

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Porovnání synchronních usměrňovačů a usměrňovačů se  
Schottkyho diodami**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David KRATINA**  
Osobní číslo: **E12N0153P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**  
Název tématu: **Porovnání synchronních usměrňovačů a usměrňovačů se Schottkyho diodami**  
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

### Zásady pro vypracování:

Vypracujte porovnání vlastností synchronních usměrňovačů a usměrňovačů založených na použití Schottkyho diod.

1. Vyhledejte a detailně prostudujte aplikace synchronních usměrňovačů v elektrotechnice.
2. Porovnejte vlastnosti synchronních usměrňovačů a usměrňovačů založených na použití Schottkyho diod.
3. Vyhledejte a porovnejte parametry, náročnost implementace a vhodnost použití různých řídicích obvodů synchronních usměrňovačů.
4. Navrhněte a realizujte testovací přípravek, na kterém měřením ověříte vybrané parametry minimálně 2 vzorků synchronních usměrňovačů.
5. Diskutujte dosažené výsledky a celou práci podrobně popište.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Ondřej Pajer**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: 30. června 2014

Termín odevzdání diplomové práce: 25. srpna 2014

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



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 3. července 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na porovnání synchronních usměřovačů se Schottkyho diodami. Nejprve jsou stručně popsány základy Schottkyho diod a synchronních usměřovačů. Poté jsou ukázány aplikace, ve kterých se nacházejí synchronní usměřovače. Ve třetí kapitole jsou porovnány synchronní usměřovače a Schottkyho diody. Následující část se věnuje řídicím obvodům. Pátá část se zabývá návrhem a měřením synchronních usměřovačů. V závěru práce jsou shrnuty poznatky.

## **Klíčová slova**

Synchronní usměřovač, Schottkyho dioda, MOSFET tranzistor, řídicí obvody MOSFET tranzistorů

## **Abstract**

This diploma thesis is focused on comparison of synchronous rectifiers and rectifiers with Schottky diodes. Firstly, there are briefly described basics of the Schottky diodes and the synchronous rectifiers. Next, there are shown some applications of the synchronous rectifiers. In the third chapter, there are the synchronous rectifiers compared to the Schottky diodes. The following part of the thesis is dedicated to control circuits. The fifth part deals with design and measurement of the synchronous rectifiers. There are summarized findings at the end of this thesis.

## **Key words**

Synchronous rectifier, Schottky diode, MOSFET tranzistor, MOSFET tranzistor control circuits

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

.....  
podpis

V Plzni dne 25.8.2014

David Kratina

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ondřejovi Pajerovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 USMĚRŇOVAČE</b> .....	<b>12</b>
1.1 TYPY USMĚRŇOVAČŮ .....	12
1.1.1 Jednocestný usměrňovač.....	12
1.1.2 Dvoucestný usměrňovač.....	13
1.1.3 Místkový usměrňovač.....	13
1.2 USMĚRŇOVACÍ SOUČÁSTKY.....	14
1.2.1 Usměrňovací dioda s PN přechodem.....	14
1.2.2 Schottkyho dioda.....	14
1.3 SYNCHRONNÍ USMĚRŇOVAČ .....	15
1.3.1 Tranzistory MOSFET.....	16
<b>2 APLIKACE SYNCHRONNÍCH USMĚRŇOVAČŮ</b> .....	<b>17</b>
2.1 FEBFAN6754WAMR_CP450v1 .....	18
2.2 FEBFAN6920MR_T02U120A .....	19
2.3 DC/DC SBĚRNICOVÝ MĚNIČ .....	20
2.4 EVL90WADP-LLCSR .....	21
2.5 PMP5967 .....	22
<b>3 POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ</b> .....	<b>24</b>
3.1 ZTRÁTY .....	24
3.2 ZAHŘÍVÁNÍ .....	27
3.3 FREKVENCE .....	28
3.4 ROZMĚRY .....	28
3.5 SLOŽITOST ZAPOJENÍ .....	28
3.6 CĚNA .....	29
<b>4 ŘÍDÍCÍ OBVODY SYNCHRONNÍCH USMĚRŇOVAČŮ</b> .....	<b>30</b>
4.1 TYPY ŘÍDÍCÍCH OBVODŮ .....	30
4.1.1 FAN6208.....	30
4.1.2 IR11672ASPBF .....	31
4.1.3 IR11682SPBF .....	33
4.1.4 LTC3900 .....	34
4.1.5 NCP4304A .....	36
4.1.6 SiP11203.....	38
4.1.7 SP6018.....	40
4.1.8 STSR30.....	41
4.1.9 SRK2000A.....	43
4.1.10 UCC24610.....	45
4.2 POROVNÁNÍ ŘÍDÍCÍCH OBVODŮ .....	46
4.2.1 Obvody pro jednocestné usměrňovače.....	47
4.2.2 Obvody pro dvoucestné usměrňovače.....	48
<b>5 NÁVRH SYNCHRONNÍHO USMĚRŇOVAČE</b> .....	<b>50</b>
5.1 UCC24610 .....	50
5.2 SRK2000.....	51
5.3 MĚŘENÍ ÚČINNOSTI.....	52



<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>56</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>1</b>

## Seznam symbolů a zkratk

$C_{DS}$	[nF]	Kapacita mezi elektrodami Drain a Source
$C_{GS}$	[nF]	Vstupní kapacita řídicí elektrody
D		Poměr mezi dobou sepnutí tranzistoru na primární straně měniče a periodou
f	[kHz]	Pracovní kmitočet měniče
$\Delta I_{SEC}$	[A]	Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou proudu ISEC
$I_D$	[A]	Jmenovitý proud
$I_{DM}$	[A]	Špičkový neopakovatelný proud
$I_{OD}$	[A]	Proud protékající ochrannou diodou
$I_{out}$	[A]	Výstupní proud
$I_{outfal}$	[A]	Odebíraný proud z Gate
$I_{outris}$	[A]	Dodávaný proudu do Gate
$I_{rr}$	[A]	Špičková hodnota zotavovacího proudu
$I_{sec}$	[A]	Proud sekundárním vynutím
n		převodní poměr transformátoru
$P_{CAP}$	[W]	Ztráty vznikající vlivem parazitních kapacit
$P_{COND}$	[W]	Vodivostní ztráty
$P_D$	[W]	Ztrátový výkon
$P_{D MAX}$	[W]	Maximální ztrátový výkon
$P_{SD}$	[W]	Ztráta na Schottkyho diodovém usměrňovači
$P_{SW}$	[W]	Spínací ztráty
$Q_{rr}$	[C]	Zotavovací náboj nulové diody
$R_{DS(on)}$	[ $\Omega$ ]	Odpor v sepnutém stavu
$t_{fal}$	[s]	Doba doběžné hrany
$t_{off}$	[S]	Celková vypínací doba
$t_{on}$	[S]	Zapínací doba
$t_{ris}$	[S]	Doba náběžné hrany
$t_{rr}$	[S]	Zotavovací doba nulové diody
$t_S$	[S]	Perioda
$T_{SR}$	[S]	Doba kdy je aktivní synchronní usměrňovač
$U_{(BN)DSS}$	[V]	Závěrné průrazné napětí Drain Source
$U_{CC}$	[V]	Napájecí napětí
$U_d$	[V]	Úbytek napětí na ochranné diodě
$U_{DS}$	[V]	Napětí Drain Source
$U_{DVS1,2\_Off}$	[mV]	Napětí Drain Source při kterém se vypne tranzistor
$U_{GS}$	[V]	Napětí Gate Source
$U_{GS MAX}$	[V]	Maximální průrazné napětí řídicí elektrody
$U_{IN}$	[V]	Vstupní napětí blokujícího měniče
$U_{in TH}$	[mV]	Vstupní prahové napětí řídicích obvodů
$U_{SD}$	[V]	Úbytek napětí na Schottkyho diodě

