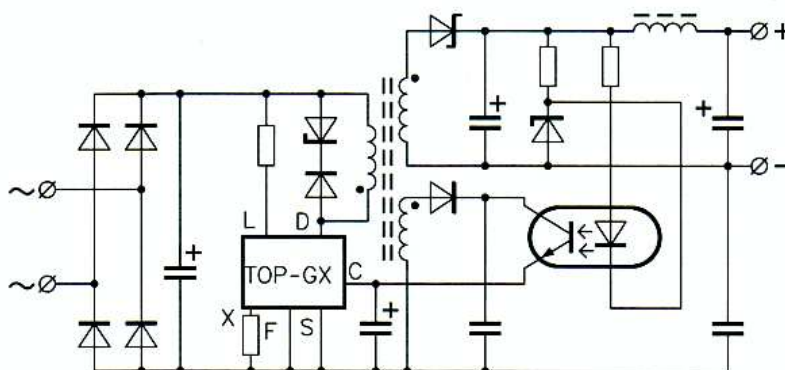
Pozn.: vlastnosti na nových vývodech mohou být blokovány spojením těchto vývodů s vývodem SOURCE.



Obr. 8 Blokové schéma vnitřního zapojení TOPSwitch-FX (převzato z [1])

4.5 Obvody TOPSwitch řady GX

Obvody řady TOPSwitch-GX mají celkem až 6 vývodů pouzdra. Mají většinu funkcí shodných s předcházejícími obvody a jsou doplněny celou řadou nových funkcí.



Obr. 9 Typické aplikační zapojení blokujícího měniče s obvodem TOPSwitch-GX (převzato z [1])

4.5.1 Přednosti

- zvýšený výkonový rozsah, který dosahuje až 250 W
- minimální příkon obvodů v neaktivní stavu - při vstupním napětí 230 V spotřebovávají pouze 160 mW
- standardně pracují na kmitočtu 132 kHz, nebo na půleném 66 kHz

4.5.2 Popis obvodu

Základní vývody DRAIN (D), CONTROL (C) a SOURCE (S) mají funkci stejnou jako výše popisované řady. Odlišnosti jsou následující:

Přidání vývodu **LINE-SENSE (L)** u pouzder Y, R a F, který poskytuje:

- vstup pro nastavení přepětí (OV), podpětí (UV)
- nastavení maximální hodnoty střídy spínání
- přechod obvodu do neaktivní činnosti a zpět (ON/OFF)
- volbu frekvence 132 kHz / 66 kHz
- spojením s vývodem SOURCE tyto všechny doplňkové funkce vyřazuje z činnosti

Přidání vývodu **EXTERNAL CURRENT LIMIT (X)** u pouzder Y, R a F, který:

- je vstupní vývod pro externí nastavení hodnoty proudového omezení
- je pro externí zapínání a vypínání (ON/OFF)
- spojením s vývodem SOURCE tyto všechny doplňkové funkce vyřazuje z činnosti

Vývod **MULTIFUNCTION (M)**, který se vyskytuje pouze u pouzder P nebo G a:

- spojuje funkce LINE-SENSE a EXTERNAL CURRENT LIMIT obvodů v pouzdře TO-220 do jednoho vývodu
- spojením s vývodem SOURCE tyto všechny doplňkové funkce vyřazuje z činnosti

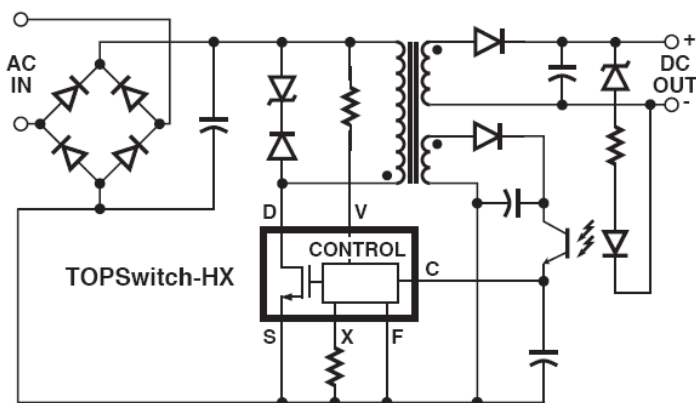
Vývod **FREQUENCY (F)**, který je k dispozici pouze u pouzder Y, R, F a:

- poskytuje možnost volby polovičního kmitočtu (66 kHz), pokud s ním spojíme vývod CONTROL (C) místo SOURCE (S)

4.6 Obvody TOPSwitch řady HX

Jedná se o poslední vývojovou řadu firmy Power Integrations, Inc. v oblasti obvodů TOPSwitch. V době psaní této bakalářské práce ještě nebyly k dostání na našem trhu, přesto ale stojí za zmínku napsat o nich pár vět.

Obvody řady TOPSwitch-HX (TOP 252 až TOP 262) mají celkem až 6 vývodů pouzdra a vyrábějí se ve standardních pouzdech DIP-8C, SMD-8C, SDIP-10C, TO-220-7C a v nově vzniklých pouzdech eSIP-7C a eSIP-7F. Mají většinu funkcí shodných s předcházejícími obvody a jsou doplněny řadou nových funkcí.



Obr. 10 Typické aplikační zapojení blokujícího měniče s obvodem TOPSwitch-HX (převzato z [1])

4.6.1 Přednosti

Z mnoha nových funkcí jsem vybral následující:

- zvýšený výkonový rozsah, který dosahuje až 333 W (u modulu TOP 262)
- omezení proudu $I_{LIMIT} = 7,918$ A (u modulu TOP 262)
- umístěním obvodu do nového typu pouzdra eSIP-7F a eSIP-7C získávají obvody: Nízký tepelný odpor mezi přechodem a pouzdem (2°C na watt)
- u provedení DIP-8C, SMD-8C a SDIP-8C není vyžadován chladič pro výkon do 35 W při univerzálním napájecím napětí (85 – 265 Vst) a pro výkon do 48 W pro napájecí napětí 230 Vst
- výstupní ochrana proti přepětí (OVP) je uživatelsky programovatelná pro zablokování/odblokování vypnutí
- chladič je připojen k vývodu SOURCE pro snížení EMI
- plné integrování měkkého startu

4.6.2 Popis obvodu

Základní vývody DRAIN (D), CONTROL (C), SOURCE (S), EXTERNAL CURRENT LIMIT (X) a MULTIFUNCTION (M) mají funkci stejnou jako výše popisované řady. Odlišnosti jsou následující:

Přidání vývodu **VOLTAGE MONITOR (V)** u pouzder TO-220-7C a DDIP-10C, který:

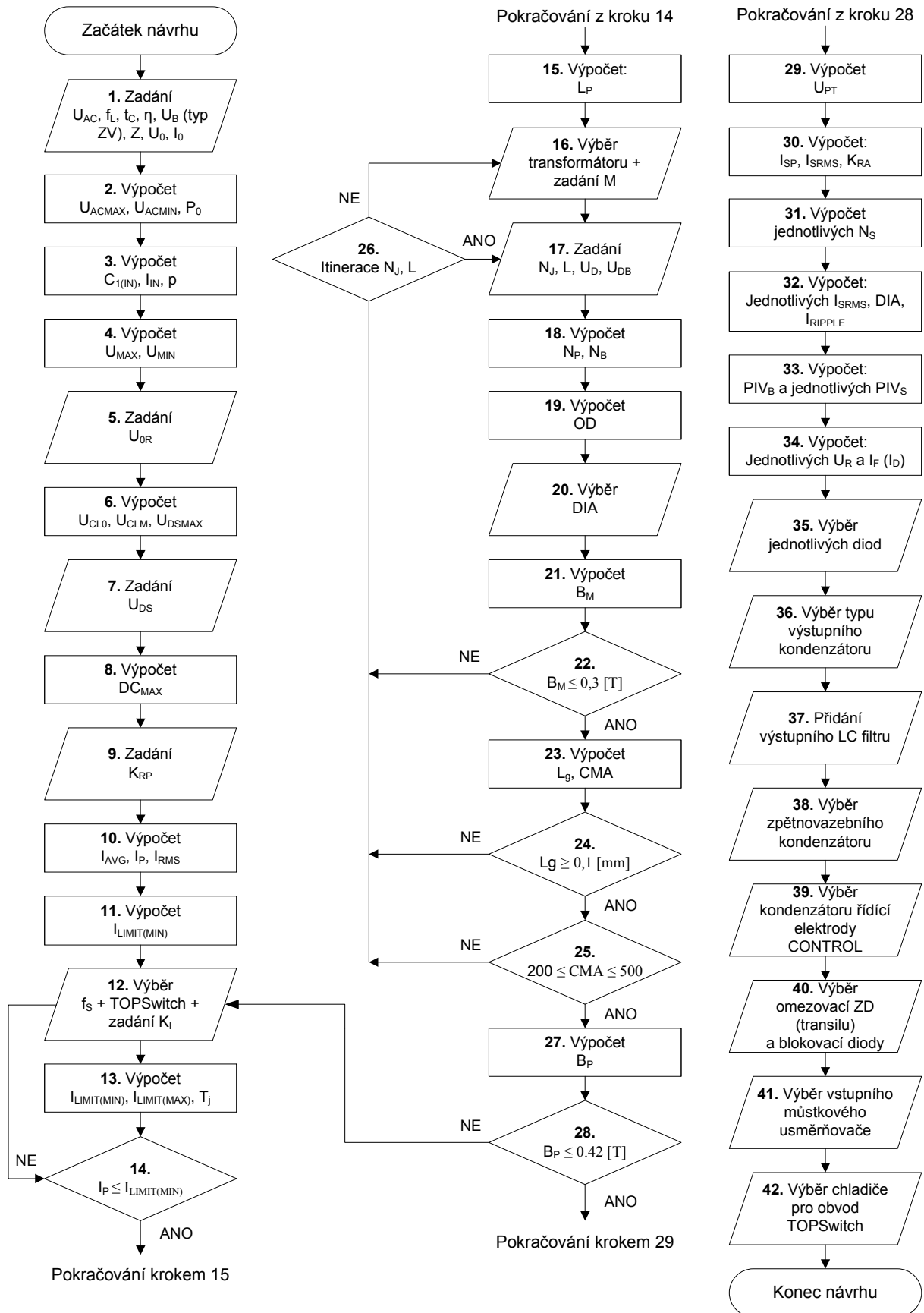
- je vstupem pro nastavení přepětí (OV), podpětí (UV)
- je pro nastavení maximální hodnoty středy spínání
- je výstupem ochrany proti přepětí (OVP)
- je pro externí zapínání a vypínání (ON/OFF) a reset
- spojením s vývodem SOURCE tyto všechny doplňkové funkce vyřazuje z činnosti

5. Návrh spínaného zdroje

V originálním zadání této bakalářské práce bylo navrhnut dva zdroje s pevným výstupním napětím s malým a větším výstupním výkonem. Po konzultaci s vedoucím projektu Ing. Jiřím Šebestou, Ph.D. bylo toto zadání pozměněno na návrh zdroje s vícenásobným výstupem a s výkonem cca 80 W. Veškeré níže uvedené výpočty a návrhy jsou tedy směřovány k tomuto upravenému zadání. Jednotlivé kroky potřebné pro návrh spínaného zdroje jsem seřadil do vývojového diagramu (Obr. 11), který se dá rozdělit do tří základních skupin:

- určení potřeb systému a rozhodnutí volby typu zpětné vazby a výběr nejmenšího (výkonově) obvodu TOPSwitch, schopného zajistit výstupní výkon požadované aplikace
- návrh (volba) nejmenšího (rozměrově) transformátoru pro vybraný typ TOPSwitch itineračním postupem
- návrh (volba) ostatních součástí pro kompletaci zdroje

5.1 Vývojový diagram návrhu spínaného zdroje



Obr. 11 Vývojový diagram návrhu spínaného zdroje s obvodem TOPSwitch

5.2 Postup návrhu krok za krokem

Níže popsany postup návrhu spínaného zdroje s obvodem TOPSwitch je vhodný pouze pro napájecí střídavé napětí 230 V, tento postup tedy není vhodný pro použití univerzálního napájecího napětí 85 – 265 V.

Jednotlivé kroky návrhu odpovídají číselnému označení ve vývojovém diagramu, viz. Obr. 11, a odpovídají číselnému značení příslušných podkapitol. Jsou doplněny Excelovskou tabulkou (jednotlivými částmi) s případnými vzorci a komentářem (pokud je tak nutné). Pro přehlednost jsou jednotlivé buňky barevně odlišeny a význam jednotlivých barev je patrný z následující tabulky, viz. Tab 1.

	Ručně zadaný vstup (hodnota)
	Vypočtená hodnota
	Načtené hodnoty z připojených tabulek

Tab. 1 Význam barev jednotlivých buněk v Excelovské tabulce

Pozn.: Ručně zadané hodnoty nemusí odpovídat doporučeným hodnotám, jedná se totiž o hodnoty, které jsem upravoval během návrhu.

5.2.1 Zadání vstupních a výstupních parametrů, volba zpětnovazebního obvodu

Vstupní hodnoty			
Vstupní napájecí napětí	U_{AC}	230	V
Síťový kmitočet	f_L	50	Hz
Doba otevření můstkového usměrňovače	t_C	3,00	ms
Předpokládaná hodnota účinnosti	η	75	%
Napětí zpětnovazebního vinutí	U_B	12	V
Alokační faktor rozdělení primárních a sekundárních ztrát	Z	0,68	-
Výstupní hodnoty			
1. výstupní napětí (hlavní – pro řízení zpětnovazebního obvodu)	U_{O1}	3,30	V
1. výstupní proud	I_{O1}	3,50	A
Povolená tolerance výstupního 1. výstupního napětí	tol_1	5,00	%
2. výstupní napětí	U_{O2}	5,00	V
2. výstupní proud	I_{O2}	3,50	A
Povolená tolerance výstupního 1. výstupního napětí	tol_2	5,00	%
3. výstupní napětí U_{O2}	U_{O3}	12,00	V
3. výstupní proud I_{O2}	I_{O3}	2,00	A
Povolená tolerance výstupního 1. výstupního napětí	tol_3	10,00	%
4. výstupní napětí U_{O2}	U_{O4}	-12,00	V
4. výstupní proud I_{O2}	I_{O4}	2,00	A
Povolená tolerance výstupního 1. výstupního napětí	tol_4	10,00	%

kde:

t_C je předpokládaná doba vedení proudu diodami můstkového usměrňovače (doba periody po dvoucestném usměrnění při kmitočti sítě 50 Hz je $T = 10$ ms a předpokládáme tedy, že diody vedou po 30 % této doby)

η je předpokládaná hodnota účinnosti, která je závislá na velikosti výstupního napětí a zvoleném typu obvodu TOPSwitch. Doporučená hodnota při zahájení návrhu je 0,8.

- Z** rozdělení ztrát na primární a sekundární straně. Rozsah 0 až 1. Při $Z = 1$ jsou všechny ztráty na sekundární straně a při $Z = 0$ jsou všechny ztráty na primární straně. Doporučená hodnota při zahájení návrhu je 0,5.
- U_B** napětí zpětnovazebního vinutí, které odpovídá zvolenému typu zpětné vazby – viz. Tab.2

5.2.1.1 Zpětnovazební obvod

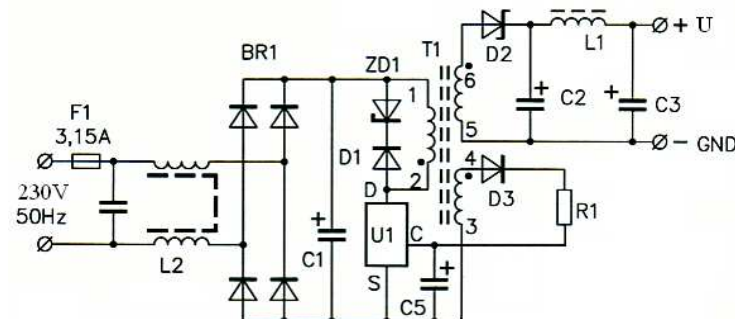
Vzhledem k vysoké úrovni integrace obvodů TOPSwitch (interním obvodům stability) a sníženému počtu návrhových proměnných je návrh velmi zjednodušený. Pro obvody TOPSwitch jsou doporučovány čtyři typy zpětnovazebních řídicích obvodů a jejich základní vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 2.

typ zpětnovazebního obvodu	potřebné zpětnovazební napětí U_B [V]	přesnost nastavení výstupního napětí [%]	vliv změny zatěžovacího proudu na výstupní napětí [%]	vliv změny vstupního napětí na výstupní napětí [%]
zpětnovazební vinutí s odporem	5,7	± 10	± 5	$\pm 1,5$
zpětnovazební vinutí + ZD	27,7	± 5	$\pm 2,5$	$\pm 1,5$
optron + ZD	12	± 5	± 1	$\pm 0,5$
optron + TL431	12	± 1	$\pm 0,2$	± 5

Tab. 2 Základní vlastnosti zpětnovazebních obvodů

5.2.1.1.1 Zpětná vazba s odporem

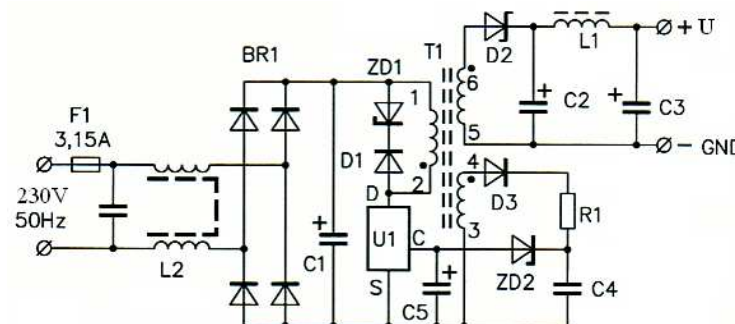
Nejjednodušší obvod zpětné vazby, uvedený na obr. 12, má nižší přesnost regulace a je vhodný pouze pro nízké výkony a vyšší výstupní napětí ($U_o > 5V$).



Obr. 12 Zpětná vazba s odporem (převzato z [1])

5.2.1.1.2 Zpětná vazba s odporem a Zenerovou diodou

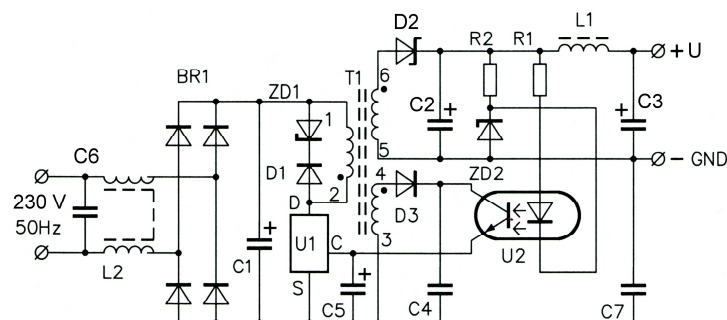
Tuto získáme přidáním Zenerovy diody na napětí 22 V a kondenzátoru do zpětné vazby s odporem.



Obr. 13 Zpětná vazba s odporem a Zenerovou diodou (převzato z [1])

5.2.1.1.3 Zpětná vazba s optronem a Zenerovou diodou

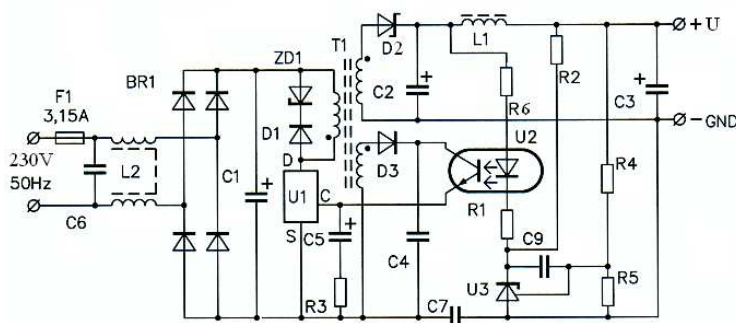
Do zpětnovazebního vinutí transformátoru je vřazen optron se Zenerovou diodou. Tato technika je vhodná pro střední výkonové úrovně (až do 30 W) a je rozumně přesná, obzvláště při výstupních napětích vyšších než 5 V.



Obr. 14 Zpětná vazba s optronem a Zenerovou diodou (převzato z [1])

5.2.1.1.4 Zpětná vazba s optronem a obvodem TL431

Zpětná vazba s optronem (s CTR 50% až 200%) a obvodem TL431 (zdroj referenčního napětí) používá referenci pro snímání regulační odchylky a je použitelná v celém výkonovém spektru výstupních napětíových rozsahů.



Obr. 15 Zpětná vazba s optronem a obvodem TL431 (převzato z [1])

5.2.2 Výpočet maximálního / minimálního vstupního napětí a výstupního výkonu.

Max. / Min. vstupní napětí + výstupní výkon			
Maximální vstupní napětí	U_{ACMAX}	265	V
Minimální vstupní napětí	U_{ACMIN}	195	V
Celkový výstupní výkon	P_0	77,05	W

kde:

$$U_{ACMAX} = 1,15 \cdot U_{AC} \text{ [V]} \quad (1)$$

$$U_{ACMIN} = 0,85 \cdot U_{AC} \text{ [V]} \quad (2)$$

$$P_0 = U_{01} \cdot I_{01} + U_{02} \cdot I_{02} + U_{03} \cdot I_{03} + U_{04} \cdot I_{04} \text{ [W]} \quad (3)$$

5.2.3 Výpočet (volba) parametrů vstupního kondenzátoru

Nabíjecí (vstupní) kondenzátor C_{IN} (C_I)			
Výpočet	C_I	77,05	μF
Volba	C_I	100	μF
Kontrolní výpočty pro zvolený kondenzátor			
Vstupní proud	I_{IN}	0,4467	A
Zvlnění napětí na kondenzátoru	p	4,120	%

kde:

C_I hodnota kapacity nabíjecího (vstupního, skladovacího) kondenzátoru $C_{IN} = C_I$. Velikost kapacity tohoto kondenzátoru je závislá na vstupním napájecím napětí a velikosti výstupního výkonu. Doporučené empirické pravidlo pro výběr kapacity kondenzátoru C_{IN} říká, že je vhodné použít $1\mu\text{F}$ jeho kapacity na každý watt výstupního výkonu pro vstupní napětí 230V

I_{IN} přibližná hodnota vstupního proudu se vypočte dle vzorce:

$$I_{IN} = \frac{P_o}{U_{IN} \cdot \eta} \quad [\text{A}] \quad (4)$$

p zvlnění napětí na kondenzátoru C_{IN} , které by nemělo přesáhnout hodnotu 5 %, a lze jej určit dle vzorce:

$$p = \frac{300 \cdot I_{IN}}{U_{CIN} \cdot C_{IN}} \quad [\%] \quad (5)$$

5.2.4 Výpočet maximálního / minimálního vstupního stejnosměrného napětí.

Stejnosemřné vstupní napětí			
Maximální vstupní stejnosměrné napětí	U_{MAX}	374	V
Minimální vstupní stejnosměrné napětí	U_{MIN}	239	V

kde:

$$U_{MAX} = \sqrt{2} \cdot U_{ACMAX} \quad (6)$$

$$U_{MIN} = \sqrt{(2 \cdot U_{ACMIN}^2) - \frac{2 \cdot P_o \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot f_L} - t_C \right)}{\eta \cdot C_{IN}}} \quad (7)$$

5.2.5 Zadání velikosti zpětného indukovaného napětí

Určení zpětně indukovaného napětí U_{OR} je závislé na počtu výstupních napětí a zvoleném typu obvodu TOPSwitch. Například pro řadu TOPSwitch-GX platí:

$U_{OR} = 120 \text{ V}$ pro zdroj s jedním výstupním napětím a $U_{OR} = 100 \text{ V}$ pro zdroj s vícenásobným výstupním napětím.

5.2.6 Výpočet velikosti omezovacího napětí, Zenerova omezovacího napětí a maximálního napětí na obvodu TOPSwitch

Zpětné indukované napětí, Zenerovo omezovací napětí a maximálního napětí na obvodu TOPSwitch			
Velikost zpětného napětí	U_{OR}	100	V
Velikost omezovacího napětí	U_{CLO}	150	V
Hodnota Zenerova (omezovacího) napětí	U_{CLM}	210	V
Maximální napětí U_{DS} kolektor-emitor (DRAIN-SOURCE)	U_{DSMAX}	604	V

kde:

$$U_{CLO} = 1,5 \cdot U_{OR} \quad [\text{V}] \quad (8)$$

$$U_{CLM} = 1,4 \cdot U_{CLO} \quad [\text{V}] \quad (9)$$

$$U_{DSMAX} = U_{MAX} + (1,4 \cdot 1,5 \cdot U_{OR}) + 20 \quad [\text{V}] \quad (10)$$

5.2.7 Nastavení hodnoty napětí kolektor-emitor (DRAIN-SOURCE)

Doporučená hodnota napětí U_{DS} při zahájení návrhu je 10V.

5.2.8 Výpočet maximální hodnoty střídý

Určení hodnoty maximální střídý			
Volba napětí kolektor-emitor (DRAIN-SOURCE)	U_{DS}	10	V
Maximální hodnota střídý	DC_{MAX}	30,40	%

kde:

$$DC_{MAX} = \frac{U_{OR}}{U_{OR} + (U_{MIN} - U_{DS})} \quad (11)$$

Pozn.: Tento vzorec platí pouze pokud obvod TOPSwitch pracuje ve spojitým režimu.

5.2.9 Zadání koeficientu poměru zvlněného a špičkového proudu

Určení poměru zvlněného a špičkového primárního proudu			
Koeficient poměru	K_{RP}	0,65	-

kde:

K_{RP} se zadává v rozmezí 0,4 (spojitý režim) až 1,0 (nespojitý režim). Doporučená hodnota při zahájení návrhu je 0,6.

5.2.10 Výpočet střední hodnoty / špičkové hodnoty / efektivní hodnoty vstupního proudu

Parametry primárního vinutí			
Střední hodnota vstupního proudu	I_{AVG}	0,4298	A
Špičková hodnota primárního proudu	I_P	2,0945	A
Efektivní hodnota primárního proudu	I_{RMS}	0,8091	A

kde:

$$I_{AVG} = \frac{P_0}{\eta \cdot U_{MIN}} \quad [A] \quad (12)$$

$$I_P = \frac{I_{AVG}}{(1 - K_{RP} / 2) \cdot DC_{MAX}} \quad [A] \quad (13)$$

$$I_{RMS} = I_P \cdot \sqrt{DC_{MAX} \cdot (K_{RP}^2 / 3 - K_{RP} + 1)} \quad [A] \quad (14)$$

5.2.11 Výpočet minimální hodnoty limitního proudu

$$I_{LIMIT(MIN)} \geq I_P / 0,94 \quad [A] \quad (15)$$

Pozn.: Tento vzorec platí pouze pokud obvod TOPSwitch pracuje ve spojitým režimu.

5.2.12 Volba kmitočtu spínání a obvodu TOPSwitch, zadání hodnoty koeficientu pro externí nastavení hodnoty limitního proudu

Zvolíme nejmenší obvod TOPSwitch splňující požadavky výstupního výkonu P_0 a minimální hodnoty limitního proudu $I_{LIMIT(IN)}$. Zadáme koeficient pro externí nastavení hodnoty limitního proudu K_I . Pokud externí nastavení nepožadujeme, nastavíme $K_I = 1$.

5.2.13 Výpočet externě redukováného limitního proudu a výpočet teploty přechodů čipu.

Za použití katalogových hodnot $I_{LIMIT(MIN)}$ a $I_{LIMIT(MAX)}$ vypočteme externě regulované hodnoty limitního proudu dle vzorců:

$$I_{LIMIT(MIN)} = \text{katal. hodnota } I_{LIMIT(MIN)} \cdot K_I \quad (16)$$

$$I_{LIMIT(MAX)} = \text{katal. hodnota } I_{LIMIT(MAX)} \cdot K_I \quad (17)$$

Dále je nutné vypočíst teplotu přechodů čipu T_j obvodu TOPSwitch jako funkce celkových ztrát, kde jednotlivé ztráty jsou:

- ztráty vedením proudu sepnutého MOSFET tranzistoru při nejmenší hodnotě vstupního střídavého napětí:

$$P_{IR} = I_{RMS}^2 \cdot R_{DS(ON)100[^\circ C]} \quad [W] \quad (18)$$

kde: $R_{DS(ON)100[^\circ C]}$ [Ω] je katalogová hodnota odporu kanálu interního MOSFET tranzistoru mezi kolektorem (DRAIN) a emitorem (SOURCE) v sepnutém stavu.

- přepínací ztráty obvodu TOPSwitch při nejmenší ho vstupního střídavého napětí:

$$P_{CXT} = 0,5 \cdot C_{XT} \cdot (U_{MAX} + U_{OR})^2 \cdot f_s \quad [W] \quad (19)$$

kde: C_{XT} [F] je vnější kapacita mezi kolektorovým a emitorovým uzlem (kapacita primárního vinutí transformátoru)

Teplota přechodů čipu T_j obvodu TOPSwitch lze stanovit dle vzorce:

$$T_j = 25 \text{ } ^\circ C + (P_{IR} + P_{CXT}) \cdot K_{JA} \quad [^\circ C] \quad (20)$$

Je-li hodnota $T_j > 100 \text{ } ^\circ C$, musíme volit výkonnější typ obvodu TOPSwitch, nebo použít chladič (pokud to provedení pouzdra obvodu umožňuje).

5.2.14 Kontrola špičkové hodnoty primárního proudu vzhledem k nastavenému limitnímu proudu

Nyní je nutné provést kontrolu špičkového primárního proudu I_p vzhledem k nastavenému limitnímu proudu $I_{LIMIT(MIN)}$.

$$\text{Pro } K_I = 1 \text{ platí: } I_p \leq 0,96 \cdot I_{LIMIT(MIN)} \quad (21)$$

$$\text{a pro } K_I < 1 \text{ platí: } I_p \leq 0,94 \cdot I_{LIMIT(MIN)} \quad (22)$$

Pokud nejsou tyto podmínky splněny, je nutné zvolit výkonnější typ obvodu TOPSwitch.

Volba obvodu TOPSwitch (krok 11 až 14)			
Požadovaný výkon	P_O	77,05	W
Požadovaný minimální limit proudu (pokojová teplota)	$I_{LIMIT(MIN)}$	2,2282	A
Kmitočet spínání	f_s	132	kHz
Zvolený obvod TOPSwitch	Vyhledej	TOP246Y	-
Maximální výkon obvodu	P	125	W
Minimální hodnota omezení proudu zvoleného obvodu	$I_{LIMIT(MIN)}$	2,511	A
Maximální hodnota omezení proudu zvoleného obvodu	$I_{LIMIT(MAX)}$	2,889	A
Odpor kanálu interního tranzistoru MOSFET mezi kolektor-emitor v sepnutém stavu	$R_{DS(ON)}$	4,3	Ω
Koeficient pro externí nastavení I_{LIMIT}	K_I	0,9	-
Výpočet externě redukováného $I_{LIMIT(MIN)}$	$I_{LIMIT(MIN)}$	2,2599	A
Výpočet externě redukováného $I_{LIMIT(MAX)}$	$I_{LIMIT(MAX)}$	2,6001	A
Tepelný odpor mezi přechodem a pouzdrům součástky	Θ_{JA}	25	$^\circ C/W$

Ztráty vedením proudu sepnutým interním MOSFET tranzistoru při min. hodnotě vstupního proudu	P_{IR}	2,8150	W
Hodnota vnější kapacity mezi kolektorovým a emitorovým uzlem	C_{XT}	10,00	pF
Přepínací ztráty obvodu při nejmenší hodnotě vstupního střídavého napětí	P_{CXT}	0,1483	W
Teplota přechodů čipu jako funkce celkových ztrát	T_j	99,08	°C
Kontrola I_p vzhledem k nastavení K_I	-	2,1243	A

5.2.15 Výpočet indukčnosti primárního vinutí transformátoru

$$L_p = \frac{10^6 \cdot P_0}{I_p^2 \cdot K_{RP} \cdot (1 - K_{RP} / 2) \cdot f_s} \cdot \frac{Z \cdot (1 - \eta) + \eta}{\eta} \quad [\mu\text{H}] \quad (23)$$

5.2.16 Výběr typu jádra a cívky a zadání šířky okrajů

Zvolíme typ jádra a cívky na základě požadovaného výstupního výkonu P_0 a zadáme požadovanou šířku okrajů M v rozsahu 2,5 až 3 mm. Excelovská tabulka automaticky doplní základní parametry zvoleného transformátoru, které jsou nutné pro další výpočty.

5.2.17 Nastavení počtu vrstev primárního vinutí cívky, konstanty transformátoru a napětí na výstupních usměrňovacích diod

kde:

L je počet vrstev primárního vinutí. Začínáme s hodnotou $L = 2$.

N_J je konstanta transformátoru, určující počet závitů na jeden volt daného vinutí. Začínáme s hodnotou $N_J = 0,6$ z/V.

U_D napětí na diodě v propustném směru výstupního usměrňovače (pro hlavní výstup U_{oi})

U_{DB} napětí na diodě v propustném směru zpětnovazebního usměrňovače

5.2.18 Výpočet počtu závitů primárního a zpětnovazebního vinutí

Počet závitů primárního vinutí:

$$N_p = N_J \frac{U_{OR}}{U_o + U_D} \quad (24)$$

Počet závitů zpětnovazebního vinutí:

$$N_B = N_J \frac{U_B + U_{DB}}{U_o + U_D} \quad [\text{Závitů}] \quad (25)$$

5.2.19 Určení vnějšího průměru vodiče primárního vinutí

Vnější průměr vodiče primárního vinutí, který zabezpečí, že primární vinutí bude mít optimálně jednu nebo dvě vrstvy (v závislosti na volbě L), které počítají s vhodnými okraji:

$$OD = \frac{L \cdot (B_w - 2 \cdot M)}{N_p} \quad (26)$$

kde:

B_w fyzická šířka cívky [mm]

5.2.20 Volba čistého průměru vodiče primárního vinutí

Dle vypočteného údaje (krok 19) můžeme vybrat vodič ze standardní nabídky výrobců, určíme tedy čistý průměr vodiče - DIA .

5.2.21 Výpočet hustoty magnetického toku v jádře (magnetická indukce)

Jedním z kritických parametrů při návrhu je hustota magnetického toku v jádře, kterou určíme dle vztahu:

$$B_M = \frac{100 \cdot I_P \cdot L_P}{N_P \cdot A_e} \cdot \frac{1}{10000} \text{ [T]} \quad (27)$$

kde:

A_e je účinný průřez jádra

5.2.22 Kontrola vypočtené hustoty magnetického toku v jádře

Jestliže je B_M větší než 0,3 T, musíme buď zvolit jádro s vyšším průřezem, nebo zvýšit počet primárních závitů N_P (zvýšením koeficientu K_J) a to tak dlouho, než se dostaneme do rozsahu 0,2 až 0,3 T. Jedná se tedy o zopakování kroků 16 až 21.

5.2.23 Určení mezery v jádře a proudové kapacity vodiče

Velikost "vzduchové" mezery v magnetickém obvodu jádra transformátoru vypočteme dle vztahu:

$$L_g = 40 \cdot \pi \cdot A_e \left(\frac{N_P^2}{1000 \cdot L_P} - \frac{1}{A_L} \right) \text{ [mm]} \quad (28)$$

kde:

A_L je indukční konstanta pro jádro bez vzduchové mezery

Běžná proudová kapacita vodiče (převrácená hodnota proudové hustoty) lze vypočíst použitím vztahu:

$$CMA = \frac{1,27 \cdot DIA^2 \cdot \pi}{I_{RMS} \cdot 4} \cdot \left(\frac{1000}{25,4} \right)^2 \text{ [mil}^2/\text{A]} \quad (29)$$

5.2.24 Kontrola vypočtené mezery v jádře

Jestliže je L_g menší než 0,1 mm, musíme opět buď zvolit jádro s vyšším průřezem, nebo zvýšit počet primárních závitů N_P (zvýšením koeficientu K_J) a to tak dlouho, než bude splněna podmínka $L_g \geq 0,1$ mm. Jedná se tedy o zopakování kroků 16 až 23.

5.2.25 Kontrola vypočtené proudové kapacity vodiče

Vypočtená proudová kapacita vodiče (primárního) musí splňovat podmínku $500 \geq CMA \geq 200$ [mil²/A]. Pokud je CMA menší než 200 mil²/A, je zapotřebí zvolit větší průměr vodiče. To může být realizováno přidáním další vrstvy primárního vinutí, nebo použitím větší cívky a kostry cívky. Naproti tomu, je – li CMA větší než 500 mil²/A, lze použít menší průměr vodiče a případně menší cívku. Jedná se tedy o zopakování kroků 16 až 24.