## Úvod

Předkládaná diplomová práce se zabývá porovnáním synchronních usměřovačů a usměřovačů se Schottkyho diodami. V dnešní době jsme obklopeni elektronikou na každém kroku. S rostoucím počtem elektronických zařízení roste i spotřeba elektrické energie. Veškerá elektronika se stává výkonnější, proto je potřeba mít výkonné zdroje elektrické energie s vysokou účinností. Při zvyšování účinnosti a výkonu se zavádějí aplikace se synchronními usměřovači. Aplikace synchronních počítačů jsou popsány v druhé kapitole. Jelikož náhrada Schottkyho diod synchronním usměřovačem není vždy to nejlepší řešení, je ve třetí kapitole rozebráno porovnání těchto usměřovačů. Synchronní usměřovače potřebují oproti Schottkyho diodám řízení spínání. Toto řízení spínání musí být dostatečně přesné a rychlé, proto je vhodné zvolit pro řízení řídicí obvod pro synchronní usměřovače. Ve čtvrté kapitole jsou popsány a porovnány základní parametry řídicích obvodů synchronních usměřovačů. V závěru práce popsán návrh dvou řídicích obvodů synchronních usměřovačů.

V dnešní době je potřeba stále větších výkonů, toho lze dosáhnout dvěma způsoby. Buď budeme mít více prvotní energie anebo snížíme ztráty. Výrobci se snaží zvyšovat účinnost napájecích zdrojů, ta se dnes přesahuje 80%. Stále se hledají způsoby, kde by se dalo ušetřit. Proto vznikly synchronní usměřovače. Mají za úkol snížit ztráty při usměřování napětí o frekvenci řádově stovky kHz. Další jejich výhodou je možnost usměrnění i velice malých signálů.

# 1 Usměrňovače

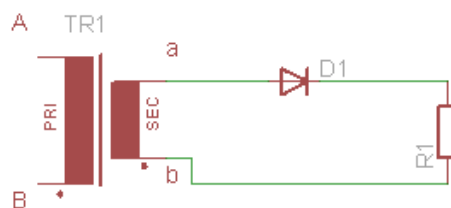
Základním principem usměrňovačů je přeměna střídavého napětí na stejnosměrné (pulzující). Usměrňovací obvody lze rozdělit do dvou hlavních skupin - jednofázové a třífázové (v této práci se budu zabývat výhradně jednofázovými usměrňovači). Jednofázové usměrňovače lze dále dělit na jednocestné, dvoucestné a můstkové.

## 1.1 Typy usměrňovačů

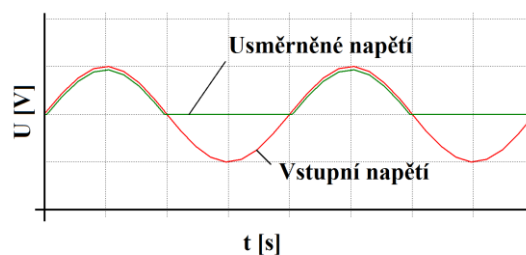
### 1.1.1 Jednocestný usměrňovač

Nejjednodušším zapojením je jednocestný jednofázový usměrňovač, který má jen jeden usměrňovací prvek, jak je znázorněno na *Obr.1.1.11*. Proud může tímto obvodem protékat jen, je-li dioda polarizovaná v propustném směru. Je-li dioda polarizovaná v závěrném směru, protéká obvodem jen zanedbatelný proud. Toto zapojení je sice velmi jednoduché, ale sekundárním vinutím transformátoru prochází jen stejnosměrná složka. To způsobuje přesycení jádra transformátoru, které se má za následek zvýšení teploty transformátoru, zkrácení průběhu napětí a také snížení účinnosti takového zdroje [1].

Jeho výhodou je v jednoduchosti.



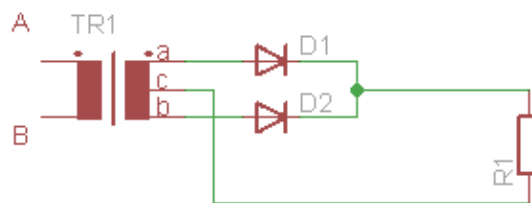
Obr. 1.1.1.1 Základní zapojení jednocestného usměrňovače



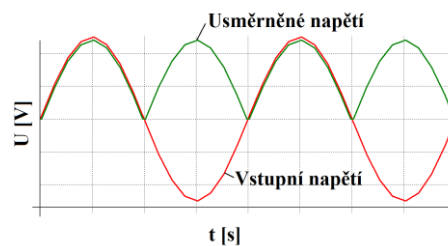
Obr. 1.1.1.2 Průběhy vstupního a výstupního napětí jednocestným usměrňovačem

### 1.1.2 Dvoucestný usměrňovač

Častěji se používá dvoucestný usměrňovač nebo můstkový usměrňovač. Zátěž u dvoucestného usměrňovače je připojena mezi spojené konce usměrňovacích prvků a vyvedený střed výstupního vynutí transformátoru, viz *Obr. 1.1.2.1*. Vzhledem ke středu vinutí jsou napětí na začátku vinutí na svorce *a* a na konci vinutí na svorce *b* opačná. Velikost obou těchto napětí je stejná. V první polovině periody, když je polarita střídavého napětí na začátku vinutí kladná, je dioda  $D_1$  polarizována v propustném směru a propouští proud. Dioda  $D_2$  je polarizována v závěrném směru a je uzavřená. V druhé polovině periody je tomu naopak. Během celé periody bude napětí na zátěži kladné. Nevýhodou tohoto zapojení je, že se vždy využívá jen polovina vinutí [1].



*Obr. 1.1.2.1 Základní zapojení dvoucestného usměrňovače*

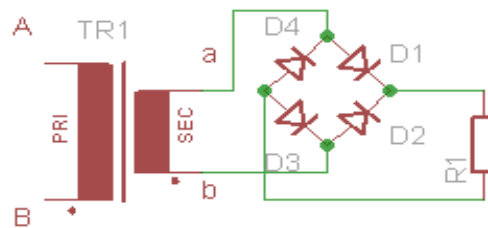


*Obr. 1.1.2.2 Průběhy vstupního a výstupního napětí dvoucestným usměrňovačem*

### 1.1.3 Můstkový usměrňovač

Třetím základním typem usměrňovačů je můstkový usměrňovač, jedná se o dvoucestný jednofázový usměrňovač, jehož výhodou spočívá v jednoduchosti transformátoru, který nemá vyvedený střed, viz *Obr. 1.1.3.1*. Vedení proudu se vždy účastní vždy jen dvě ze čtveřice diod. Když je polarita napětí na svorce transformátoru *a* kladná oproti svorce *b*, poté diody  $D_1$  a  $D_3$  jsou polarizovány v propustném směru a vedou elektrický proud, který protéká zátěží.

Naopak diody  $D_2$  a  $D_4$  jsou polarizovány závěrně a vedení se v tuto chvíli neúčastní. Při druhé polovině periody, když se polarita napětí na svorkách sekundárního vinutí transformátoru obrátí, vedou diody  $D_2$  a  $D_4$ , naproti tomu diody  $D_1$  a  $D_3$  jsou polarizovány závěrně. Průběhy napětí se shodují s jednoduchým dvoucestným usměrňovačem viz *Obr. 1.1.2.2*. Oproti dvoucestnému usměrňovači má můstkový usměrňovač dvojnásobné ztráty[1].



*Obr. 1.1.3.1 Základní zapojení můstkového usměrňovače*

## 1.2 Usměrňovací součástky

### 1.2.1 Usměrňovací dioda s PN přechodem

Polovodičová dioda má jeden PN přechod s usměrňujícím účinkem. Při polarizaci tohoto PN přechodu v propustném směru je průběh proudu po překonání prahového napětí přibližně exponenciální. Velikost prahového napětí je dána materiálem, ze kterého je dioda vyrobena. Pro výrobu diod se nejčastěji využívá křemíku a germánia. Diody se vyrábějí převážně difúzí nebo slitinovou technologií. Výhodou těchto diod je jejich velká proudová zatížitelnost a proto se využívají ve výkonnějších zařízeních s nízkým kmitočtem.

### 1.2.2 Schottkyho dioda

Schottkyho dioda je součástka, která má přechod MN (kov-polovodič). Využívá se k usměrnění signálů s vysokými frekvencemi. Výhodou této diody je, že u ní nedochází k injekci minoritních nosičů náboje a proto je vedení proudu realizováno pouze majoritními nosiči. V přímém směru mají Schottkyho diody menší úbytky napětí než diody s PN přechodem. Elektrony přecházejí z polovodiče typu N do kovu, kde ztrácejí přebytek své energie. Jedná se o elektrony z vrcholu elektronické bariéry.

Jako materiál pro výrobu Schottkyho diod se nejčastěji používá křemík nebo GaAs. Diodu tvoří destička, která je ze silně dotovaného polovodiče typu  $N^+$ . Dále je na tuto

destičku nanesená pomocí expitace vrstva typu N. Nakonec je realizován kontakt kov-polovodič, který se vytváří napařováním. Dobré závěrné vlastnosti diodě zajišťuje expitační slabě dotovaná vrstva. Malý sériový odpor a dobrý ohmický kontakt zajišťuje silně dotovaná vrstva.

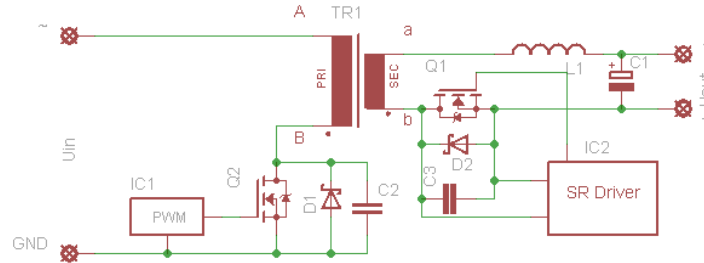
Schottkyho diody nacházejí nejčastěji uplatnění v aplikacích pro velmi vysoké frekvence, zde nahrazují hrotové diody, proti nimž mají lepší reprodukovatelnost při výrobě, mechanickou pevnost, vyšší závěrné napětí a menší šum. Vzhledem k malému napětí a k rychlým spínacím časům jsou Schottkyho diody užívány jako ochranné prvky ve spínačích s dobou sepnutí jednotky ns i menší a jako součástky rychlých logických integrovaných obvodů. Schottkyho diody se díky malému napětí v přímém směru využívají také ve výkonové technice jako usměrňovače a spínače s větší energetickou účinností, menší hmotností a rozměry než klasické diody. Za nedostatek lze u Schottkyho diod považovat menší závěrné napětí.[2]

### 1.3 Synchronní usměrňovač

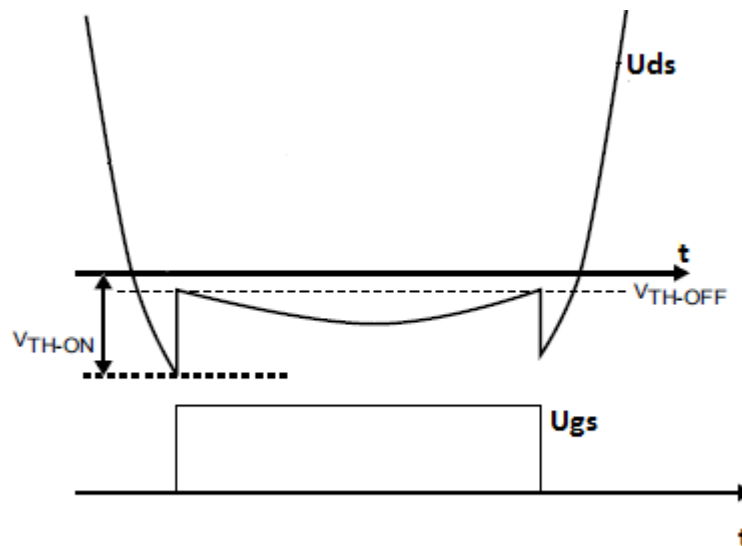
Synchronní usměrňovače se používá jako usměrňovače ve spínaných zdrojích, pro usměrnění střídavého napětí na sekundární straně transformátoru. Usměrňovací prvek zde tvoří tranzistor MOSFET, který nahrazuje Schottkyho diody. Tranzistor je nutné řídit pomocným obvodem, tak aby spínal ve stejný okamžik jako by se otevíraly usměrňovací diody. Oproti diodám, které se většinou dávají do kladné větve, se synchronní usměrňovač zásadně umísťuje do záporné větve. To může činit potíže při přestavbě zdroje s usměrňovačem se Schottkyho diodami na zdroj se synchronním usměrňovačem. Především má-li tento zdroj transformátor s vyvedeným středem a více vinutí pro různá napětí (ATX zdroj).

Synchronní usměrňovač pracuje na principu snímání napětí Drain Source. Když překročí hladina napětí na tranzistoru nulu a jde do záporných hodnot, začne se otevírat dioda, která je buď v těle tranzistoru, nebo vně. Spadne-li napětí pod rozhodovací mez, řídicí obvod to vyhodnotí a sepne tranzistor, ten vede díky malému odporu většinu proudu. Když napětí začne opět růst a dostane se k rozhodovací úrovni, řídicí obvody tranzistor vypnou. Je potřeba

dodržet časování, aby nedošlo ke zkratu. Řídící obvody obsahují časovače, proto vyhodnocují s načasování sepnutí a rozepnutí, aby se omezily rušivé kmity. Průběhy jsou naznačeny na Obr. 1.3.2



Obr. 1.2.2 Principiální schéma blokovacího měniče se synchronním usměrňovačem



Obr. 1.2.22 Časové průběhy napětí na tranzistoru [28]

### 1.3.1 Tranzistory MOSFET

Tranzistory MOSFET se používají u synchronních usměrňovačů jako usměrňovací prvek. Pro vhodné usměrnění je třeba je řídit, to znamená, že musíme ve správný čas sepnout tranzistor a ve správný čas rozepnout tranzistor. Tyto časy by se neměly lišit od časů „spínání“ běžnými Schottkyho diodami. Při tomto rychlém otevírání a zavírání teče řídicí elektrodou značně velký proud, který je závislý na frekvenci spínání. V ustáleném stavu tento proud neteče, protože řídicí elektroda je galvanicky oddělena od substrátu. Toto spojení vytváří parazitní kapacitu.