5.2.26 Změna počtu vrstev primárního vinutí cívky a konstanty transformátoru

Jedná se o itineraci počtu vrstev primárního vinutí (L) a konstanty transformátoru (N_J), určující počet závitů na jeden volt daného vinutí. Začínáme s hodnotou $N_J = 0,6$ z/V. Excelovský program, po změně těchto hodnot, automaticky přepočítá parametry na nichž jsou tyto závislé.

5.2.27 Výpočet magnetické indukce při zvoleném koeficientu externího nastavení limitního proudu

$$B_P = \frac{I_{LIMIT(MAX)}}{I_P} \cdot B_M \text{ [T]} \quad (30)$$

5.2.28 Kontrola vypočtené magnetické indukce při zvoleném koeficientu externího nastavení limitního proudu

Je nezbytné, aby byla splněna podmínka $B_P \leq 0,42$ T. Tímto se uchráníme před saturací transformátoru při spuštění a výstupnímu přetížení. Pokud není podmínka splněna, je zapotřebí snížit koeficient pro externí nastavení K_I - viz. krok 12.

Transformátor: volba + výpočty (kroky 15 až 28)			
Indukčnost primárního vinutí transformátoru	L_P	372	μH
Zvolený transformátor	Vyhledej	ETD29-3C90	-
Maximální výkon	P_{max}	109,50	W
Efektivní (účinná) plocha jádra	A_e	76,00	mm ²
Efektivní délka magnetické siločáry	L_e	72,00	mm
Indukční konstanta pro jádro bez vzduchové mezery	A_L	2350	nH
Šířka cívky	B_W	19,50	mm
Bezpečnostní šířka okraje	M	2,50	mm
Konstanta transformátoru určující počet závitů na jeden volt daného vinutí	N_J	2	z/V
Počet vrstev primárního vinutí	L	2	-
Napětí na diodě v propustném směru (hlavní výstup)	U_D	0,55	V
Vypočtený počet závitů primárního vinutí	N_P	51,95	z.
Napětí na diodě v propustném směru (zpětnovazební)	U_{DB}	0,70	V
Počet závitů zpětnovazebního vinutí	N_B	6,60	z.
Maximální vnější průměr vodiče primárního vinutí	OD	0,558	mm
Volba průměru vodiče primárního vinutí	DIA	0,450	mm
Hustota magnetického toku v jádře (magn. indukce)	B_M	0,1974	T
Velikost "vzduchové" mezery v magnetickém obvodu jádra transformátoru	L_g	0,6522	mm
Proudová kapacita vodiče	CMA	386,94	mil ² /A
Kontrola magnetické indukce při zvoleném K_I	B_P	0,2451	T

5.2.29 Výpočet velikosti napětí na jeden závit vinutí

$$U_{PT} = \frac{U_{O1} + U_D}{N_{S1}} \text{ [V/závit]} \quad (31)$$

kde:

U_{01} je požadované výstupní napětí za diodou (pro hlavní výstup U_{01})

U_D napětí na diodě v propustném směru výstupního usměrňovače (pro hlavní výstup U_{01})

N_{S1} je počet závitů sekundárního vinutí (pro hlavní výstup U_{01})

5.2.30 Výpočet špičkové / efektivní hodnoty sekundárního proudu a poměru efektivního a středního proudu

Špičková hodnota sekundárního proudu:

$$I_{SP} = I_P \cdot \frac{N_P}{N_S} \quad [\text{A}] \quad (32)$$

kde:

I_P je špičková hodnota primárního proudu

N_P je počet závitů primárního vinutí

N_S je celkový počet závitů sekundárního vinutí

Efektivní hodnota sekundárního proudu (pro hlavní vinutí):

$$I_{SRMS} = I_{SP} \cdot \sqrt{(1 - DC_{MAX}) \cdot (K_{RP}^2 / 3 - K_{RP} + 1)} \quad [\text{A}] \quad (33)$$

Poměr efektivního a středního proudu:

$$K_{RA} = \frac{I_{SRMS}}{I_{01}} \quad [-] \quad (34)$$

I_{01} je požadovaný výstupní proud (pro hlavní výstup U_{01})

Transformátor - ostatní výpočty (kroky 29 a 30)			
Výpočet velikosti napětí na jeden závit	U_{PT}	1,9250	V
Špičková hodnota sekundárního proudu	I_{SP}	8,1816	A
Efektivní hodnota sekundárního proudu	I_{SRMS}	4,7820	A
Poměr efektivního a středního proudu	K_{RA}	1,3663	-

5.2.31 Výpočet počtu závitů jednotlivých sekundárních vinutí

Počty závitů jednotlivých sekundárních vinutí lze vypočítat užitím vztahu:

$$N_{Sx} = \frac{U_{0x} + U_D}{U_{PT}} \quad [\text{závitů}] \quad (35)$$

kde:

N_{Sx} je počet závitů jednotlivých sekundárních vinutí

U_{0x} je požadované výstupní napětí za diodou jednotlivých výstupů

U_D napětí na diodě v propustném směru výstupního usměrňovače jednotlivých výstupů

5.2.32 Výpočty: efektivní hodnoty proudu v jednotlivých sekundárních vinutích, průměrů sekundárních vodičů a efektivních hodnot zvlněného proudu

Efektivní hodnota proudu v jednotlivých sekundárních vinutích:

$$I_{RMS} = I_{0x} \cdot K_{RA} \quad [\text{A}] \quad (36)$$

kde:

I_{0x} je požadovaný výstupní proud

Průměr sekundárního vodiče jednotlivých sekundárních vinutí:

$$DIA_S = \sqrt{\frac{4 \cdot CMA_S \cdot I_{RMS}}{1,27 \cdot \pi}} \cdot \frac{25,4}{1000} \text{ [mm]} \quad (37)$$

kde:

CMA_S je hodnota proudové hustoty vodiče (pro výpočet je použita hodnota 200 mil²/A)

Minimálního počet paralelních vinutí při použití zvoleného vodiče lze určit užitím vztahu:

$$PPV_S = \frac{DIA_S^2}{DIA_{SZV}^2} \text{ [-]} \quad (38)$$

kde:

PPV_S je minimální počet paralelních vinutí při zvoleném vodiči

DIA_S je vypočtený průměr vodiče

DIA_{SZV} je průměr zvoleného vodiče

Efektivní hodnota zvlněného proudu:

$$I_{RIPPLE} = \sqrt{I_{RMS}^2 - I_{0x}^2} \text{ [A]} \quad (39)$$

kde:

I_{RMS} je efektivní hodnota proudu v jednotlivých sekundárních vinutích

I_{0x} je požadovaný výstupní proud

5.2.33 Výpočty maximálních hodnot závěrného špičkového napětí na usměřňovacích sekundárních diodách (zpětnovazební usměřňovací diody)

Maximální hodnota závěrného špičkového napětí na usměřňovací diodě sekundárního usměřňovače:

$$PIV_{Sx} = U_{Ox} + \left(U_{MAX} \cdot \frac{N_S}{N_P} \right) \text{ [V]} \quad (40)$$

a pro zpětnovazební vinutí platí:

$$PIV_B = U_B + \left(U_{MAX} \cdot \frac{N_B}{N_P} \right) \text{ [V]} \quad (41)$$

5.2.34 Stanovení maximálního závěrného napětí a maximálního propustného proudu pro jednotlivé usměřňovací sekundární diody

Diody pro každý výstup by měly mít maximální závěrné napětí a vyšší než:

$$U_R \geq 1,25 \cdot PIV_{Sx} \text{ [V]} \quad (42)$$

Empirické pravidlo doporučuje volit diodu se stejnosměrným propustným proudem alespoň ve výši:

$$I_F (I_D) > 3 \cdot I_{Ox} \text{ [A]} \quad (43)$$

Transformátor - jednotlivá vinutí (kroky 31 až 34)			
Primární vinutí			
Počet závitů vinutí	N_P	52	z.
Počet závitů 1. vrstvy vinutí	N_{P1}	26	z.
Činitel plnění okna pro zvolený průměr vodiče	-	91	%

Počet závitů 2. vrstvy vinutí	N_{P2}	26	z.
Činitel plnění okna pro zvolený průměr vodiče	-	91	%
Zpětnovazební vinutí	U_B	12	V
Požadované výstupní napětí	U_B	12,00	V
Napětí na diodě v propustném směru	U_{DB}	0,95	V
Použitý počet závitů vinutí	N_B	7	z.
Skutečná hodnota výstupního napětí	U_{BSk}	12,70	V
Špičkové reverzní napětí sekundárního vinutí	PIV_B	63,75	V
Minimální hodnota závěrného napětí pro zvolenou diodu	U_R	79,69	V
Minimální hodnota propustného proudu zvolené diody	$I_F(I_D)$	0,18	A
1. Sekundární vinutí	U_{O1}	3,30	V
Napětí na diodě v propustném směru	U_D	0,60	V
Vypočtený počet závitů vinutí	N_{S1}	2	z.
Skutečná hodnota výstupního napětí	U_{O1Sk}	3,30	V
Efektivní hodnota sekundárního proudu	I_{SRMS1}	4,7820	A
Minimální průměr holého vodiče	DIA_{S1}	0,787	mm
Volba průměru vodiče sekundárního vinutí	DIA_{S1}	0,450	mm
Minimální počet paralelních vinutí při použití zvoleného vodiče	PPV_{S1}	3	-
Efektivní hodnota zvlněného proudu výstupním kondenzátorem	I_{RIPPLE}	3,2585	A
Špičkové reverzní napětí sekundárního vinutí	PIV_S	17,89	V
Minimální hodnota závěrného napětí pro zvolenou diodu	U_R	22,36	V
Minimální hodnota propustného proudu zvolené diody	$I_F(I_D)$	10,50	A
2. Sekundární vinutí	U_{O2}	5,00	V
Napětí na diodě v propustném směru	U_D	0,70	V
Vypočtený počet závitů vinutí	N_{S2}	2,92	z.
Použitý počet závitů vinutí	N_{S2}	3,0	z.
Skutečná hodnota výstupního napětí	U_{O2Sk}	5,15	V
Tolerance od zadané hodnoty výstupního napětí	Tol.	3,00	%
Efektivní hodnota sekundárního proudu	I_{SRMS2}	4,7820	A
Minimální průměr holého vodiče	DIA_{S2}	0,787	mm
Volba průměru vodiče sekundárního vinutí	DIA_{S2}	0,450	mm
Minimální počet paralelních vinutí při použití zvoleného vodiče	PPV_{S2}	3	-
Efektivní hodnota zvlněného proudu výstupním kondenzátorem	I_{RIPPLE}	3,2585	A
Špičkové reverzní napětí sekundárního vinutí	PIV_S	26,58	V
Minimální hodnota závěrného napětí pro zvolenou diodu	U_R	33,22	V
Minimální hodnota propustného proudu zvolené diody	$I_F(I_D)$	10,50	A
3. Sekundární vinutí	U_{O3}	12,00	V
Napětí na diodě v propustném směru	U_D	0,80	V
Vypočtený počet závitů vinutí	N_{S3}	6,56	z.
Použitý počet závitů vinutí	N_{S3}	7,0	z.
Skutečná hodnota výstupního napětí	U_{O3Sk}	12,85	V
Tolerance od zadané hodnoty výstupního napětí	Tol.	7,08	%
Efektivní hodnota sekundárního proudu	I_{SRMS3}	2,7326	A
Minimální průměr holého vodiče	DIA_{S3}	0,595	mm
Volba průměru vodiče sekundárního vinutí	DIA_{S3}	0,450	mm
Minimální počet paralelních vinutí při použití zvoleného vodiče	PPV_{S3}	2	-
Efektivní hodnota zvlněného proudu výstupním kondenzátorem	I_{RIPPLE}	1,8620	A

Špičkové reverzní napětí sekundárního vinutí	PIV_S	62,35	V
Minimální hodnota závěrného napětí pro zvolenou diodu	U_R	77,93	V
Minimální hodnota propustného proudu zvolené diody	$I_F(I_D)$	6,00	A
4. Sekundární vinutí			
Napětí na diodě v propustném směru	U_D	0,80	V
Vypočtený počet závitů vinutí	N_{S4}	6,56	z.
Použitý počet závitů vinutí	N_{S4}	7,0	z.
Skutečná hodnota výstupního napětí	U_{04SK}	-12,85	V
Tolerance od zadané hodnoty výstupního napětí	$Tol.$	7,08	%
Efektivní hodnota sekundárního proudu	I_{SRMS4}	2,7326	A
Minimální průměr holého vodiče	DIA_{S4}	0,595	mm
Volba průměru vodiče sekundárního vinutí	DIA_{S4}	0,450	mm
Minimální počet paralelních vinutí při použití zvoleného vodiče	PPV_{S4}	2	-
Efektivní hodnota zvlněného proudu výstupním kondenzátorem	I_{RIPPLE}	1,8620	A
Špičkové reverzní napětí sekundárního vinutí	PIV_S	62,35	V
Minimální hodnota závěrného napětí pro zvolenou diodu	U_R	77,93	V
Minimální hodnota propustného proudu zvolené diody	$I_F(I_D)$	6,00	A

5.2.35 Volba jednotlivých usměrňovací sekundárních diod a zpětnovazební usměrňovací diody

Jednotlivé usměrňovací diody volíme s ohledem na kroky 33 a 34. Diody volíme buď ultra rychlé křemíkové PN výkonové diody nebo Schottkyho diody. Vhodným výběrem počtu závitů a usměrňovacích diod lze dosáhnout téměř dokonale počtu závitů jednotlivých sekundárních vinutí jako celých čísel a dodržet tak požadovanou toleranci hodnot výstupních napětí, kterou lze určit použitím vztahu:

$$Tol. = \frac{U_{0xSK} - U_{0x}}{U_{0x}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (44)$$

kde:

U_{0x} je požadované výstupní napětí

U_{0xSK} je skutečné výstupní napětí, které lze stanovit dle vztahu:

$$U_{0xSK} = U_{PT} \cdot N_{Sx} - U_D \quad [\text{V}] \quad (45)$$

kde:

N_{Sx} je skutečný počet závitů příslušného sekundárního vinutí

U_D je napětí na příslušné usměrňovací diodě v propustném stavu

Pro vypočtené parametry jsem z katalogu GM Elektronik zvolil následující diody:

Výstupní napětí	Parametry zvolené diody				
	Označení	Typ	U_R [V]	I_F [A]	U_D [V]
U_B	1N4148	Ultra-rychlá	75	200	0,95
U_{01}	MBR1045CT	Schottkyho	45	10	0,55
U_{02}	MBR1060CT	Schottkyho	60	10	0,7
U_{03}	BYW29-150	Ultra-rychlá	150	8	0,8
U_{04}	BYW29-150	Ultra-rychlá	150	8	0,8

Pozn.: Excelovský program provádí automatický přepočtení počtu závitů, skutečnou velikost výstupního napětí a toleranci výstupního napětí při jakékoliv změně parametrů na nichž jsou uvedené veličiny závislé.

5.2.36 Výběr typu výstupního kondenzátoru

Pro správnou volbu výstupního kondenzátoru, s ohledem na hodnotě zvlněného proudu I_{RIPPLE} , platí několik pravidel, a to:

- zvlněný proud kondenzátorem musí být specifikovaný při teplotě 105 °C a kmitočtu 100 kHz a musí být rovný nebo větší než vypočtený I_{RIPPLE} daného výstupu
- je zapotřebí používat elektrolytické kondenzátory s nízkou hodnotou ESR . Výstupní zvlněné napětí lze vypočíst dle vztahu:

$$U_{RIPPLE} = I_{SP} \cdot ESR \text{ [V]} \quad (46)$$

- pro snížení zvlnění při vysokých výstupních proudech je zapotřebí použít paralelní zapojení několika kondenzátorů (snížení ESR)

Pro vypočtené parametry jsem z katalogu GM Electronic zvolil následující elektrolytické kondenzátory:

Výstupní napětí	Parametry kondenzátorů HITANO EXR série				
	C [μ]	U [V]	I_{RIPPLE} [A]	ESR [Ω]	Počet ks
U_{01}	1000	35	1,9	0,042	2
U_{02}	1000	35	1,9	0,042	2
U_{03}	1000	35	1,9	0,042	1
U_{04}	1000	35	1,9	0,042	1

5.2.37 Přidání výstupního LC filtru

Pokud je výstupní napětí příliš zvlněné, doplní se obvod od výstupní LC filtr. Opět platí několik pravidel:

- cívka L s indukčností 2,2 až 4,7 μ H. Jednotlivé cívky volíme na základě výstupního proudu s ohledem na možné stejnosměrné úbytky napětí. Volíme ji tedy raději pro vyšší proudy (použit silnější vodič = menší ESL (R_S)), než je nutné.
- kondenzátor C s kapacitou 100 μ F (220 μ F) na napětí 35 V s nízkou hodnotou ESR .

Pro vypočtené hodnoty z katalogu GM Electronic volím následující součástky:

Tlumivka L : SCB8D43 4,7 μ H – MATSUTA SMD provedení, $I_{max} = 4,5$ A, $ESL = 0,035$ Ω

Kondenzátor C : 100 μ F / 35 V - HITANO EXR série, $ESR = 0,25$ Ω

(Kondenzátor C : 220 μ F / 35 V - HITANO EXR série, $ESR = 0,22$ Ω)

5.2.38 Výběr zpětnovazebního kondenzátoru

Vzhledem k nízkému zpětnovazebnímu napětí a minimálnímu výkonu, volí se obvykle keramický kondenzátor o kapacitě 0,1 μ F na napětí 50 V.

5.2.39 Výběr kondenzátoru řídicí elektrody CONTROL a jeho sériového odporu

Použijeme levný elektrolytický kondenzátor o kapacitě 47 μ F na napětí 10 V s odporem 6,8 Ω (0,25 W) zapojeným do série.

5.2.40 Výběr omezovací Zenerovy diody (transilu) a blokovací diody

Výběr těchto součástek, určených pro ochranu spínacího tranzistoru MOSFET obvodu TOPSwitch před indukovaným napětím při rozpínání proudu primárním vinutím transformátoru, je závislý na hodnotě napětí U_{CLO} (vypočteného v kroku 6) a typu navrhovaného zdroje (s jedním výstupem / s více výstupy) a požadovaném výstupním výkonu zdroje. Základní zapojení této ochrany se skládá ze Zenerovy diody (transilu) a blokovací diody. Pro výkony vyšší než 50 W se doporučuje k Zenerové diodě paralelně připojit paralelní RC člen. Na základě doporučených hodnot uvedených v

katalogovém listu zvoleného obvodu TOPSwitch, jsem z katalogu GM Elektronik zvolil následující součástky:

Blokovací dioda: 1N4937, transil: P6KE200A, odpor $R = 20 \text{ k}\Omega / 2 \text{ W}$ a kondenzátor $C = 3,3 \text{ nF} / 500 \text{ V}$.