Mezními parametry se označuje  $U_{(BR)DS}$ , což je závěrné (průrazné) napětí (BR [Break], DS [Drain - Source, kolektor - emitor], S [short] značí, že při měření je řídicí elektroda zkratována s emitorem),  $U_{GS\ MAX}$  je maximální (průrazné) napětí řídicí elektrody (bývá obvykle  $U_{GS\ MAX} = \pm 20V$ ),  $I_D$  značí jmenovitý proud,  $I_{DM}$  je špičkový neopakovatelný proud a maximální ztrátový výkon  $P_{D\ MAX}$  (při teplotě  $T_C = 25^\circ C$ ). Mezi statické parametry spadá  $R_{DS\ (on)}$ , což značí odpor v sepnutém stavu (obvykle pro  $U_{GS} = +15\ V$ ),  $U_{GS}$  označuje prahové napětí řídicí elektrody. Dynamické parametry tvoří pro tranzistor  $t_{off}$  - celková vypínací doba,  $C_{GS}$  je vstupní kapacita řídicí elektrody, mezi G-S a  $t_{on}$  je zapínací doba. Pro nulovou diodu spolupracující s tranzistorem jsou dynamické parametry  $t_{rr}$  (zotavovací doba),  $Q_{rr}$  (zotavovací náboj),  $I_{rr}$  (špičková hodnota zotavovacího proudu). [3, s. 128-129]

Každý MOSFET obsahuje vždy substrátovou diodu, zapojenou antiparalelně k tranzistoru. Tato dioda je napětově a proudově vždy kompatibilní s tranzistorem. Ve větvi je tato dioda nevyužitelná jako nulová dioda, protože u běžných vysokonapětových tranzistorů je velmi pomalá (přibližně  $t_{rr} = 1\ \mu s$ ). Její činnost se v tomto případě eliminuje diodou, která je sériově řazená k tranzistoru a teprve tato dvojice se překlene rychlou externí nulovou diodou (přibližně  $t_{rr} = 0,3\ \mu s$ ). Existují však tranzistory se substrátovou diodou, která je vhodně fyzikálně upravená tak, že se její zotavovací doba pohybuje v oblasti  $0,3\ \mu s$ . V tomto případě je taková substrátová dioda plně využitelná. Tranzistory (pod 100V) mají substrátovou diodu vždy dostatečně rychlou z přirozených fyzikálních důvodů. Její rychlost se pohybuje v rozmezí  $0,3$  až  $0,5\ \mu s$ . [3]

## 2 Aplikace synchronních usměrňovačů

Synchronní usměrňovače se používají ve spínaných zdrojích pro usměrnění vysokofrekvenčních signálů ( $50\ Hz \ll f \leq 600\ kHz$ ). Svoje uplatnění nacházejí zejména ve zdrojích s nízkým výstupním napětím a vysokými proudy, kde nahrazují Schottkyho diody. Ve spínaných zdrojích s vysokou frekvencí se nepoužívají běžné usměrňovací diody z důvodu velkých ztrát na těchto diodách. Upřednostnění synchronních usměrňovačů před Schottkyho diodami není samozřejmostí, ale záleží na několika parametrech, jako jsou účinnost, počet součástek na DPS (desce plošných spojů), místo na DPS, celkové náklady, množství vyzářeného tepla a pracovní frekvence.

Existuje mnoho zapojení řídicích obvodů s diskretními součástkami, ty však ve většině případů nedosahují takových vlastností jako příslušné řídicí obvody. Proto jsem se zaměřil na synchronní usměrňovače řízené řídicími obvody.

Svoje uplatnění nacházejí synchronní usměrňovače především v napájecích zdrojích pro stolní počítače, servery, notebooky, herní konzole, napájení programovatelných logických obvodů FPGA v telekomunikacích, v DC/DC měničích v elektromobilech, u vesmírných družic a v neposlední řadě u specializovaných AC/DC a DC/DC měničích.

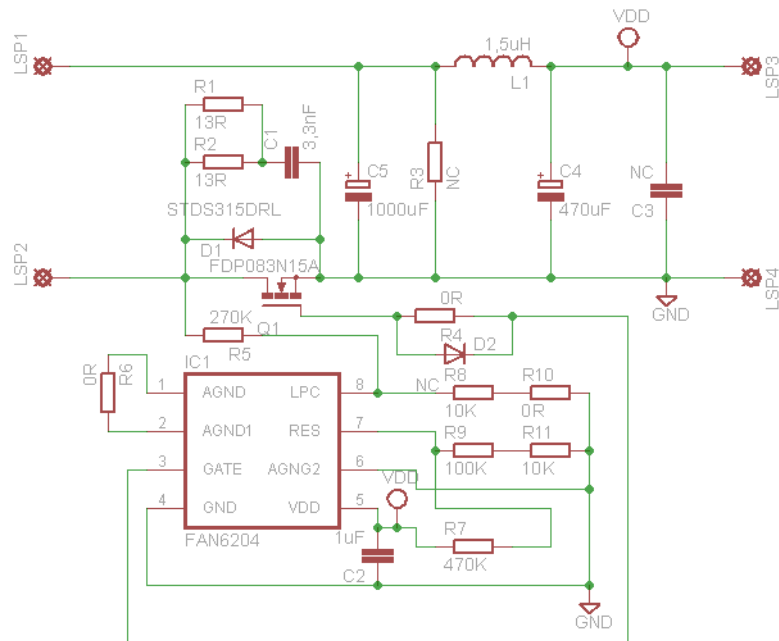
## 2.1 FEBFAN6754WAMR\_CP450v1

Tento zdroj od firmy Fairchild semiconductor s výkonem 65W slouží jako napájecí adaptér pro LCD monitory, LCD televize a jako adaptér k notebookům. Řízení tohoto zdroje obstarává FAN6754WAMR. Řídicí obvod synchronního usměrňovače FAN6204MY umožňuje snížení ztrát, když je výstup jen málo zatížen tím, že omezí spínání tranzistorů. [4]

*Tab. 2.1.1 Obecné specifikace[4]*

	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Jednotky</i>
<i>Vstupní napětí (stř)</i>	90	264	V
<i>Vstupní frekvence</i>	47	63	Hz
<i>Výstupní napětí (ss)</i>	-	19	V
<i>Výstupní proud</i>	-	3,42	A
<i>Výkon</i>	-	65	W

Synchronní usměrňovač je zde realizován jako jednocestný usměrňovač pro blokující měnič. Usměrňovač je doplněn o výstupní filtr. Řídicí obvod je napájen z výstupního napětí zdroje. Usměrňovací prvek je zde tvořen tranzistorem FDP083N15A. Jedná se o tranzistor MOSFET s kanálem typu N. Odpor v propustném směru  $R_{DS(on)}$  je 6,85 m $\Omega$  a vstupní kapacita  $C_{GS}$  je 4,645 nF. [5]



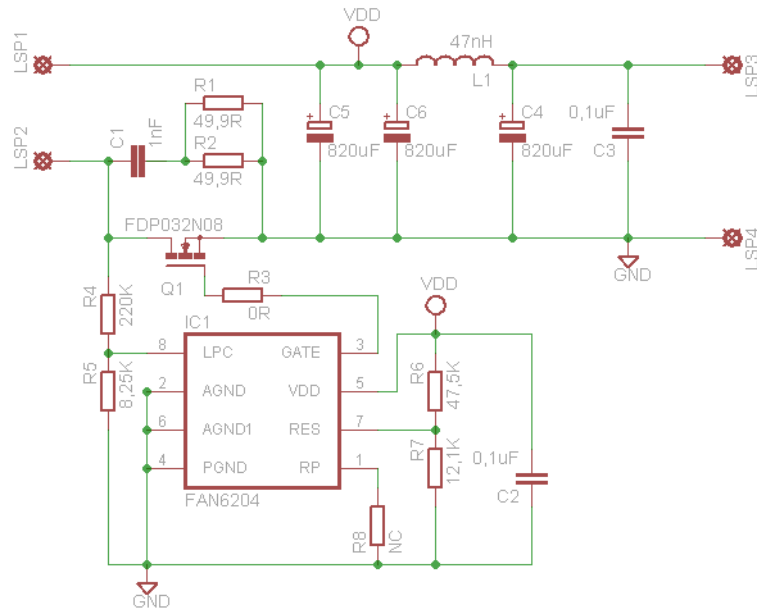
Obr. 2.1.1 Aplikace synchronního usměrňovače ve zdroji pro monitory LCD FEBFAN6754WAMR\_CP450v1[4]