5.2.41 Výběr typu vstupního můstkového usměrňovače

Vstupní můstkový usměrňovač musí splňovat následující požadavky:

- velikost závěrného napětí zvolené usměrňovací diody ve výši:

$$U_R \geq \sqrt{2} \cdot U_{ACMAX} \text{ [V]} \quad (47)$$

- velikost propustného proudu zvolené usměrňovací diody ve výši:

$$I_F \geq 2 \cdot I_{ACRMS} \text{ [A]} \quad (48)$$

kde:

I_{ACRMS} je efektivní hodnota vstupního střídavého proudu, kterou lze určit:

$$I_{ACRMS} = \frac{P_0}{\eta \cdot U_{MIN}} \text{ [A]} \quad (49)$$

Pro vypočtené hodnoty z katalogu GM Elektronik volím následující diody:

1N4007 - $U_R = 1000 \text{ V}$, $I_F = 1 \text{ A}$

6. Dokončení návrhu spínaného zdroje

6.1 Dodatečné výpočty (návrhy)

6.1.1 Nastavení ochrany proti podpětí a přepětí

Vzhledem k tomu, že v předchozích výpočtech jsem stanovil hodnotu koeficientu pro externí nastavení I_{LIMIT} , bylo zapotřebí doplnit obvod TOPSwitch o odpor $R3$. Jeho hodnotu jsem určil z grafu závislosti proudu omezení na hodnotě odporu R_{IL} ($R3$), který je uveden v katalogovém listu obvodu TOP246Y.

Z katalogového listu obvodu TOP246Y jsem rovněž zjistil hodnotu odporu $R4$, který zajišťuje ochranu obvodu proti podpětí ($U_{UV} = 100 \text{ V}$) a přepětí ($U_{OV} = 450 \text{ V}$).

6.1.2 Úprava zpětnovazebního obvodu

Vzhledem k požadovanému výstupnímu výkonu a požadované přesnosti výstupního napětí, jsem se rozhodl pro zapojení s optronem a obvodem TL431 (viz. Obr. 15). Základní zapojení jsem doplnil o odpor $R7$ a kondenzátor $C16$, které zabezpečují kmitočtovou kompenzaci zpětnovazební smyčky. Pro zlepšení regulace výstupních napětí jsem se rozhodl použít křížovou regulaci (podmínkou je ale vhodné uspořádání jednotlivých vinutí transformátoru). Doplnil jsem regulační signál z hlavního výstupu $3,3 \text{ V}$ o signál z výstupu 5 V . Za předpokladu, že referenční napětí TL431 je $U_{REF} = 2,495 \text{ V}$ a referenční proud $I_{REF} = 2 \mu\text{A}$, postup návrhu (výpočtu) jednotlivých hodnot odporů je následující:

- Na odporu $R8$ musí být napětí odpovídající hodnotě referenčního napětí TL431. Lze tedy stanovit proud odporem dle vzorce:

$$I_{R8} = \frac{U_{REF}}{R8} = \frac{2,495}{10 \cdot 10^3} = 249,5 \mu\text{A} \quad (50)$$

- Odporem $R9$ protéká přibližně 50% hodnoty proudu odporem $R8$. Toto nastavení nám zajistí, že výstupní napětí 5 V bude mít vliv na celkovou zpětnou vazbu až z 50%. Hodnota odporu $R9$ lze pak vypočíst dle:

$$R9 = \frac{U_{02} - U_{REF431}}{0,5 \cdot I_{R8}} = \frac{5 - 2,495}{0,5 \cdot 249 \cdot 10^{-6}} = 20,08 \text{ k}\Omega \quad (51)$$

Hodnotu odporu volím 20 kΩ.

- Skutečný proud zvoleným odporem R9 lze určit užitím vztahu:

$$I_{R9} = \frac{U_{02} - U_{REF431}}{R9} = \frac{5 - 2,5}{20 \cdot 10^{-3}} = 125,25 \text{ }\mu\text{A} \quad (52)$$

- Proud odporem R10 lze určit užitím vztahu:

$$I_{R10} = I_{R8} + I_{REF431} - I_{R9} = 249,5 + 2 - 125,25 = 126,25 \text{ }\mu\text{A} \quad (53)$$

- Velikost odporu R10 lze vypočíst dle vztahu:

$$R10 = \frac{U_{01} - U_{REF431}}{I_{R10}} = \frac{3,3 - 2,495}{126,25 \cdot 10^{-6}} = 6,38 \text{ k}\Omega \quad (54)$$

6.1.3 Chlazení aktivních součástek

6.1.3.1 Chladič pro obvod TOPSwitch

Pozn.: V excelovském kalkulátoru se jedná o krok č. 42.

Návrh chladiče pro TOPSwitch			
Celkový ztrátový výkon	P_{ztot}	25,68	W
Ztrátový výkon na primární straně	P_{zpr}	8,22	W
Maximální teplota přechodu (čipu)	ϑ_{Jmax}	150	°C
Maximální teplota okolí	ϑ_{Amax}	45	°C
Vnitřní tepelný odpor obvodu TOPSwitch	$R_{\vartheta JC}$	2	°C/W
Tepelný odpor styku s obvodem chladičem	$R_{\vartheta CS}$	1,6	K/W
Maximální tepelný odpor chladiče	$R_{\vartheta SA}$	9,18	K/W
Zvolený tepelný odpor chladiče	$R_{\vartheta SA}$	9	K/W

Teoretickou hodnotu celkového ztrátového výkonu zdroje lze určit využitím vztahu:

$$P_{ztot} = \frac{P_0}{\eta} - P_0 = \frac{77,05}{0,75} - 77,05 = 25,68 \text{ W} \quad (55)$$

Při zohlednění alokačního faktoru rozdělení ztrát mezi primární a sekundární stranou, ztráty na primární straně jsou:

$$P_{zpr} = P_{ztot} \cdot (1 - Z) = 25,68 \cdot (1 - 0,68) = 8,22 \text{ W} \quad (56)$$

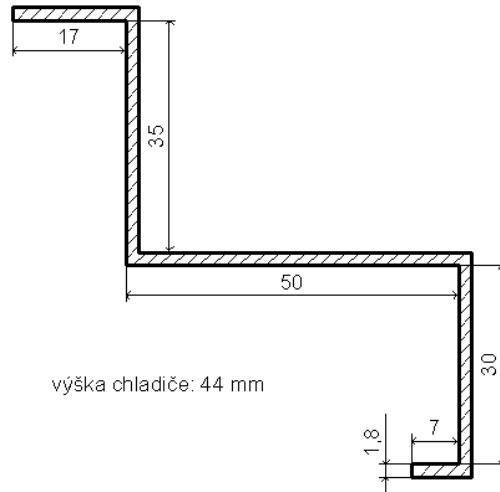
Maximální hodnota tepelného odporu chladiče se stanoví dle:

$$R_{\vartheta SA} = \frac{\vartheta_{Jmax} - \vartheta_{Amax}}{P_{zpr}} - (R_{\vartheta JC} + R_{\vartheta CS}) = \frac{150 - 45}{8,22} - (2 + 1,6) = 9,17 \text{ K/W} \quad (57)$$

Z nabídky společnosti ASSMANN jsem zvolil žebrový chladič V 4330F s udávaným tepelným odporem $R_{\vartheta SA} = 9 \text{ K/W}$. Obvod TOPSwitch jsem upevnil na tento chladič přes izolační podložku.

6.1.3.2 Chladič pro výstupní usměrňovací diody

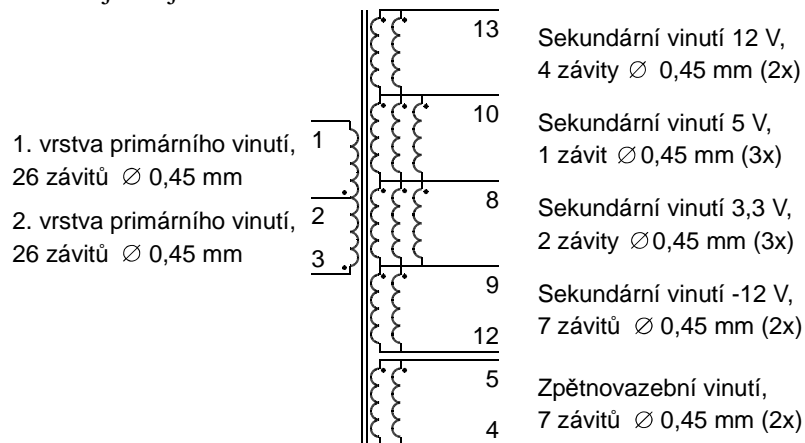
Vzhledem k tomu, že na jednotlivých výstupních diodách může při maximálním proudovém odběru vzniknout ztrátový výkon až 2,8 W, rozhodl jsem se umístit všechny diody na jeden společný chladič vyrobený z hliníkového plechu (viz. Obr. 16). Jednotlivé diody jsem k chladiči upevnil přes izolační podložky.



Obr. 16 Řez profilem chladiče pro výstupní usměrňovací diody

6.2 Konstrukce transformátoru

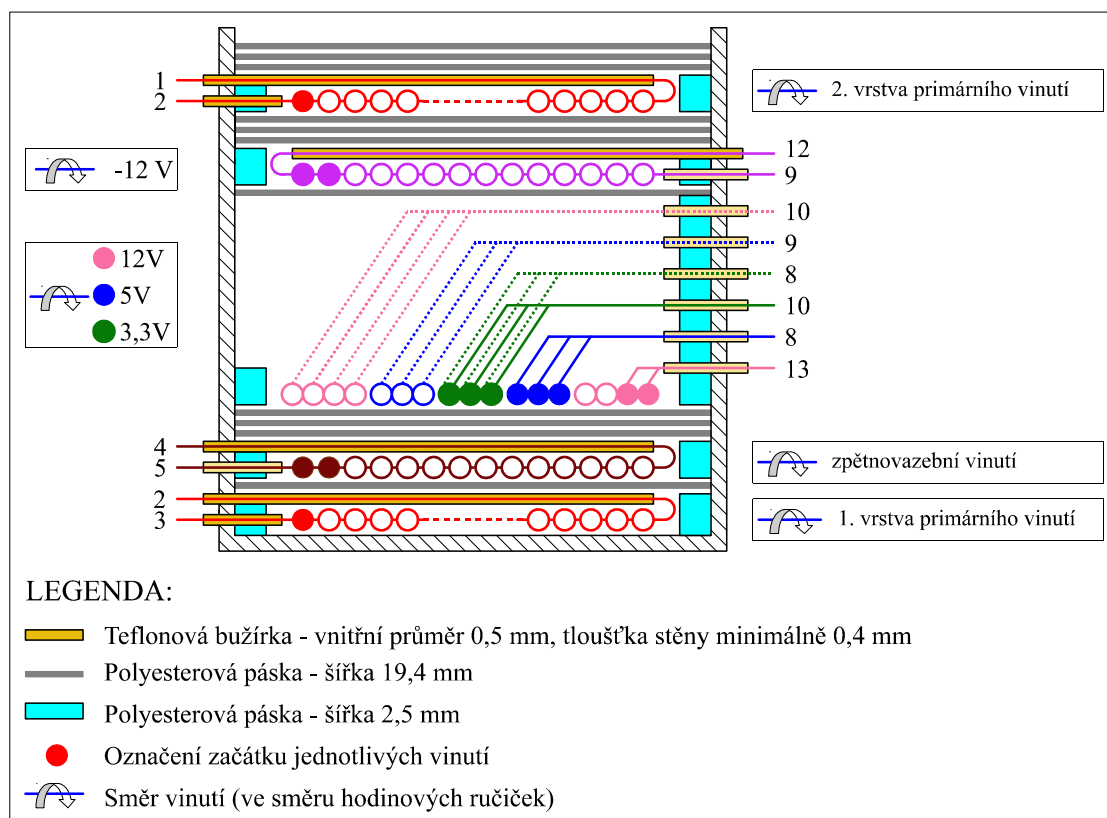
Z katalogu společnosti TME jsem zvolil feritové jádro ETD29-3C90 a kostru WE-365H. Tyto feritová jádra se vyznačují nevelkými rozměry, jednoduchostí montáže a také vysokým poměrem přenášeného výkonu k objemu jádra.



Obr. 17 Schéma zapojení vinutí transformátoru

Schéma zapojení jednotlivých vinutí na Obr. 22 ukazuje, že jsem se rozhodl pro kombinaci společného sekundárního vinutí (3,3 V a 5 V a 12 V) a samostatného sekundárního vinutí (-12 V).

6.2.1 Postup při vinutí transformátoru



Obr. 18 Schéma provedení jednotlivých vinutí transformátoru (řez)

- Navineme po obou stranách cívky okraje pomocí polyesterové izolační pásky o šířce 2,5 mm.
- 1. vrstva primárního vinutí - připojíme vodič o průměru 0,45 mm na vývod cívky č. 3. Navineme 26 závitů po celé šířce zleva doprava a ukončíme vinutí na vývodu cívky č. 2.
- Navineme 1 vrstvu polyesterové izolační pásky o šířce 19,4 mm.
- Navineme po obou stranách cívky okraje pomocí polyesterové izolační pásky o šířce 2,5 mm.
- Zpětnovazební vinutí – připojíme oba vodiče o průměru 0,45 mm na vývod cívky č. 5. Navineme paralelně celkem 7 závitů do jedné vrstvy zleva doprava a ukončíme vinutí na vývodu cívky č. 4. Navineme 3 vrstvy polyesterové izolační pásky o šířce 19,4 mm.
- Navineme po obou stranách cívky okraje pomocí polyesterové izolační pásky o šířce 2,5 mm.
- Sekundárního vinutí pro 3,3 V a 5 V a 12 V – začínáme vinout dvěma sadami po třech vodičích o průměru 0,45 mm a jednou sadou po dvou vodičích o průměru 0,45 mm. Sadu dvou vodičů na svém počátku připojíme na vývod 13 a navineme 2 závit. První sadu tří vodičů na svém počátku připojíme na vývod 8 a navineme 1 závit. Druhou sadu tří vodičů na svém počátku připojíme na vývod 10, navineme 1 závit a ukončíme na vývodu 8. Navineme 1 závit první sady tří vodičů a ukončíme na vývodu 9. Dovineme 2 závit sady dvou vodičů a ukončíme na vývodu 10. Směr vinutí je zprava doleva.
- Navineme 1 vrstvu polyesterové izolační pásky o šířce 19,4 mm.
- Navineme po obou stranách cívky okraje pomocí polyesterové izolační pásky o šířce 2,5 mm.
- Sekundární vinutí pro -12 V – připojíme oba vodiče o průměru 0,45 mm na vývod cívky č. 9. Navineme paralelně celkem 7 závitů do jedné vrstvy zprava doleva a ukončíme vinutí na vývodu cívky č. 9. Navineme 3 vrstvy polyesterové izolační pásky o šířce 19,4 mm.
- Navineme po obou stranách cívky okraje pomocí polyesterové izolační pásky o šířce 2,5 mm.
- 2. vrstva primárního vinutí - připojíme vodič o průměru 0,45 mm na vývod cívky č. 2. Navineme 26 závitů po celé šířce zleva doprava a ukončíme vinutí na vývodu cívky č. 1.
- Navineme 3 vrstvy polyesterové izolační pásky o šířce 19,4 mm.

- Do cívky vložíme obě poloviny jádra a stáhneme s požadovanou mezerou 0,65 mm dohromady. Celý transformátor impregnujeme.

Pozn.: Na veškeré začátky i konce vinutí je nutné natáhnout izolační silikonovou bužírku.

6.3 Schéma zapojení

K nakreslení blokového schéma zapojení spínaného zdroje s obvodem TOPSwitch jsem použil návrhový program Eagle 5.5.0 Light. Vzhledem k tomu, že knihovna tohoto programu neobsahovala všechny mnou navržené součástky, schémata + pouzdra těchto součástek jsem nakreslil. Blokové schéma (pouze součástek osazených na desce plošného spoje) je uvedeno v Příloze A.

6.4 Deska plošného spoje

Při návrhu desky plošného spoje jsem rovněž využil program Eagle. Při návrhu jsem se řídil několika doporučeními výrobce a to zejména:

- Řádné rozdělení signálové a výkonové země a jejich spojení pouze v jednom bodě s vývodem emitor (Source). Jedná se zejména o spojení zemí vstupního kondenzátoru C1, řídicího kondenzátoru C4 (odporu R2) a zpětnovazebního kondenzátoru C3.
- Vstupní kondenzátor C1, obvod TOPSwitch a vstupní svorky transformátoru by měly být velmi blízko sebe.
- Dioda D6, transil D5, kondenzátor C2 a odpor R1 musí být co nejbližší vstupních svorek transformátoru.
- Usměrňovací dioda D7 zpětnovazebního vinutí by měla být tak blízko vinutí transformátoru jak jen to možné.
- Výstupní usměrňovací diody s nabíjecími kondenzátory a sekundárními vinutími transformátoru by měly být spojeny co nejkratší dráhou plošného spoje.

Při dodržení těchto základních pravidel se mi podařilo navrhnout desku plošného spoje, viz. Příloha A.