## 2.2 FEBFAN6920MR\_T02U120A

Tento zdroj je podobný jako předchozí, jen má dvojnásobný výstupní výkon. Tomu je přizpůsobeno i vnitřní zapojení. Usměrňovací prvek je zde tvořen tranzistorem FDP032N08. Jedná se o tranzistor MOSFET s kanálem typu N. Odpor v propustném směru  $R_{DS(on)}$  je 2,5 m $\Omega$  a vstupní kapacita  $C_{GS}$  je 11,4 nF. [6]

Tab. 2.2.1 Obecné specifikace[7]

	Minimum	Maximum	Jednotky
Vstupní napětí (stř)	90	264	V
Vstupní frekvence	50	60	Hz
Výstupní napětí (ss)	-	19	V
Výstupní proud	-	6,3	A
Výkon	-	120	W



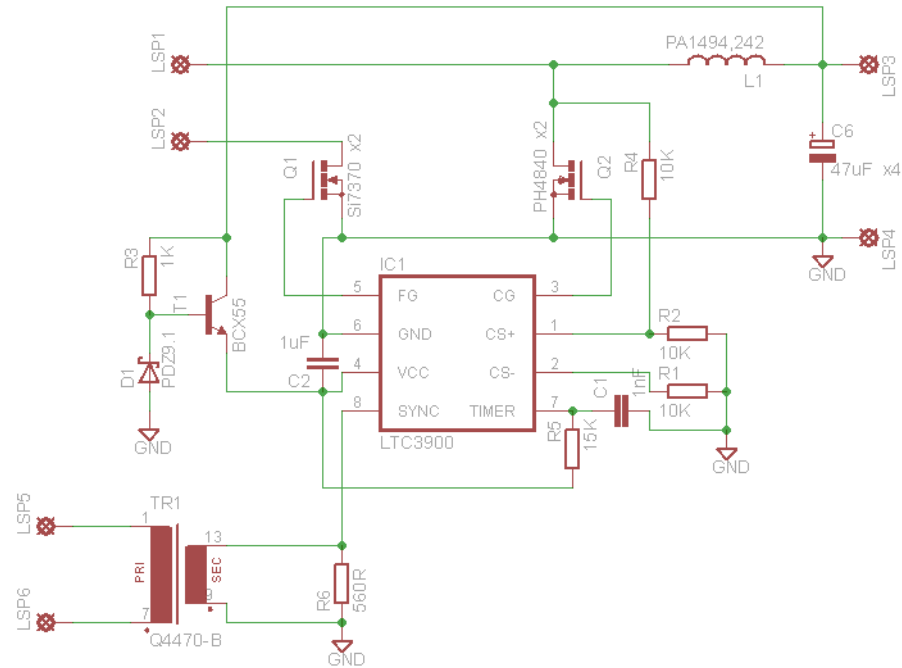
Obr. 2.2.1 Aplikace synchronního usměrňovače ve zdroji pro monitory LCD FEBFAN6754WAMR\_CP450v1[7]

### 2.3 DC/DC sběrníkový měnič

Mnoho telekomunikačních a průmyslových aplikací vyžaduje při nízkém napětí vysokou účinnost měniče. Typické výstupní napětí v těchto aplikacích se pohybuje mezi 1.8V a 12V.[8] Jako usměrňovací prvky jsou použity dva tranzistory Si7370, z nichž každý má odpor v propustném směru  $R_{DS(on)} = 9 \text{ m}\Omega$ . [9] Druhá dvojice tranzistorů je zde pro mužnění průtoku proudu cívkou a se skládá z PH4840, který má  $R_{DS(on)} = 4,1 \text{ m}\Omega$  a vstupní kapacitu  $C_{GS} 3,66 \text{ nF}$ . [10] Synchronizační pulzy jsou zde přivedeny přes druhý oddělovací transformátor.

Tab. 2.3.1 Obecné specifikace[8]

	Minimum	Maximum	Jednotky
Vstupní napětí (ss)	36	63	V
Výstupní napětí (ss)	-	12	V
Výstupní proud	-	20	A
Výkon	-	240	W



Obr. 2.3.1 DC/DC měnič určený pro sběrnice[8]

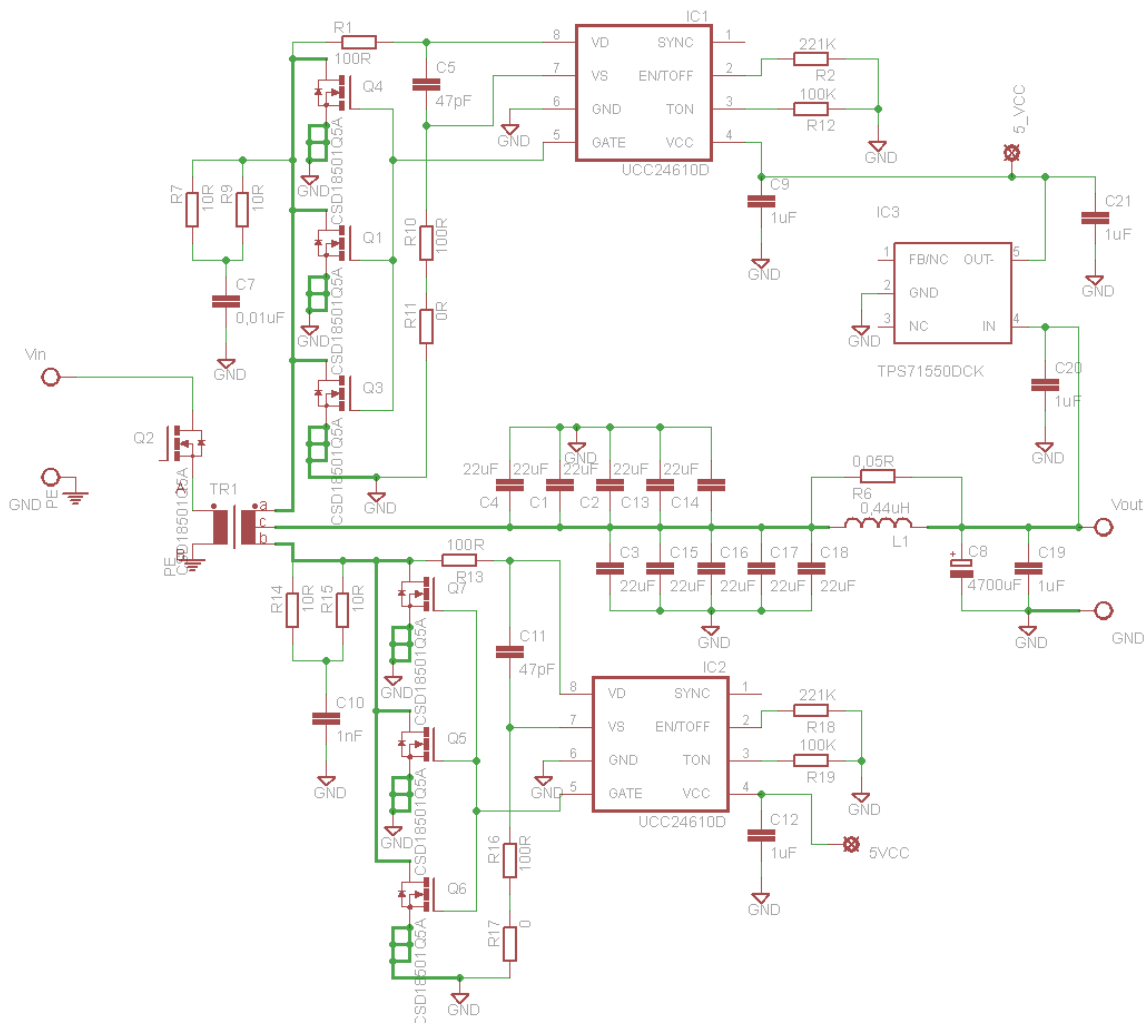
## 2.4 EVL90WADP-LLCSR

Jako další příklad použití jsem vybral EVL90WADP-LLCSR. Jedná se o 90W zdroj pro laptop. Tento zdroj využívá rezonančního dvojčinného měniče. Synchronní usměrňovač na výstupu tohoto zdroje je dvoucestný. K řízení využívá jen jeden řídicí obvod SRK2000.[11] V zapojení jsou i dva tranzistory MOSFET STF60N55F3 s oporem v sepnutém stavu  $R_{DS(on)} = 6,5 \text{ m}\Omega$  a vstupní kapacitou  $C_{GS} = 2,2 \text{ nF}$ . [12]