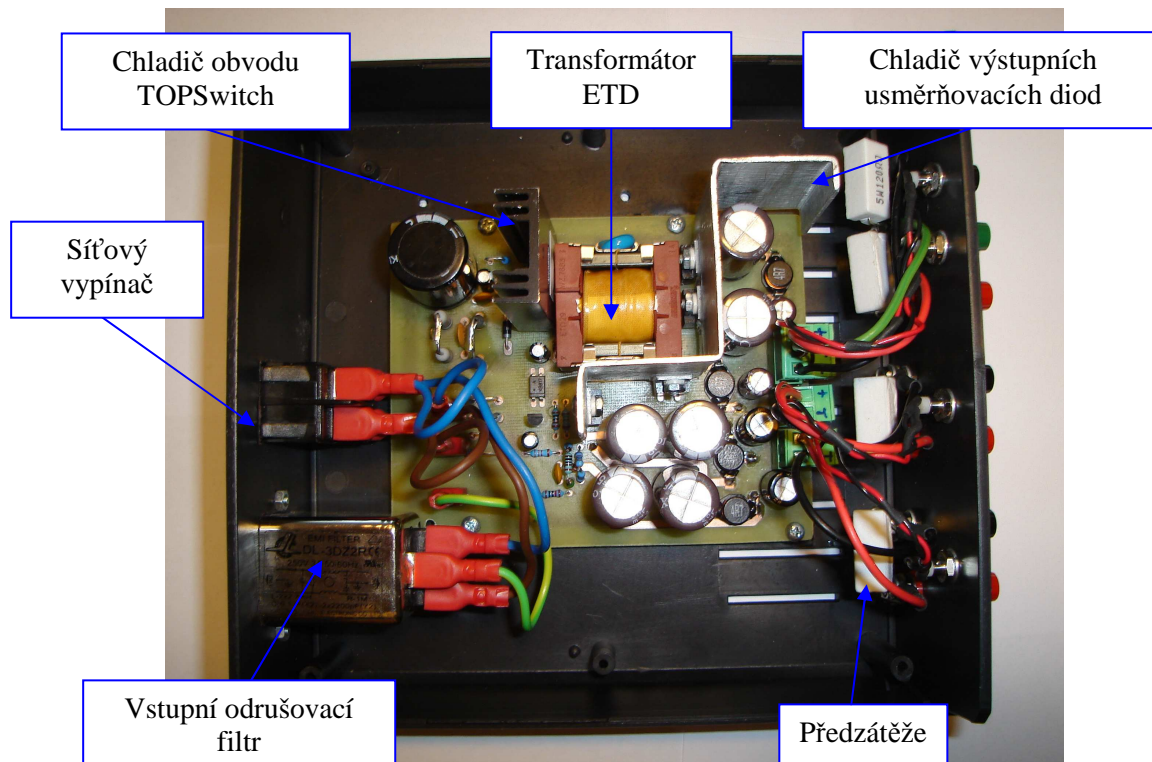
Navržená deska plošných spojů je dvoustranná o rozměrech 100 x 125 mm. K horní vrstvě jsou připájeny pouze tlumivky (SMD provedení). Ostatní součástky jsou připájeny k vrstvě spodní. Při osazování jsem postupoval standardním postupem. Nejprve jsem osadil konektory, poté tlumivky, kondenzátory a odpory a na závěr polovodičové součástky.

7. Konstrukce zdroje

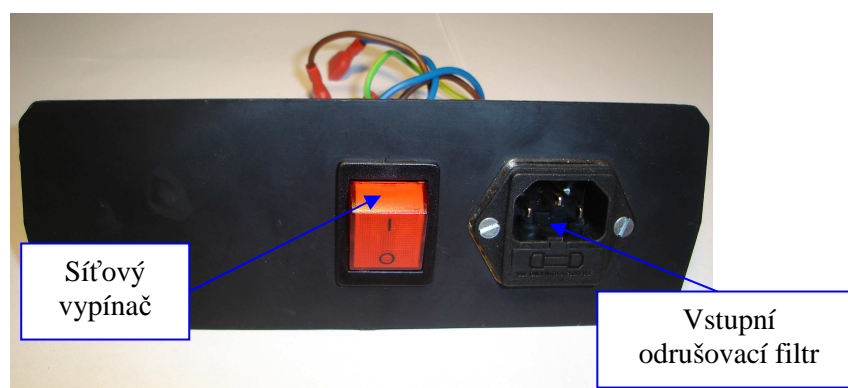
Vyrobenou a osazenou desku plošného zdroje jsem umístil do plastové krabice U-KP12 (GM Electronic). Do zadního panelu krabice jsem umístil vstupní odrušovací filtr a kolébkový přepínač s indikací. Vývod z kolébkového přepínače jsem pomocí konektorů FASTON připojil k desce plošného spoje. Přední panel jsem osadil sedmi vestavnými zdífkami (3 x červená, 3 x černá, 1 x zelená) typu BP 20A (GES Electronics), které jsem propojil s výstupními svorkami (X1, X2, X3) desky plošného spoje. K výstupním svorkám (X1 až X3) jsem rovněž připojil indikační LED diody v kovovém pouzdrě (4 x) a umístil jsem je na čelní panel. LED diody jsou připojeny k výstupním svorkám přes odpory 62 Ω / 0,6 W (pro výstupní napětí 3,3 V), 150 Ω / 0,6 W (pro výstupní napětí 5 V) a 2 x 680 Ω / 0,6 W (pro výstupní napětí ± 12 V).

Pro nastavení “pracovního” stavu zdroje, jsem jednotlivá výstupní napětí zatížil tzv. předzátěží. Tuto jsem realizoval paralelním připojením výkonových odporů k výstupním zdífkám. Pro výstupní napětí 3,3 V jsem použil odpor 33 Ω / 5 W, pro výstupní napětí 5 V odpor 68 Ω / 5 W, pro výstupní napětí +12 V odpor 120 Ω / 5 W a pro výstupní napětí -12 V odpor 120 Ω / 5 W.

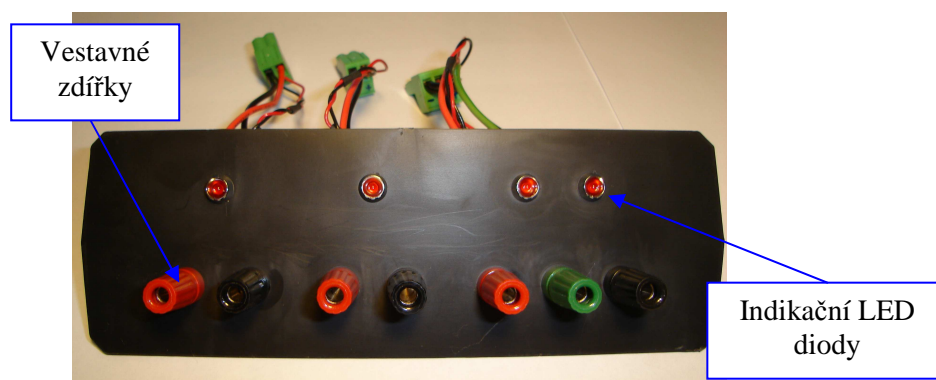
Rozmístění jednotlivých částí zdroje je patrné z následujících obrázků (Obr. 19, Obr. 20, Obr. 21).



Obr. 19 Uspořádání jednotlivých částí zdroje v plastové krabici (pohled shora)



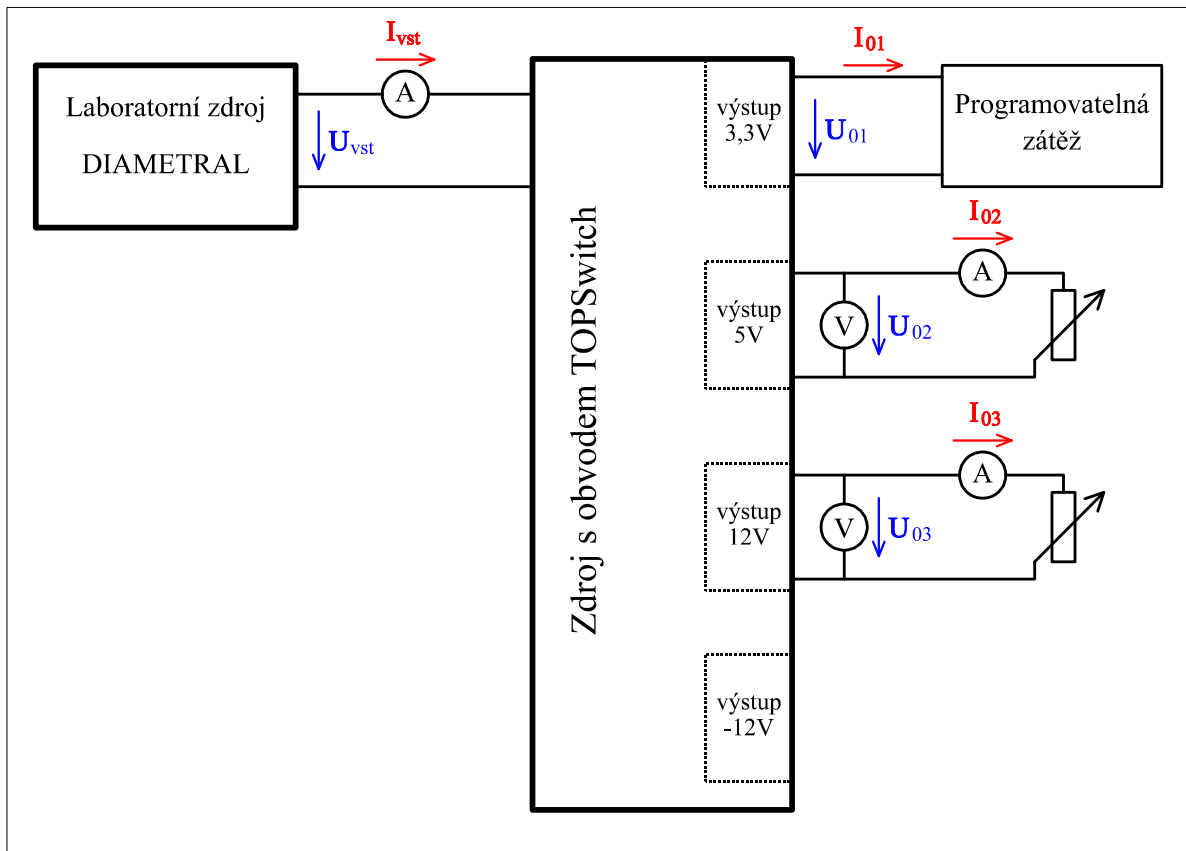
Obr. 20 Uspořádání jednotlivých částí zdroje na zadním panelu



Obr. 21 Uspořádání jednotlivých částí zdroje na předním panelu

8. Měření charakteristik zdroje

Po oživení spínaného zdroje jsem provedl měření statické zatěžovací charakteristiky. Měření jsem prováděl dle následujícího měřicího zapojení.



Obr. 22 Měřicí zapojení zdroje

8.1 Postup měření

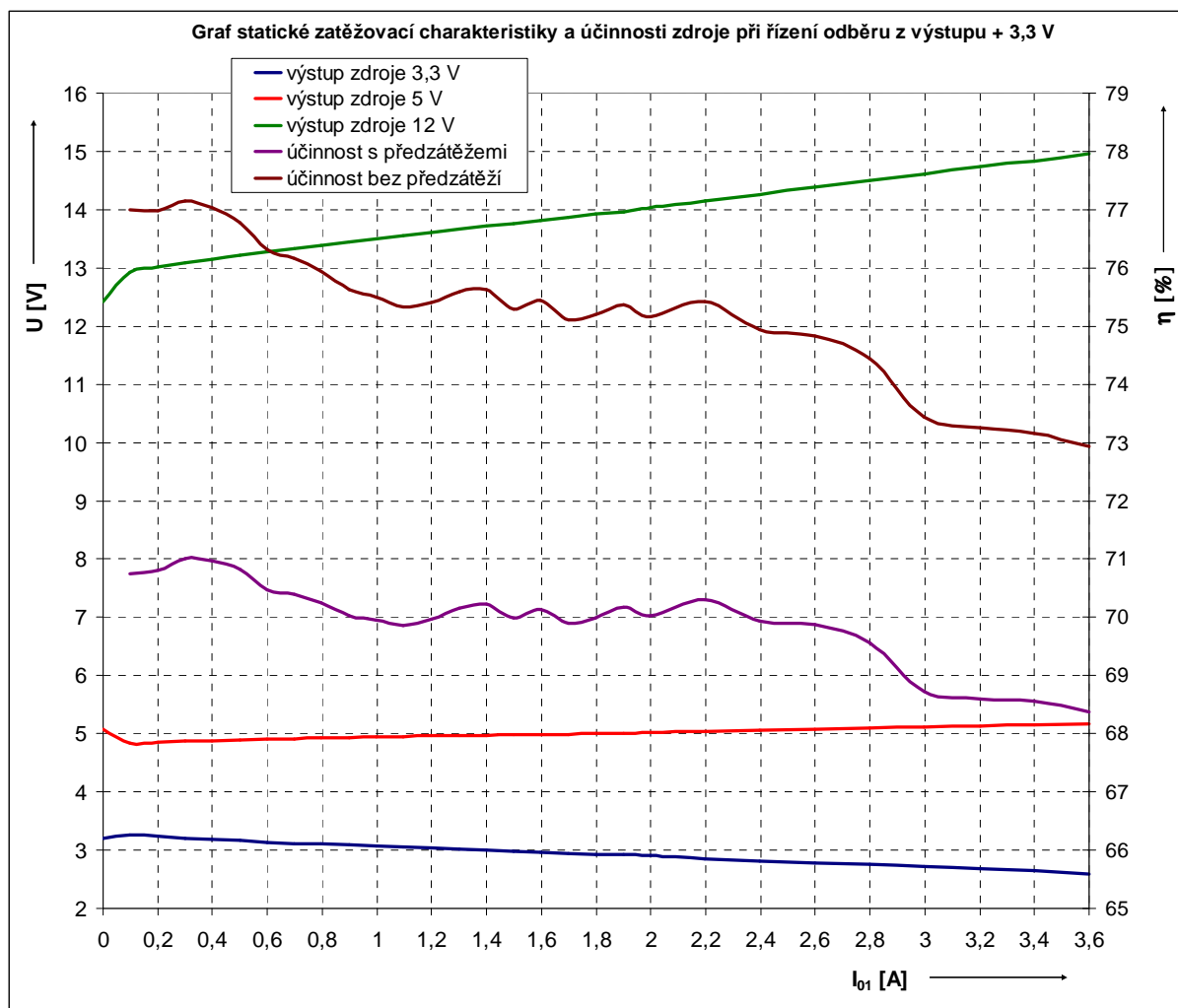
- Výstupy 5 V a 12 V jsem pomocí výkonových posuvných reostatů zatížil proudem odpovídající cca 60 % maximálnímu proudu pro daný výstup.
- Pomocí programovatelné zátěže jsem postupně (krokově) zatěžoval výstup 3,3 V.
- Z jednotlivých měřicích přístrojů (zařízení) jsem v každém kroku odečítal příslušné hodnoty proudů a napětí.
- Totéž jsem opakoval pro výstupy 5 V a 12 V.
- Naměřené hodnoty jsem zanesl do tabulky a sestrojil grafy.

8.2 Výsledky měření

8.2.1 Statická zatěžovací charakteristiky výstupu 3,3 V

U_{vst} [V]	227	226	226	225	225	226	226	226	226	226
I_{vst} [mA]	31	188	192	196	200	203	208	211	215	219
P_{vst} [W]	7,04	42,49	43,39	44,10	45,00	45,88	47,01	47,69	48,59	49,49
I_{01} [A]	0	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,698	0,798	0,898
U_{01} [V]	3,21	3,26	3,24	3,20	3,18	3,16	3,14	3,12	3,12	3,10
P_{ztrU01} [W]	0,3122	0,3220	0,3181	0,3103	0,3064	0,3026	0,2988	0,2950	0,2950	0,2912
I_{02} [A]	0	2,06	2,07	2,07	2,08	2,08	2,09	2,10	2,10	2,10
U_{02} [V]	5,08	4,83	4,85	4,87	4,88	4,89	4,91	4,92	4,93	4,93
P_{ztrU02} [W]	0,3795	0,3431	0,3459	0,3488	0,3502	0,3516	0,3545	0,3560	0,3574	0,3574
I_{03} [A]	0	1,53	1,54	1,55	1,56	1,57	1,58	1,58	1,59	1,60
U_{03} [V]	12,43	12,93	13,01	13,08	13,15	13,21	13,28	13,33	13,39	13,45
P_{ztrU03} [W]	1,2875	1,393	1,411	1,426	1,441	1,454	1,470	1,481	1,494	1,508
P_{123} [W]	-	30,06	30,72	31,31	31,94	32,49	33,13	33,57	34,13	34,66
η_s predz. [%]	-	70,75	70,80	71,01	70,97	70,82	70,47	70,40	70,25	70,02
$\eta_{bez\ predz.}$ [%]	-	77,00	76,99	77,15	77,03	76,78	76,31	76,17	75,94	75,62
U_{vst} [V]	226	226	225	225	225	225	225	226	225	225
I_{vst} [mA]	222	226	230	232	235	239	241	244	248	250
P_{vst} [W]	50,17	51,08	51,75	52,20	52,88	53,78	54,23	55,14	55,80	56,25
I_{01} [A]	0,998	1,098	1,200	1,300	1,400	1,498	1,598	1,698	1,798	1,900
U_{01} [V]	3,08	3,06	3,04	3,02	3,00	2,98	2,96	2,94	2,92	2,92
P_{ztrU01} [W]	0,2875	0,2837	0,2800	0,2764	0,2727	0,2691	0,2655	0,2619	0,2584	0,2584
I_{02} [A]	2,11	2,12	2,12	2,13	2,13	2,13	2,14	2,14	2,14	2,15
U_{02} [V]	4,94	4,95	4,96	4,96	4,97	4,98	4,98	4,99	5,00	5,00
P_{ztrU02} [W]	0,3589	0,3603	0,3618	0,3618	0,3632	0,3647	0,3647	0,3662	0,3676	0,3676
I_{03} [A]	1,60	1,61	1,62	1,62	1,63	1,64	1,64	1,65	1,66	1,66
U_{03} [V]	13,50	13,56	13,61	13,66	13,71	13,76	13,81	13,86	13,92	13,96
P_{ztrU03} [W]	1,519	1,532	1,544	1,555	1,566	1,578	1,589	1,601	1,615	1,624
P_{123} [W]	35,10	35,69	36,21	36,62	37,13	37,64	38,04	38,54	39,06	39,47
η_s predz. [%]	69,95	69,87	69,97	70,15	70,23	69,99	70,14	69,89	70,00	70,17
$\eta_{bez\ predz.}$ [%]	75,50	75,34	75,41	75,58	75,62	75,30	75,44	75,11	75,19	75,36
U_{vst} [V]	225	224	224	224	224	224	224	223	224	
I_{vst} [mA]	254	260	268	274	281	290	297	304	310	
P_{vst} [W]	57,15	58,24	60,03	61,38	62,94	64,96	66,53	67,79	69,44	
I_{01} [A]	2,000	2,198	2,398	2,600	2,800	2,998	3,200	3,400	3,600	
U_{01} [V]	2,90	2,86	2,82	2,78	2,76	2,72	2,68	2,64	2,60	
P_{ztrU01} [W]	0,2548	0,2479	0,2410	0,2342	0,2308	0,2242	0,2176	0,2112	0,2048	
I_{02} [A]	2,15	2,16	2,17	2,18	2,18	2,19	2,20	2,21	2,22	
U_{02} [V]	5,02	5,04	5,06	5,08	5,10	5,12	5,13	5,15	5,17	
P_{ztrU02} [W]	0,3706	0,3736	0,3765	0,3795	0,3825	0,3855	0,3870	0,3900	0,3931	
I_{03} [A]	1,67	1,68	1,70	1,71	1,72	1,73	1,75	1,76	1,78	
U_{03} [V]	14,03	14,15	14,26	14,38	14,50	14,61	14,73	14,84	14,97	
P_{ztrU03} [W]	1,640	1,669	1,695	1,723	1,752	1,779	1,808	1,835	1,868	
P_{123} [W]	40,02	40,94	41,98	42,89	43,79	44,64	45,64	46,48	47,48	
η_s predz. [%]	70,03	70,30	69,94	69,88	69,56	68,72	68,60	68,56	68,38	
$\eta_{bez\ predz.}$ [%]	75,17	75,43	74,94	74,83	74,43	73,43	73,25	73,17	72,93	

Tab. 3 Naměřené hodnoty statické zatěžovací charakteristiky výstupu 3,3 V

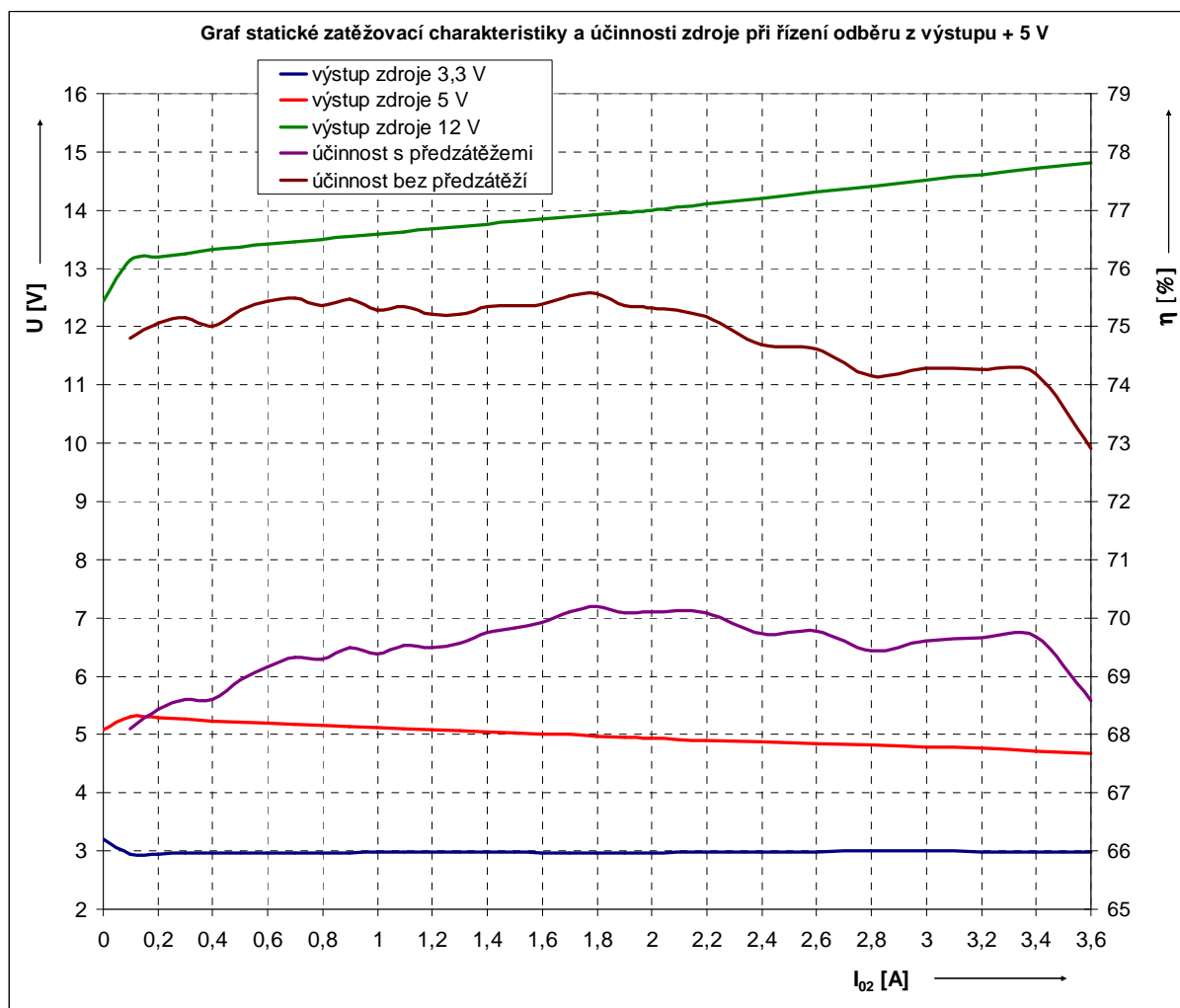


Obr. 23 Graf statické zatěžovací charakteristika a účinnosti výstupu 3,3 V

8.2.2 Statická zatěžovací charakteristiky výstupu 5 V

U_{vst} [V]	227	225	225	225	226	226	226	225	225	225
I_{vst} [mA]	31	176	180	184	188	191	195	200	204	208
P_{vst} [W]	7,04	39,60	40,50	41,40	42,49	43,17	44,07	45,00	45,90	46,80
I_{01} [A]	0	2,02	2,02	2,03	2,03	2,04	2,04	2,04	2,05	2,05
U_{01} [V]	3,21	2,94	2,94	2,96	2,96	2,96	2,96	2,97	2,97	2,97
P_{ztrU01} [W]	0,3122	0,2619	0,2619	0,2655	0,2655	0,2655	0,2655	0,2673	0,2673	0,2673
I_{02} [A]	0	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,698	0,798	0,898
U_{02} [V]	5,08	5,30	5,28	5,26	5,24	5,22	5,20	5,18	5,16	5,14
P_{ztrU02} [W]	0,3795	0,4131	0,4100	0,4069	0,4038	0,4007	0,3976	0,3946	0,3916	0,3885
I_{03} [A]	0	1,56	1,57	1,57	1,58	1,58	1,59	1,60	1,60	1,61
U_{03} [V]	12,43	13,14	13,20	13,26	13,32	13,36	13,41	13,45	13,50	13,55
P_{ztrU03} [W]	1,2875	1,439	1,452	1,465	1,479	1,487	1,499	1,508	1,519	1,530
P_{123} [W]	-	26,97	27,72	28,41	29,15	29,76	30,48	31,19	31,81	32,52
η_s predz. [%]	-	68,10	68,44	68,61	68,61	68,94	69,16	69,32	69,29	69,49
η_{bez} predz. [%]	-	74,81	75,07	75,15	75,01	75,29	75,43	75,49	75,36	75,48
U_{vst} [V]	225	225	225	225	225	225	225	225	224	224
I_{vst} [mA]	212	216	220	224	227	231	235	238	243	247
P_{vst} [W]	47,70	48,60	49,50	50,40	51,08	51,98	52,88	53,55	54,43	55,33
I_{01} [A]	2,05	2,05	2,06	2,06	2,06	2,06	2,07	2,07	2,07	2,08
U_{01} [V]	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,97	2,97	2,97	2,97
P_{ztrU01} [W]	0,2691	0,2691	0,2691	0,2691	0,2691	0,2691	0,2673	0,2673	0,2673	0,2673
I_{02} [A]	0,998	1,098	1,200	1,300	1,400	1,498	1,598	1,698	1,798	1,900
U_{02} [V]	5,12	5,10	5,08	5,06	5,04	5,02	5,00	5,00	4,98	4,96
P_{ztrU02} [W]	0,3855	0,3825	0,3795	0,3765	0,3736	0,3706	0,3676	0,3676	0,3647	0,3618
I_{03} [A]	1,61	1,62	1,62	1,63	1,63	1,64	1,65	1,65	1,66	1,66
U_{03} [V]	13,59	13,63	13,68	13,71	13,76	13,80	13,84	13,88	13,92	13,96
P_{ztrU03} [W]	1,539	1,548	1,560	1,566	1,578	1,587	1,596	1,605	1,615	1,624
P_{123} [W]	33,10	33,79	34,40	35,06	35,62	36,29	36,97	37,54	38,21	38,78
η_s predz. [%]	69,39	69,53	69,49	69,57	69,75	69,82	69,93	70,10	70,20	70,08
η_{bez} predz. [%]	75,28	75,34	75,21	75,21	75,35	75,35	75,38	75,53	75,56	75,36
U_{vst} [V]	225	224	225	224	225	224	224	224	224	224
I_{vst} [mA]	250	259	267	276	284	292	300	308	320	320
P_{vst} [W]	56,25	58,02	60,08	61,82	63,90	65,41	67,20	68,99	71,68	71,68
I_{01} [A]	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,11	2,10	2,09	2,09
U_{01} [V]	2,97	2,98	2,98	2,99	3,00	3,00	2,99	2,99	2,99	2,99
P_{ztrU01} [W]	0,2673	0,2691	0,2691	0,2709	0,2727	0,2727	0,2709	0,2709	0,2709	0,2709
I_{02} [A]	2,000	2,198	2,398	2,600	2,798	2,998	3,200	3,400	3,600	3,600
U_{02} [V]	4,94	4,90	4,88	4,84	4,82	4,78	4,76	4,72	4,68	4,68
P_{ztrU02} [W]	0,3589	0,3531	0,3502	0,3445	0,3417	0,3360	0,3332	0,3276	0,3221	0,3221
I_{03} [A]	1,67	1,68	1,69	1,70	1,71	1,72	1,73	1,75	1,76	1,76
U_{03} [V]	14,00	14,10	14,20	14,31	14,41	14,51	14,61	14,71	14,81	14,81
P_{ztrU03} [W]	1,633	1,657	1,680	1,706	1,730	1,755	1,779	1,803	1,828	1,828
P_{123} [W]	39,44	40,66	41,90	43,13	44,37	45,53	46,82	48,07	49,16	49,16
η_s predz. [%]	70,11	70,08	69,74	69,76	69,43	69,61	69,67	69,67	68,59	68,59
η_{bez} predz. [%]	75,32	75,18	74,69	74,63	74,16	74,28	74,27	74,20	72,91	72,91

Tab. 4 Naměřené hodnoty statické zatěžovací charakteristiky výstupu 5 V

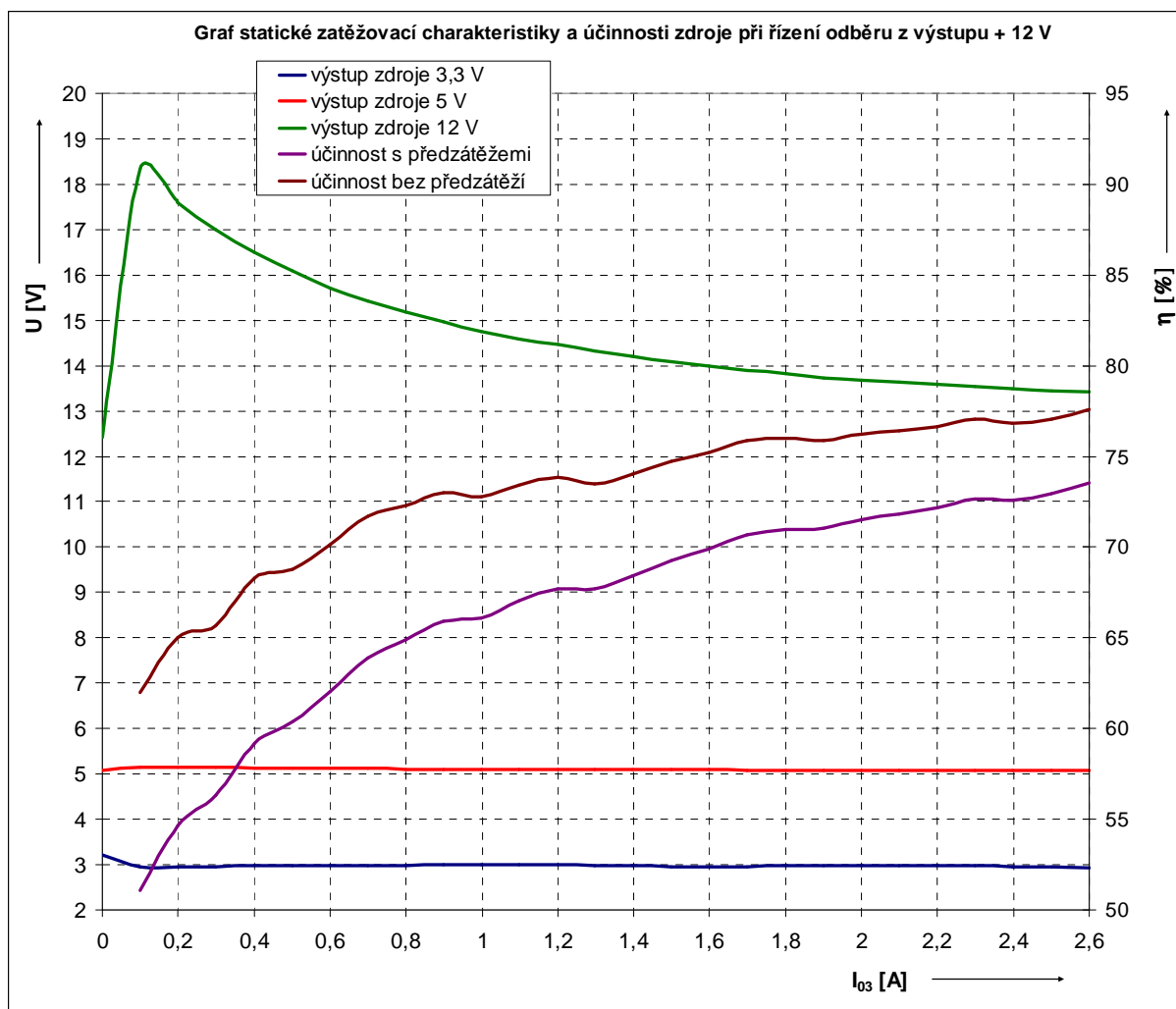


Obr. 24 Graf statické zatěžovací charakteristika a účinnosti výstupu 5 V

8.2.3 Statická zatěžovací charakteristiky výstupu 12 V

U_{vst} [V]	227	226	225	226	226	225	226	225	225	225
I_{vst} [mA]	31	158	162	169	172	180	184	189	195	201
P_{vst} [W]	7,04	35,71	36,45	38,19	38,87	40,50	41,58	42,53	43,88	45,23
I_{01} [A]	0	2,03	2,04	2,05	2,05	2,05	2,06	2,06	2,06	2,06
U_{01} [V]	3,21	2,96	2,96	2,96	2,97	2,97	2,98	2,98	2,98	2,99
P_{ztrU01} [W]	0,3122	0,2655	0,2655	0,2655	0,2673	0,2673	0,2691	0,2691	0,2691	0,2709
I_{02} [A]	0	2,02	2,01	2,01	2,01	2,01	2,00	2,00	2,00	2,00
U_{02} [V]	5,08	5,15	5,15	5,14	5,13	5,13	5,12	5,12	5,11	5,11
P_{ztrU02} [W]	0,3795	0,3900	0,3900	0,3885	0,3870	0,3870	0,3855	0,3855	0,3840	0,3840
I_{03} [A]	0	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,798	0,898
U_{03} [V]	12,43	18,34	17,60	17,00	16,50	16,08	15,72	15,42	15,18	14,96
P_{ztrU03} [W]	1,2875	2,8030	2,5813	2,4083	2,2688	2,1547	2,0593	1,9815	1,9203	1,8650
P_{123} [W]	-	18,25	19,91	21,50	23,00	24,44	25,81	27,17	28,47	29,81
$\eta_{s\ predz.}$ [%]	-	51,10	54,62	56,29	59,17	60,35	62,07	63,90	64,89	65,92
$\eta_{bez\ predz.}$ [%]	-	61,96	65,00	65,70	68,29	68,77	70,12	71,68	72,30	73,00
U_{vst} [V]	225	225	225	225	226	225	225	224	224	225
I_{vst} [mA]	209	215	221	229	234	240	246	252	259	265
P_{vst} [W]	47,03	48,38	49,73	51,53	52,88	54,00	55,35	56,45	58,02	59,63
I_{01} [A]	2,06	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07
U_{01} [V]	2,99	2,99	2,99	2,98	2,97	2,96	2,96	2,96	2,97	2,97
P_{ztrU01} [W]	0,2709	0,2709	0,2709	0,2691	0,2673	0,2655	0,2655	0,2655	0,2673	0,2673
I_{02} [A]	2,00	2,00	1,99	1,99	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,99
U_{02} [V]	5,10	5,10	5,09	5,09	5,09	5,09	5,09	5,08	5,08	5,08
P_{ztrU02} [W]	0,3825	0,3825	0,3810	0,3810	0,3810	0,3810	0,3810	0,3795	0,3795	0,3795
I_{03} [A]	0,998	1,098	1,200	1,298	1,398	1,498	1,598	1,698	1,800	1,900
U_{03} [V]	14,76	14,60	14,46	14,32	14,20	14,08	14,00	13,90	13,82	13,74
P_{ztrU03} [W]	1,8155	1,7763	1,7424	1,7089	1,6803	1,6521	1,6333	1,6101	1,5916	1,5732
P_{123} [W]	31,09	32,42	33,67	34,89	36,18	37,40	38,68	39,89	41,18	42,36
$\eta_{s\ predz.}$ [%]	66,11	67,02	67,71	67,71	68,41	69,26	69,88	70,67	70,99	71,05
$\eta_{bez\ predz.}$ [%]	72,74	73,40	73,86	73,51	74,02	74,72	75,20	75,86	76,00	75,88
U_{vst} [V]	225	225	225	225	224	224	224	224	227	
I_{vst} [mA]	271	278	284	291	299	305	306	306	306	
P_{vst} [W]	60,98	62,55	63,90	65,18	66,98	68,32	69,46	69,46	69,46	
I_{01} [A]	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	
U_{01} [V]	2,98	2,98	2,98	2,97	2,96	2,96	2,94	2,94	2,94	
P_{ztrU01} [W]	0,2691	0,2691	0,2691	0,2673	0,2655	0,2655	0,2619	0,2619	0,2619	
I_{02} [A]	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	
U_{02} [V]	5,07	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	
P_{ztrU02} [W]	0,3780	0,3795	0,3795	0,3795	0,3795	0,3795	0,3795	0,3795	0,3795	
I_{03} [A]	2,000	2,100	2,198	2,298	2,398	2,500	2,600	2,600	2,600	
U_{03} [V]	13,68	13,64	13,58	13,54	13,50	13,44	13,42	13,42	13,42	
P_{ztrU03} [W]	1,5595	1,5504	1,5368	1,5278	1,5188	1,5053	1,5008	1,5008	1,5008	
P_{123} [W]	43,62	44,92	46,13	47,37	48,61	49,84	51,09	51,09	51,09	
$\eta_{s\ predz.}$ [%]	71,53	71,82	72,19	72,67	72,58	72,95	73,55	73,55	73,55	
$\eta_{bez\ predz.}$ [%]	76,24	76,40	76,65	77,05	76,80	77,07	77,62	77,62	77,62	