**Tab. 2.4.1** Obecné specifikace[11]

	Minimum	Maximum	Jednotky
Vstupní napětí (stř)	90	264	V
Vstupní frekvence	45	65	Hz
Výstupní napětí (ss)	-	19	V
Výstupní proud	-	4,75	A
Výkon	-	90	W
Účinnost	-	92	%





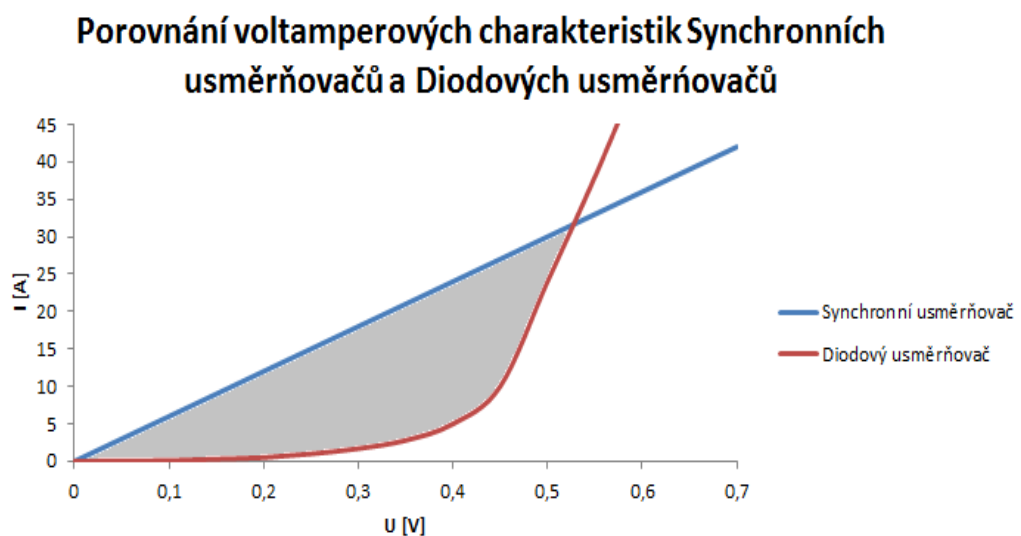
Obr. 2.5.1 Aplikace synchronního usměrňovače v napájecím DC/DC měnič PMP5967 [14]

### 3 Porovnání vlastností

V dnešní době mají Schottkyho diody stále početní převahu nad synchronními usměrňovači. Synchronní usměrňovače se používají jako náhrada za Schottkyho diody v aplikacích, kde je třeba zvýšit účinnost zdroje. Vzhledem k vývoji MOSFET tranzistorů a ke snižování odporu v propustném směru  $R_{DS(on)}$  je na synchronním usměrňovači menší úbytek napětí a tím i menší ztrátový výkon. Volba, kdy použít synchronní usměrňovač a kdy použít Schottkyho diody, závisí na několika parametrech, jako jsou výstupní napětí, výstupní proud, úbytek napětí na usměrňovači v propustném směru, typ měniče, účinnost, počet součástek na DPS (desce plošných spojů), místo na DPS, celkové náklady, množství vyzářeného tepla a pracovní frekvence.

#### 3.1 Ztráty

Vodivostní ztráty na diodových usměrňovačích významně přispívají k celkovým ztrátám výkonu napájecích zdrojů, a to zejména v aplikacích s nízkým výstupním napětím. Ztráty jsou úměrné součinu napětí a proudu v propustném směru. Při polarizaci diody v propustném směru je průběh proudu po překonání prahového napětí přibližně exponenciální. Na druhé straně, tranzistor MOSFET má voltampérovou charakteristiku lineární viz *Obr. 3.1.1*. [16]





Obr. 3.1.1 Graf porovnání ztrát na usměrňovacích prvcích [16]

Rozdíl výkonových ztrát na usměrňovacích prvcích je celkem veliký, při průchodu proudem 10 A je úbytek napětí na křemíkové diodě 970 mV, na Schottkyho diodě (MBR4060) činný úbytek napětí 450 mV a na tranzistoru MOSFET (IRF3205) je úbytek pouhých 70 mV. Toto porovnání bylo měřeno v propustném směru (plně otevřený tranzistor) a je znázorněno na Obr. 3.1.1. [17, s. 11]



Obr. 3.1.2 Graf porovnání ztrát na usměrňovacích prvcích [17, s. 11]

Ztráta na Schottkyho diodovém usměrňovači se vypočte jako:

$$P_{SD} = V_{SD} \cdot I_0 \quad (3.1.1)$$

Na synchronním usměrňovači vznikají 3 typy ztrát:

- Ztráty vodivostní  $P_{COND}$
- Ztráty spínací  $P_{SW}$
- Ztráty vznikající vlivem parazitních kapacit  $P_{CAP}$

Celkové vodivostní ztráty synchronního usměrňovače jsou především tvořeny úbytkem napětí na tranzistoru a ochranné diodě *DSR*. Pro celkové vodivostní ztráty platí následující vztah [16]:

$$P_{COND} = R_{DS(on)} \cdot \left[ \frac{I_{out}^2}{1-D} + \frac{\Delta I_{SEC}^2 (1-D)}{12} \right] + U_D \cdot I_{OD} \cdot (t_{D(on)} + t_{D(off)}) \cdot f \quad (3.1.2)$$

kde,  $I_{out}$  je výstupní proud,  $D = t_{on}/t_S$  je poměr mezi dobou sepnutí tranzistoru na primární straně transformátoru a periodou,  $\Delta I_{SEC}$  je rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou proudu  $I_{SEC}$ ,  $U_D$  úbytek napětí na ochranné diodě,  $I_{OD}$  proud protékající ochrannou diodou,  $f$  pracovní kmitočet měniče.

Ztráty, které vznikají vlivem doby závěrného zotavení interní diody lze popsat vztahem [16]:

$$P_{SW} = Q_{rr} \left( U_{out} + \frac{U_{IN}}{n} \right) \cdot f \quad (3.1.3)$$

kde  $Q_{rr}$  je zotavovací náboj,  $U_{out}$  je velikost výstupního napětí,  $U_{IN}$  zde značí vstupní napětí blokujícího měniče,  $n$  je převodní poměr transformátoru.

Dalším typem výkonových ztrát vznikajícím v blokujícím měniči se synchronním usměrňovačem jsou ztráty způsobené tzv. parazitní rezonancí. Tento jev vzniká díky kapacitě kanálu a rozptylové indukčnosti transformátoru. Parazitní zákmity vznikají po ukončení činnosti synchronního usměrňovače v době, kdy je tranzistor na primární straně měniče sepnut, tj. doba  $T_{ON}$ . Zánik tohoto nežádoucího jevu nastane ve chvíli, kdy je synchronní usměrňovač aktivní, tj. doba  $T_{SR}$ . Ztráty vznikající výše zmíněným jevem lze popsat pomocí vztahu [16]:

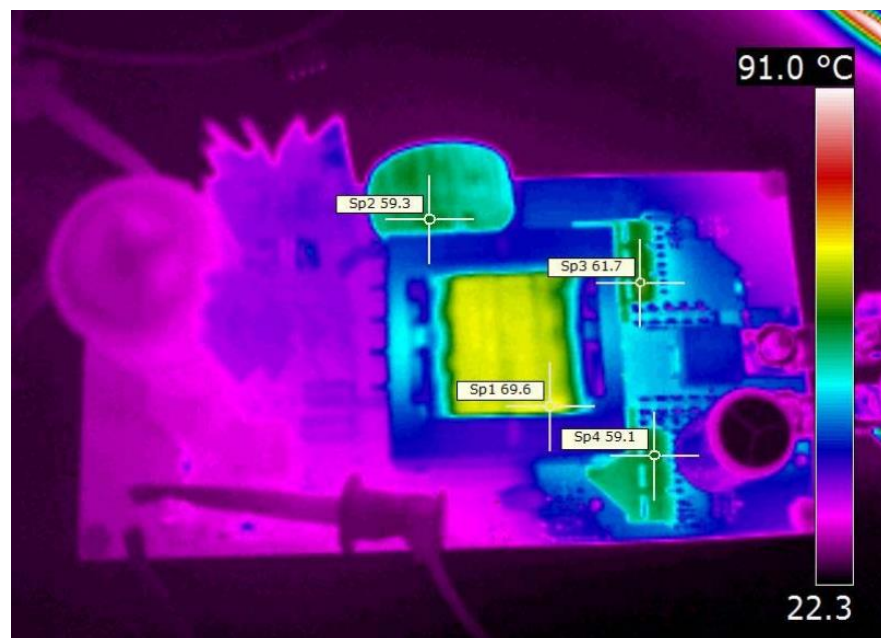
$$P_{CAP} = \frac{1}{2} C_{DS} \cdot \left( U_o + \frac{U_{IN}}{n} \right)^2 \cdot f \quad (3.1.4)$$

$C_{DS}$  je kapacita mezi elektrodami Drain a Source.

Při porovnání účinnosti dvou zdrojů febfan6756mr\_t03u065a, který má usměrňovač se Schottkyho diodami a zdroje febfan6754wamr\_cp450v1, který má synchronní usměrňovač, má větší účinnost při plném zatížení a maximálním vstupním napětí zdroj febfan6754wamr\_cp450v1. Při minimálním zatížení a maximálním vstupním napětí naopak zdroj febfan6756mr\_t03u065a. Oba zdroje mají podobnou účinnost, která se pohybuje okolo 88 %. [18]

### 3.2 Zahřívání

Ztrátový výkon na usměrňovači je převeden na teplo, které je třeba odvést pryč. U malých ztrátových výkonů postačí pasivní chlazení. U velkých ztrátových výkonů je třeba přidat i aktivní chlazení. Velikost chladiče je přímo úměrná ztrátovému výkonu. S rostoucí velikostí stoupá i pořizovací cena. Při aktivním chlazení dochází k dalšímu úbytku účinnosti zdroje, protože musíme započítat spotřebu ventilátoru. Aktivní chlazení není vždy možné použít, proto musíme volit usměrňovač s co nejmenšími ztrátami.



Obr. 1.3.1 Teplotní snímek zdroje PMP5967 [13]

Na Obr. 3.2.1 je teplotní snímek plně zatíženého zdroje PMP5967. Při pořízení tohoto snímku byla okolní teplota 25 °C, vstupní stejnosměrné napětí bylo 380V. Rychlost proudění byla 988,5 l/min. Měřený bod Sp1 znázorňuje teplotu na transformátoru, bod Sp2 znázorňuje

teplotu cívky na primární straně měniče. Body Sp3 a Sp4 ukazují teplotu na tranzistorech MOSFET synchronního usměrňovače. Zde je vidět, že největší ztráta je na transformátoru.

### 3.3 Frekvence

U Schottkyho diod má rostoucí frekvence menší vliv než u synchronních usměrňovačů. Synchronní usměrňovače jsou navíc omezeny maximální frekvencí řídicích obvodů, která se pohybuje maximálně do 600 kHz. Rostoucí frekvence zvyšuje ztráty, protože je třeba neustále přebíjet vstupní kapacitu tranzistorů mezi Gate a Source. Frekvenčním omezením Schottkyho diody je kapacita přechodu v závěrném směru, například u diody S50D40C je tato kapacita 1 nF při 5 V.[19]

### 3.4 Rozměry

Rozměry zapojení jsou větší u synchronních usměrňovačů z důvodu většího počtu součástek. K rozměrům celého usměrňovače je nutno započítat chladič, zde už není jednoznačné, který z usměrňovačů má menší rozměry. V tomto ohledu vše závisí na přenášeném výkonu, u malých výkonů je výhodnější usměrňovač složený ze Schottkyho diod. Naopak u velkých výkonů, především u vysokých proudů je výhodnější synchronní usměrňovač, protože u něj nedochází k tak velkým ztrátám, proto není potřeba tolik chladit. U Schottkyho diod bychom museli navíc použít ventilátor, o který se zvětší celkové rozměry. Do rozměrů je nutno započítat i prostor pro proudění vzduchu.

### 3.5 Složitost zapojení

Složitost zapojení je prokazatelně vyšší u synchronních usměrňovačů, oproti jedné, maximálně dvěma součástkám je zde zapotřebí více součástek, například u synchronního usměrňovače řízeného obvodem SRK2000 je jich zapotřebí 12. S počtem součástek roste i složitost zapojení. Navíc je nutné dodržet veškeré specifikace pro jednotlivé součástky. To

zabere mnohonásobně více času při návrhu. Synchronní usměrňovač se proto využívá především u aplikací s vyšším výkonem, kde je lepší návratnost vynaložených zdrojů.

### **3.6 Cena**

Cena základního zapojení je vyšší u synchronních usměrňovačů, protože jen samotné řídicí jednotky se pohybují v ceně od 50 Kč, k tomu je zapotřebí připočítat cenu tranzistorů a cenu ostatních součástí. Na výsledné ceně se negativně projeví i vyšší cena návrhu.

## 4 Řídící obvody synchronních usměrňovačů

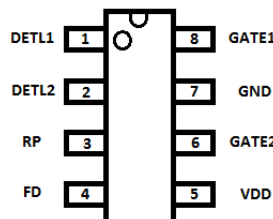
### 4.1 Typy řídicích obvodů

#### 4.1.1 FAN6208

FAN6208 je řídicí obvod dvoucestného synchronního usměrňovače od firmy Fairchild Semiconductor pro dvojitý LLC rezonanční měnič. Je schopen řídit dva tranzistory a tím emulovat chování diodového usměrňovače. Měřením napětí  $U_{DS}$  na jednotlivých tranzistorech při každém spínacím cyklu je určováno optimální spínání usměrňovacích tranzistorů. Díky zpětné vazbě je možné řídit délku sepnutí tranzistorů při přechodových jevech, aby se zabránilo sepnutí obou tranzistorů ve stejnou dobu. Pomocí přepnutí do úsporného režimu (Green-Mode) lze snížit spotřebu, protože v tomto modu nejsou spínány usměrňovací tranzistory. Podmínkou pro tento mód je nezatížení zdroje.[20]

Tab. 4.1.1.1 Základní údaje obvodu FAN6208 [20]