Tab. 5 Naměřené hodnoty statické zatěžovací charakteristiky výstupu 12 V



Obr. 25 Graf statické zatěžovací charakteristika a účinnosti výstupu 12 V

8.2.4 Příklad výpočtů

Pozn.: Níže uvedené výpočty jsou pro naměřené hodnoty označené v tabulce Tab. 6

Příkon zdroje:

$$P_{vst} = U_{vst} \cdot I_{vst} = 225 \cdot 221 \cdot 10^{-3} = 49,73 \text{ W} \quad (58)$$

Ztrátový výkon na předzátěži výstupu U_{01} (3,3V):

$$P_{ztrU01} = \frac{U_{01}^2}{R} = \frac{2,99^2}{33} = 0,2709 \text{ W} \quad (59)$$

Ztrátový výkon na předzátěži výstupu U_{02} (5V):

$$P_{ztrU02} = \frac{U_{02}^2}{R} = \frac{5,09^2}{68} = 0,381 \text{ W} \quad (60)$$

Ztrátový výkon na předzátěži výstupu U_{03} (12V):

$$P_{ztrU02} = \frac{U_{03}^2}{R} = \frac{14,46^2}{120} = 1,7424 \text{ W} \quad (61)$$

Celkový výkon zdroje:

$$P_{123} = U_{01} \cdot I_{01} + U_{02} \cdot I_{02} + U_{03} \cdot I_{03} = 2,99 \cdot 2,07 + 5,09 \cdot 1,99 + 14,46 \cdot 1,2 = 33,67 \text{ W} \quad (62)$$

Účinnost zdroje včetně předzátěže:

$$\eta_{s \text{ predz.}} = \frac{P_{123}}{P_{vst}} \cdot 100 = \frac{33,67}{49,73} \cdot 100 = 67,71 \% \quad (63)$$

Účinnost zdroje bez předzátěže:

$$\begin{aligned} \eta_{s \text{ predz.}} &= \frac{P_{123}}{P_{vst} - (P_{ztrU01} + P_{ztrU02} + 2 \cdot P_{ztrU03})} \cdot 100 = \\ &= \frac{33,67}{49,73 - (0,2709 + 0,381 + 2 \cdot 1,724)} \cdot 100 = 73,86 \% \end{aligned} \quad (64)$$

Pozn.: Ztrátový výkon P_{ztrU03} je započítán dvakrát, protože na výstupu U_{04} (- 12V) je rovněž použita předzátěž (odpor 120Ω).

8.2.5 Použité měřicí přístroje a pomůcky

Digitální multimetr UT30D (4 x)

Digitální multimetr UT70A

Analogový multimetr MI 7045

Laboratorní napájecí zdroj střídavý DIAMETRAL AC250K1D

Regulovatelná elektronická umělá zátěž GW INSTEK PEL300

Posuvný výkonový reostat 18 Ω / 4,5A

Posuvný výkonový reostat 31 Ω / 3,5A

Propojovací šňůry

9. Závěr

Navrhl jsem a zkonstruoval spínaný zdroj s obvodem TOPSwitch s využitím teoretických znalostí získaných z níže uvedených odborných publikací a konzultacemi s vedoucím projektu Ing. Jiřím Šebestou, PhD. Při volbě jednotlivých součástek zdroje jsem využil vlastní excelovský kalkulátor, který automatizovaně provádí výpočty nutné pro optimální volbu obvodu TOPSwitch, transformátoru, usměrňovacích diod a chladiče obvodu TOPSwitch. Tento kalkulátor je úzce svázán s dvěma dalšími tabulkami. První z nich obsahuje základní parametry obvodů TOPSwitch řady GX a HX. Do druhé jsem umístil základní parametry feritových jader transformátorů typů E, EE a ETD.

Provedl jsem měření statické zatěžovací charakteristiky zdroje a z naměřených hodnot jsem vypočetl účinnost zdroje. Z výsledných grafů je patrné, že maximální účinnost zdroje je cca 78 % což odpovídám úvodním předpokladům. Z charakteristik je dále patrné, že tento zdroj je konstruován pro trvalý odběr z jednotlivých výstupů, není tedy konstruován pro nerovnoměrné zatížení jednotlivých výstupů. Toto je zejména patrné pro výstupy ± 12 V, které nejsou regulovány zpětnou vazbou, a při zatěžování výstupů 3,3 V a 5 V a nezatěžování výstupů ± 12 V, napětí na těchto nezatěžovaných výstupech neúměrně roste. Pokud jsou ale jednotlivé výstupy zdroje zatěžovány rovnoměrně (dle zadání vstupních parametrů jednotlivých výstupů) jsou výstupní napětí na výstupech 5 V a ± 12 V v zadané toleranci $\pm 5\%$, resp. $\pm 10\%$.

Požadované výstupní napětí 3,3 V se mi ale bohužel nepodařilo dodržet. Požadovaná tolerance $\pm 5\%$ byla překročena a to dvojnásobně. Příčin může být několik, a to:

- Nejpravděpodobněji je chyba v konstrukci transformátoru a to zejména nedodržení požadované vzduchové mezery, což může mít za následek snížení/zvýšení rozptylové indukčnosti transformátoru. Odstranění této možné závady je pouze v přesném nastavení požadované vzduchové mezery, nebo použití profesionálně zhotovený transformátor.
- Druhou možnou příčinou je špatná volba výstupní usměrňovací diody, kde napětí na diodě v propustném směru může být vyšší než uvádí výrobce. Řešením je použít jinou diodu.
- Jednou z dalších možných chyb je navržený obvod zpětné vazby. Vliv zpětné vazby z výstupu 5 V je pravděpodobně příliš velký. Možným řešením je zvýšit vliv zpětné vazby z výstupu 3,3 V a naopak snížit vliv zpětné vazby z výstupu 5 V, viz. Kapitola 6.1.2

Použitá literatura

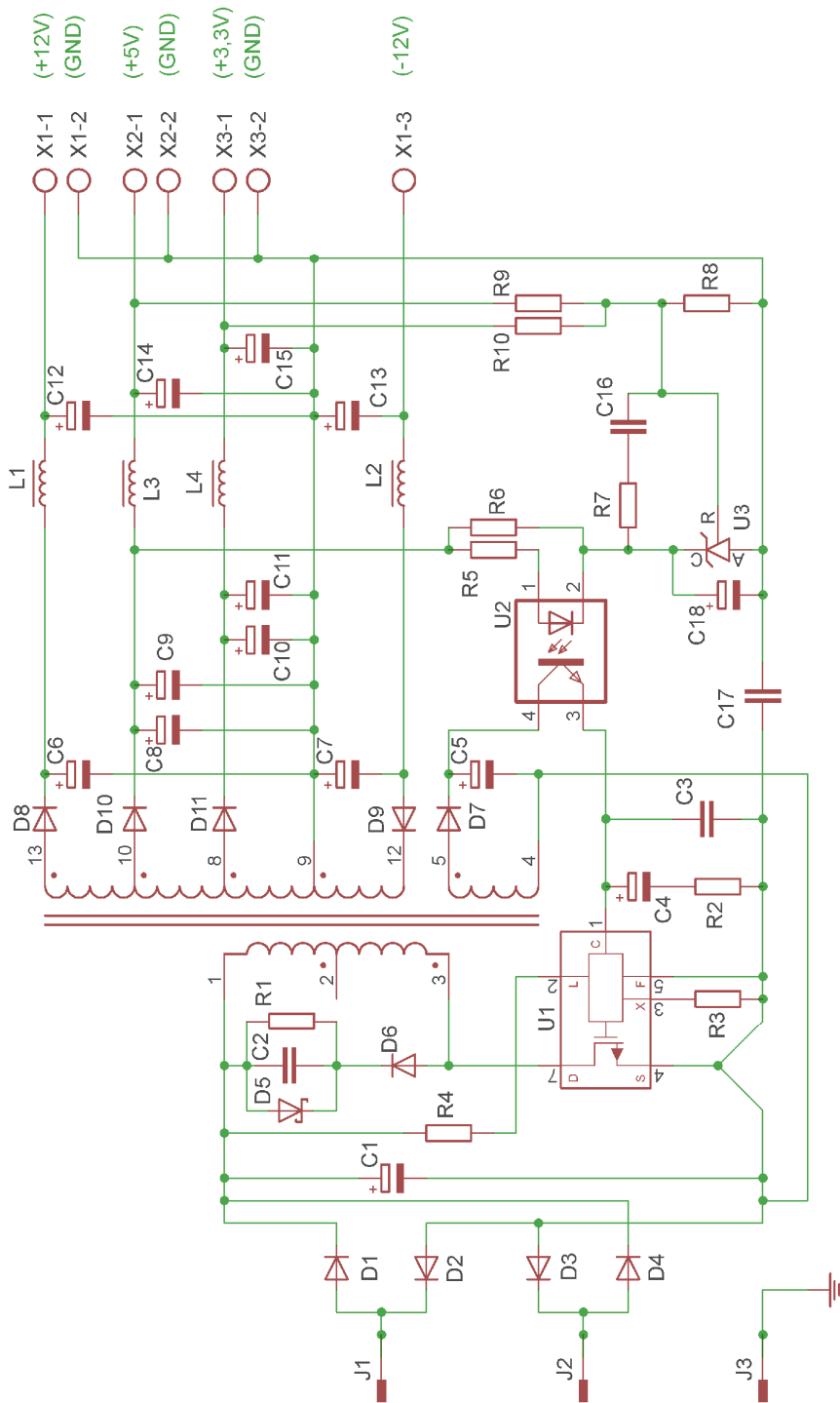
1. Alexandr Krejčířík : Spínané napájecí zdroje s obvody TOPSwitch
Nakladatelství BEN, Praha 2002
2. Alexandr Krejčířík : Napájecí zdroje I
Nakladatelství BEN, Praha 1997
3. Alexandr Krejčířík : DC/DC měniče
Nakladatelství BEN, Praha 2001
4. Tomáš Fukátko, Jaroslav Fukátko : Teplo a chlazení v elektronice
Nakladatelství BEN, Praha 2006
5. <http://www.powerint.com/>
internetové stránky firmy Power Integrations, Inc.,
6. <http://hw.cz/>
internetové stránky zabývající se elektronikou a programováním
7. <http://www.gme.cz/cz/index.php>
internetové stránky (katalogové listy) prodejce elektronických částí a součástek
8. <http://www.ges.cz>
internetové stránky (katalogové listy) prodejce elektronických částí a součástek
9. <http://www.tme.eu/cz/>
internetové stránky (katalogové listy) prodejce elektronických částí a součástek

Seznam příloh

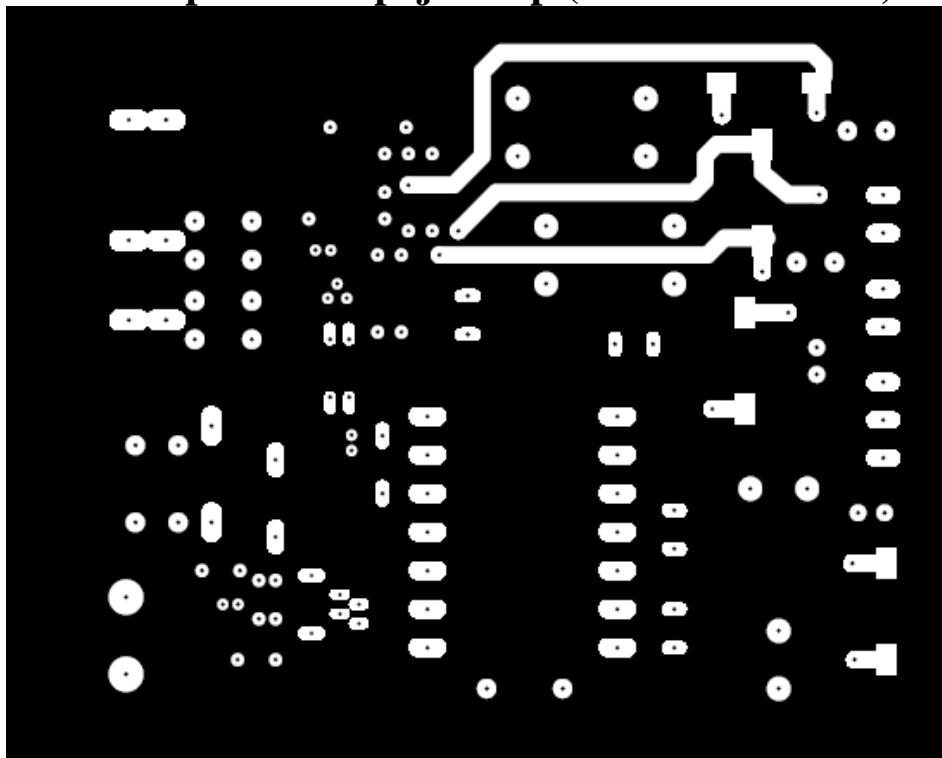
A	Návrh spínaného zdroje s obvodem TOPSwitch	
A.1	Obvodové zapojení.....	42
A.2	Deska plošného spoje – top (strana součástek).....	44
A.3	Deska plošného spoje – bottom (strana spojů).....	44
A.4	Deska plošného spoje – rozmístění součástek.....	45
B	Seznam všech použitých součástek.....	46
C	Excelovský kalkulátor (tabulka) – výsledky.....	48

A Návrh spínaného zdroje s obvodem TOPSwitch

A.1 Obvodové zapojení

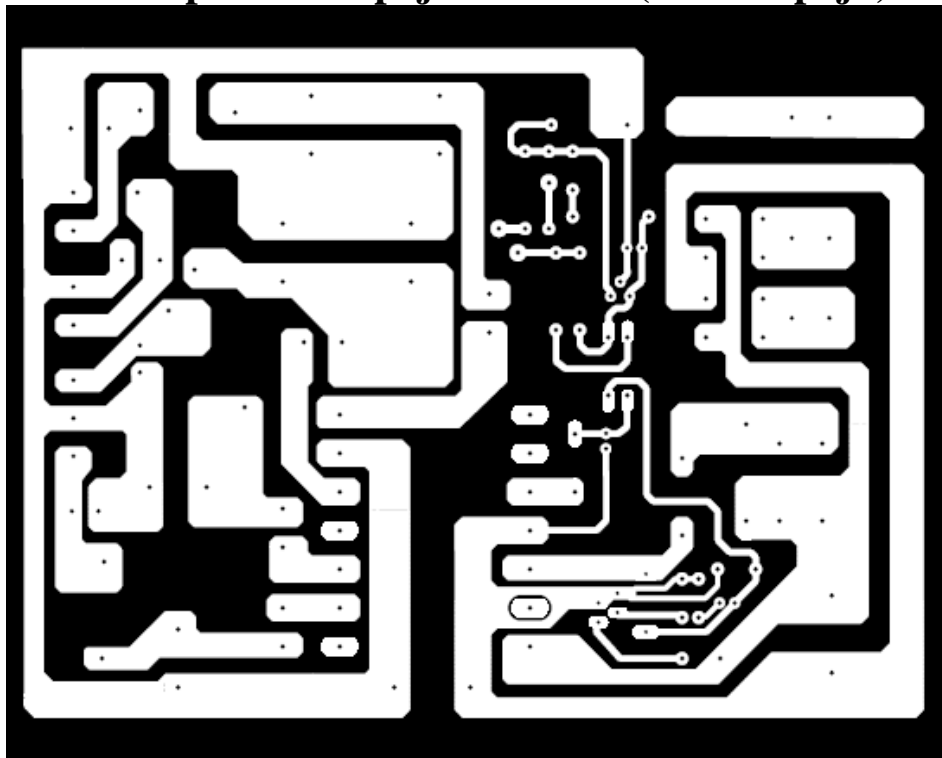


A.2 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



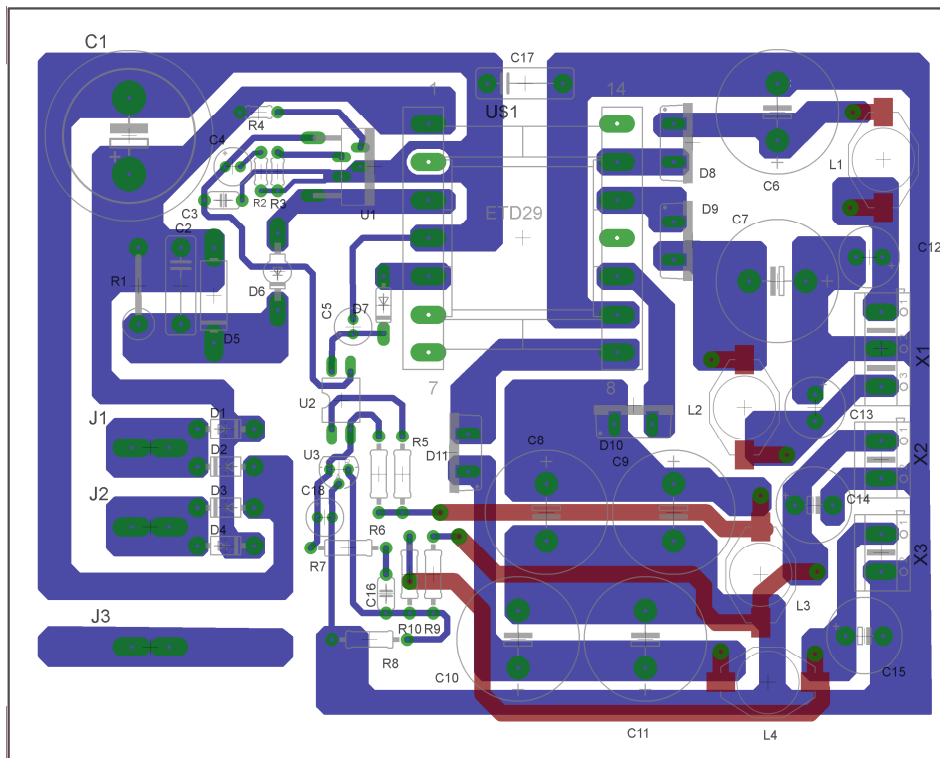
Rozměr desky 125 x 100 [mm], měřítko M1:1

A.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 125 x 100 [mm], měřítko M1:1

A.4 Deska plošného spoje – rozmístění součástek



Rozměr desky 125 x 100 [mm], měřítko M1:1

B Seznam všech použitých součástek

Pol.	ks	Označení	Popis
1	4	<i>D1, D2, D3, D4</i>	Usměrňovací dioda 1N4007 (1000 V / 1 A)
2	1	<i>D5</i>	Transil P6KE200A (200 V / 5 W)
3	1	<i>D6</i>	Ultra rychlá dioda 1N4937 (600 V / 1 A)
4	1	<i>D7</i>	Ultra rychlá dioda 1N4148 (75 V / 200 mA)
5	2	<i>D8, D9</i>	Ultra rychlá dioda BYW29-150 (150 V / 8 A)
6	1	<i>D10</i>	Schottkyho dioda MBR1060CT (60 V / 10 A)
7	1	<i>D11</i>	Schottkyho dioda MBR1045CT (45 V / 10 A)
8	1	<i>C1</i>	Elektrolytický kondenzátor 100 μ F / 400 V
9	1	<i>C2</i>	Keramický kondenzátor 3,3 nF / 500 V
10	1	<i>C3, C16</i>	Keramický kondenzátor 100 nF / 50 V.
11	1	<i>C4</i>	Elektrolytický kondenzátor 47 μ F / 10 V
12	1	<i>C5</i>	Elektrolytický kondenzátor 1 μ F / 50 V
13	6	<i>C6, C7, C8, C9, C10, C11</i>	Elektrolytický kondenzátor 1000 μ F / 35 V (HITANO EXR série, $I_{RIPPLE}=1,9$ A, ESR=0,042 Ω)
14	4	<i>C12, C13</i>	Elektrolytický kondenzátor 100 μ F / 35V (HITANO EXR série, ESR = 0,25 Ω)
15	4	<i>C14, C15</i>	Elektrolytický kondenzátor 220 μ F / 35V (HITANO EXR série, ESR = 0,22 Ω)
16	1	<i>C17</i>	Bezpečnostní kondenzátor se zesílenou izolací typu Y1 – 2,2 nF
17	1	<i>C18</i>	Elektrolytický kondenzátor 22 μ F / 10 V
18	4	<i>L1, L2, L3, L4</i>	Tlumivka SCB8D43 4,7 μ H (MATSUTA SMD provedení, $I_{max} = 4,5$ A, ESL= 0,035 Ω)
19	1	<i>R1</i>	Odpor 20 k Ω / 2 W, 5%
20	1	<i>R2</i>	Odpor 6,8 Ω / 0,25 W, 5%
21	1	<i>R3</i>	Odpor 7,04 k Ω / 0,25 W, 5%
22	1	<i>R4</i>	Odpor 2 M Ω / 0,25 W, 5%
23	1	<i>R5</i>	Odpor 150 Ω / 0,25 W, 5%
24	1	<i>R6</i>	Odpor 1 k Ω / 0,25 W, 5%
25	1	<i>R7</i>	Odpor 3,3 k Ω / 0,25 W, 5%
26	1	<i>R8</i>	Odpor 10 k Ω / 0,25 W, 1%
27	1	<i>R9</i>	Odpor 20 k Ω / 0,25 W, 1%
28	1	<i>R10</i>	Odpor 6,38 k Ω / 0,25 W, 1%
29	1	<i>U1</i>	TPOSwitch TOP246Y
30	1	<i>U2</i>	Optočlen PC817A, CTR 50% – 200%
31	1	<i>U3</i>	Napěťová reference TL431
32	1	<i>T1</i>	Transformátor ETD-29
33	3	<i>J1, J2, J3</i>	Konektor Faston FS1536
34	2	<i>X1, X2</i>	Konektor do DPS WAGO231-332
35	1	<i>X3</i>	Konektor do DPS WAGO231-333
36	1	-	Vstupní odrušovací filtr FEH51106: F1 - Tavná pojistka 3 A / 250 V, kondenzátor 0,1 μ F (X2), 2 x kondenzátor 2,2 nF (Y2), odpor 1 M Ω , tlumivka 2 x 2,7mH
37	1	-	Kolébkový přepínač s indikací P-B127A (sít'ový vypínač)
38	1	-	Chladič V 4330F
39	7	-	Vestavné zdířky
40	1	-	Odpor 33 Ω / 5 W – předzátěž pro 3,3 V
41	1	-	Odpor 68 Ω / 5 W – předzátěž pro 5 V
42	2	-	Odpor 120 Ω / 5 W – předzátěž pro \pm 12 V
43	4	-	LED dioda v kovovém pouzdře

44	1	-	Odpor 62 Ω / 0,6 W – pro indikační LED (3,3 V)
45	1	-	Odpor 150 Ω / 0,6 W – pro indikační LED (5 V)
46	2	-	Odpor 680 Ω / 0,6 W – pro indikační LED (\pm 12 V)
47	1	-	Plastová krabice U-KP12
48	-	-	Ostatní elektroinstalační a spojovací materiál

C Excelovský program (tabulka) - výsledky

Vstupní hodnoty			
Vstupní napájecí napětí	U_{AC}	230	V
Síťový kmitočet	f_L	50	Hz
Doba otevření můstkového usměrňovače	t_C	3,00	ms
Předpokládaná hodnota účinnosti	η	75	%
Napětí zpětnovazebního vinutí	U_B	12	V
Alokační faktor rozdělení primárních a sekundárních ztrát	Z	0,68	-
Výstupní hodnoty			
1. výstupní napětí (hlavní - pro řízení zpětnovazebního obvodu)	U_{O1}	3,30	V
1. výstupní proud	I_{O1}	3,50	A
Povolená tolerance výstupního 1. výstupního napětí	tol_{1-}	5,00	%
2. výstupní napětí	U_{O2}	5,00	V
2. výstupní proud	I_{O2}	3,50	A
Povolená tolerance výstupního 1. výstupního napětí	tol_{2-}	5,00	%
3. výstupní napětí U_{O2}	U_{O3}	12,00	V
3. výstupní proud I_{O2}	I_{O3}	2,00	A
Povolená tolerance výstupního 1. výstupního napětí	tol_{3-}	10,00	%
4. výstupní napětí U_{O2}	U_{O4}	-12,00	V
4. výstupní proud I_{O2}	I_{O4}	2,00	A
Povolená tolerance výstupního 1. výstupního napětí	tol_{4-}	10,00	%
Max. / Min. vstupní napětí + výstupní výkon			
Maximální vstupní napětí	U_{ACMAX}	265	V
Minimální vstupní napětí	U_{ACMIN}	195	V
Celkový výstupní výkon	P_O	77,05	W
Nabíjecí (vstupní) kondenzátor C_{IN} (C_1)			
Výpočet	C_1	77,05	μF
Volba	C_1	100	μF
Kontrolní výpočty pro zvolený kondenzátor			
Vstupní proud	I_{IN}	0,4467	A
Zvlnění napětí na kondenzátoru	p	4,120	%
Stejnoseměrné vstupní napětí			
Maximální vstupní stejnosměrné napětí	U_{MAX}	374	V
Minimální vstupní stejnosměrné napětí	U_{MIIN}	239	V
Zpětné indukované napětí, Zenerovo omezovací napětí a maximálního napětí na obvodu TOPSwitch			
Velikost zpětného napětí	U_{OR}	100	V
Velikost omezovacího napětí	U_{CLO}	150	V
Hodnota Zenerova (omezovacího) napětí	U_{CLM}	210	V
Maximální napětí U_{DS} kolektor-emitor (DRAIN-SOURCE)	U_{DSMAX}	604	V
Určení hodnoty maximální střídy			
Volba napětí kolektor-emitor (DRAIN-SOURCE)	U_{DS}	10	V
Maximální hodnota střídy	DC_{MAX}	30,40	%

Určení poměru zvlněného a špičkového primárního proudu			
Koeficient poměru	K_{RP}	0,65	-
Parametry primárního vinutí			
Střední hodnota vstupního proudu	I_{AVG}	0,4298	A
Špičková hodnota primárního proudu	I_P	2,0945	A
Efektivní hodnota primárního proudu	I_{RMS}	0,8091	A
Volba obvodu TOPSwitch			
Požadovaný výkon	P_O	77,05	W
Požadovaný minimální limit proudu (pokojová teplota)	$I_{LIMIT(MIN)}$	2,2282	A
Kmitočet spínání	f_S	132	kHz
Zvolený obvod TOPSwitch	Vyhledej	TOP246Y	-
Maximální výkon obvodu	P	125	W
Minimální hodnota omezení proudu zvoleného obvodu	$I_{LIMIT(MIN)}$	2,511	A
Maximální hodnota omezení proudu zvoleného obvodu	$I_{LIMIT(MAX)}$	2,889	A
Odpor kanálu interního tranzistoru MOSFET mezi kolektor-emitor v sepnutém stavu	$R_{DS(ON)}$	4,3	Ω
Koeficient pro externí nastavení I_{LIMIT}	K_I	0,9	-
Výpočet externě redukováného $I_{LIMIT(MIN)}$	$I_{LIMIT(MIN)}$	2,2599	A
Výpočet externě redukováného $I_{LIMIT(MAX)}$	$I_{LIMIT(MAX)}$	2,6001	A
Tepelný odpor mezi přechodem a pouzdem součástky	θ_{JA}	25	$^{\circ}\text{C/W}$
Ztráty vedením proudu sepnutým interním MOSFET tranzistoru při minimální hodnotě vstupního proudu	P_{IR}	2,8150	W
Hodnota vnější kapacity mezi kolektorovým a emitorovým uzlem	C_{XT}	10,00	pF
Přepínací ztráty obvodu při nejmenší hodnotě vstupního střídavého napětí	P_{CXT}	0,1483	W
Teplota přechodů čipu jako funkce celkových ztrát	T_j	99,08	$^{\circ}\text{C}$
Kontrola I_P vzhledem k nastavení K_I	-	2,1243	A
Transformátor: volba + výpočty (kroky 15 až 28)			
Indukčnost primárního vinutí transformátoru	L_P	372	μH
Zvolený transformátor	Vyhledej	ETD29-3C90	-
Maximální výkon	P_{max}	109,50	W
Efektivní (účinná) plocha jádra	A_e	76,00	mm^2
Efektivní délka magnetické siločáry	L_e	72,00	mm
Indukční konstanta pro jádro bez vzduchové mezery	A_L	2350	nH
Šířka cívk	B_W	19,50	mm
Bezpečnostní šířka okraje	M	2,50	mm
Konstanta transformátoru určující počet závitů na jeden volt daného vinutí	N_J	2	z/V
Počet vrstev primárního vinutí	L	2	-
Napětí na diodě v propustném směru (hlavní výstup)	U_D	0,55	V
Vypočtený počet závitů primárního vinutí	N_P	51,95	z.
Napětí na diodě v propustném směru (zpětnovazební)	U_{DB}	0,95	V
Počet závitů zpětnovazebního vinutí	N_B	6,73	z.
Maximální vnější průměr vodiče primárního vinutí	OD	0,558	mm
Volba průměru vodiče primárního vinutí	DIA	0,450	mm
Hustota magnetického toku v jádře (magn. indukce)	B_M	0,1974	T

Velikost "vzduchové" mezery v magnetickém obvodu jádra transformátoru	L_g	0,6522	mm
Proudová kapacita vodiče	CMA	386,94	mil ² /A
Kontrola magnetické indukce při zvoleném K_i	B_P	0,2451	T
Transformátor - ostatní výpočty (kroky 29 a 30)			
Výpočet velikosti napětí na jeden závit	U_{PT}	1,9250	V
Špičková hodnota sekundárního proudu	I_{SP}	8,1816	A
Efektivní hodnota sekundárního proudu	I_{SRMS}	4,7820	A
Poměr efektivního a středního proudu	K_{RA}	1,3663	-
Transformátor - jednotlivá vinutí (kroky 31 až 34)			
Primární vinutí			
Počet závitů vinutí	N_P	52	z.
Počet závitů 1. vrstvy vinutí	N_{P1}	26	z.
Činitel plnění okna pro zvolený průměr vodiče	-	91	%
Počet závitů 2. vrstvy vinutí	N_{P2}	26	z.
Činitel plnění okna pro zvolený průměr vodiče	-	91	%
Zpětnovazební vinutí			
Požadované výstupní napětí	U_B	12,00	V
Napětí na diodě v propustném směru	U_{DB}	0,95	V
Použitý počet závitů vinutí	N_B	7	z.
Skutečná hodnota výstupního napětí	U_{BSk}	12,53	V
Špičkové reverzní napětí sekundárního vinutí	PIV_B	62,92	V
Minimální hodnota závěrného napětí pro zvolenou diodu	U_R	78,65	V
Minimální hodnota propustného proudu zvolené diody	$I_F(I_D)$	0,18	A
1. Sekundární vinutí			
Napětí na diodě v propustném směru	U_D	0,55	V
Vypočtený počet závitů vinutí	N_{S1}	2	z.
Skutečná hodnota výstupního napětí	U_{O1Sk}	3,30	V
Efektivní hodnota sekundárního proudu	I_{SRMS1}	4,7820	A
Minimální průměr holého vodiče	DIA_{S1}	0,787	mm
Volba průměru vodiče sekundárního vinutí	DIA_{S1}	0,450	mm
Minimální počet paralelních vinutí při použití zvoleného vodiče	PPV_{S1}	3	-
Efektivní hodnota zvlněného proudu výstupním kondenzátorem	I_{RIPPLE}	3,2585	A
Špičkové reverzní napětí sekundárního vinutí	PIV_S	17,70	V
Minimální hodnota závěrného napětí pro zvolenou diodu	U_R	22,12	V
Minimální hodnota propustného proudu zvolené diody	$I_F(I_D)$	10,50	A
2. Sekundární vinutí			
Napětí na diodě v propustném směru	U_D	0,70	V
Vypočtený počet závitů vinutí	N_{S2}	2,96	z.
Použitý počet závitů vinutí	N_{S2}	3,0	z.
Skutečná hodnota výstupního napětí	U_{O2Sk}	5,08	V
Tolerance od zadané hodnoty výstupního napětí	$Tol.$	1,50	%
Efektivní hodnota sekundárního proudu	I_{SRMS2}	4,7820	A
Minimální průměr holého vodiče	DIA_{S2}	0,787	mm
Volba průměru vodiče sekundárního vinutí	DIA_{S2}	0,450	mm
Minimální počet paralelních vinutí při použití zvoleného vodiče	PPV_{S2}	3	-
Efektivní hodnota zvlněného proudu výstupním kondenzátorem	I_{RIPPLE}	3,2585	A

Špičkové reverzní napětí sekundárního vinutí	PIV_S	26,58	V
Minimální hodnota závěrného napětí pro zvolenou diodu	U_R	33,22	V
Minimální hodnota propustného proudu zvolené diody	$I_F(I_D)$	10,50	A
3. Sekundární vinutí			
Napětí na diodě v propustném směru	U_D	0,80	V
Vypočtený počet závitů vinutí	N_{S3}	6,65	z.
Použitý počet závitů vinutí	N_{S3}	7,0	z.
Skutečná hodnota výstupního napětí	U_{O3Sk}	12,68	V
Tolerance od zadané hodnoty výstupního napětí	Tol.	5,62	%
Efektivní hodnota sekundárního proudu	I_{SRMS3}	2,7326	A
Minimální průměr holého vodiče	DIA_{S3}	0,595	mm
Volba průměru vodiče sekundárního vinutí	DIA_{S3}	0,450	mm
Minimální počet paralelních vinutí při použití zvoleného vodiče	PPV_{S3}	2	-
Efektivní hodnota zvlněného proudu výstupním kondenzátorem	I_{RIPPLE}	1,8620	A
Špičkové reverzní napětí sekundárního vinutí	PIV_S	62,35	V
Minimální hodnota závěrného napětí pro zvolenou diodu	U_R	77,93	V
Minimální hodnota propustného proudu zvolené diody	$I_F(I_D)$	6,00	A
4. Sekundární vinutí			
Napětí na diodě v propustném směru	U_D	0,80	V
Vypočtený počet závitů vinutí	N_{S4}	6,65	z.
Použitý počet závitů vinutí	N_{S4}	7,0	z.
Skutečná hodnota výstupního napětí	U_{O4Sk}	-12,68	V
Tolerance od zadané hodnoty výstupního napětí	Tol.	5,62	%
Efektivní hodnota sekundárního proudu	I_{SRMS4}	2,7326	A
Minimální průměr holého vodiče	DIA_{S4}	0,595	mm
Volba průměru vodiče sekundárního vinutí	DIA_{S4}	0,450	mm
Minimální počet paralelních vinutí při použití zvoleného vodiče	PPV_{S4}	2	-
Efektivní hodnota zvlněného proudu výstupním kondenzátorem	I_{RIPPLE}	1,8620	A
Špičkové reverzní napětí sekundárního vinutí	PIV_S	62,35	V
Minimální hodnota závěrného napětí pro zvolenou diodu	U_R	77,93	V
Minimální hodnota propustného proudu zvolené diody	$I_F(I_D)$	6,00	A

Návrh chladiče pro TOPSwitch (krok 42)			
Celkový ztrátový výkon	P_{ztot}	25,68	W
Ztrátový výkon na primární straně	P_{zpr}	8,22	W
Maximální teplota přechodu (čipu)	ϑ_{Jmax}	150	°C
Maximální teplota okolí	ϑ_{Amax}	45	°C
Vnitřní tepelný odpor obvodu TOPSwitch	$R_{\vartheta JC}$	2	°C/W
Tepelný odpor styku s obvodu chladičem	$R_{\vartheta CS}$	1,6	K/W
Maximální tepelný odpor chladiče	$R_{\vartheta SA}$	9,18	K/W
Zvolený tepelný odpor chladiče	$R_{\vartheta SA}$	9	K/W

Obsah příloženého CD nosiče

- 1. Elektronická verze bakalářské práce**
- 2. Excelovský program (kalkulátor)**
- 3. Projekt spínaného zdroje v programu Eagle**
 - 3.1 Obvodové zapojení**
 - 3.2 Deska plošného spoje**
 - 3.3 Knihovna použitých součástek**
- 4. Katalogový list obvodů TOPSwitch modelové řady TOP – GX**