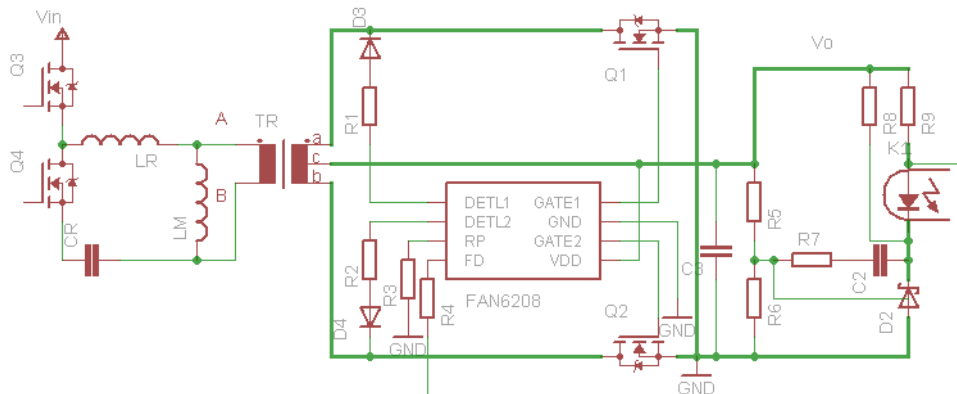
FAN6208	Min	Typ	Max
$U_{CC}$ [V]	8,8	-	28
$U_{inTH}$ [V]	1,7	2,0	2,3
$U_{out}$ [V]	10	12	14
$I_{outtris}$ [A]	-	0,1	-
$I_{outfal}$ [A]	-	0,1	-
$f$ [kHz]	50	-	240
$P_d$ [mW]	350	-	1000
$t_{ris}$ [μs]	30	70	120
$t_{fal}$ [μs]	30	50	70



Obr. 4.1.1.1 Konfigurace vývodů řídicího obvodu FAN6208 [20]

Tab. 4.1.2.2 Popis vývodů obvodu FAN6208 [20]

Pin	Jméno	Popis
1	DETL1	Detekce záporného napětí $U_{DS}$ tranzistoru 1
2	DETL2	Detekce záporného napětí $U_{DS}$ tranzistoru 2
3	RP	Pin pro nastavení času vypnutí pomocí rezistoru
4	FD	Zpětná vazba pro ochranu proti zkratu
5	VDD	Napájení
6	GATE2	Výstup pro řízení tranzistoru 2
7	GND	Zem
8	GATE1	Výstup pro řízení tranzistoru 1



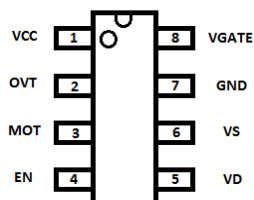
Obr. 4.1.1.2 Typické zapojení řídicího obvodu FAN6208 [20]

#### 4.1.2 IR11672ASPBF

Řídicí obvod IR11672ASPBF od firmy International Rectifier je navržen pro jednocestné synchronní usměrňovače v zapojení pro blokující měnič a rezonanční dvojčinný měnič. Tímto obvodem lze ovládat jeden nebo více paralelně uspořádaných MOSFET tranzistorů s kanálem typu N. Obvodem je měřeno napětí  $U_{DS}$  pro určení správného spínání tranzistoru. IR11672ASPBF obsahuje ochranný obvod pro zamezení průchodu proudu závěrným směrem, který zajistí vypnutí tranzistoru. [21]

Tab. 4.1.2.1 Základní údaje obvodu IR11672ASPBF [21]

<b>IR11672ASPBF</b>	<i>Min</i>	<i>Typ</i>	<i>Max</i>
$U_{CC}$ [V]	11,4	-	18
$U_{inTH}$ [mv]	50	-	150
$U_{out}$ [V]	9	10,7	12,5
$I_{outris}$ [A]	-	2	-
$I_{outfal}$ [A]	-	7	-
$f$ [kHz]	-	-	500
$P_d$ [mW]	-	970	-
$t_{ris}$ [ns]	18	-	125
$t_{fal}$ [ns]	10	-	30

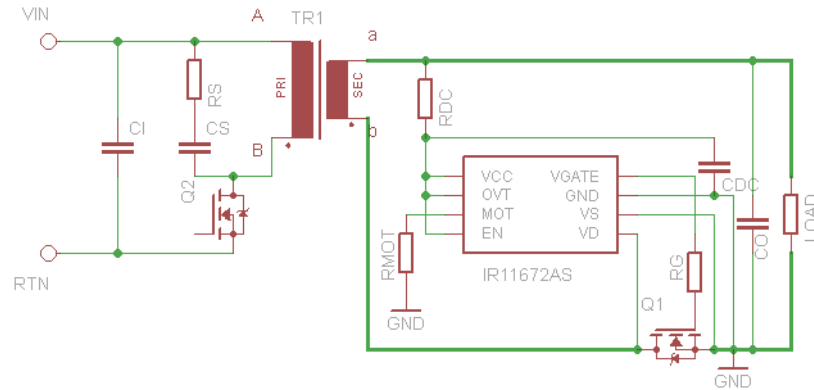


Obr. 4.1.2.1 Konfigurace vývodů řídicího obvodu IR11672ASPBF [21]

Tab. 4.1.1.2 Popis vývodů obvodu IR11672ASPBF [21]

<i>Pin</i>	<i>Jméno</i>	<i>Popis</i>
1	VCC	Napájení
2	OVT	Nastavení napěťového offsetu
3	MOT	Nastavení minimálního času sepnutí tranzistoru
4	EN	Povolení provozu
5	VD	Snímání napětí na Drain tranzistoru
6	VS	Snímání napětí na Source tranzistoru
7	GND	Zem
8	VGATE	Výstup pro řízení tranzistoru





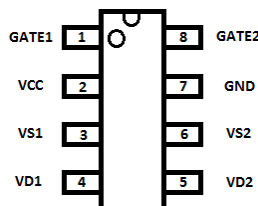
Obr. 4.1.2.2 Typické zapojení řídicího obvodu IR11672ASPF [21]

### 4.1.3 IR11682SPBF

Oproti předchozímu je určen řídicí obvod IR11682SPBF pro řízení dvoucestného usměrňovače pro rezonanční dvojčinný měnič. Obvod má ochranu proti sepnutí tranzistorů ve stejnou dobu. Ochranný obvod obsažený v IR11682SPBF zamezuje průchodu závěrným směrem skrz tranzistor. [22]

Tab. 4.1.3.1 Základní údaje obvodu IR11682S [22]

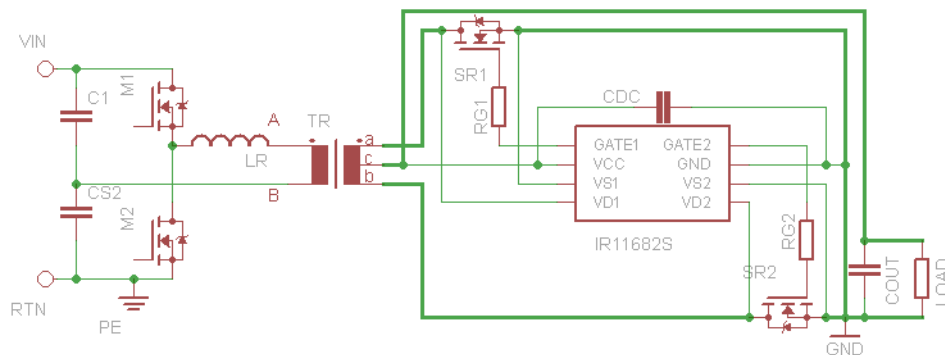
<b>IR11682S</b>	<i>Min</i>	<i>Typ</i>	<i>Max</i>
$U_{CC}$ [V]	8,6	-	18
$U_{inTH}$ [mV]	80	140	220
$U_{out}$ [V]	8,5	10,7	13,5
$I_{out}$ [A]	-	1	-
$I_{out}$ [A]	-	4	-
$f$ [kHz]	-	-	400
$P_d$ [mW]	-	970	-
$t_{ris}$ [ns]	10	-	80
$t_{fal}$ [ns]	5	-	25



Obr. 4.1.3.1 Konfigurace vývodů řídicího obvodu IR11682S [22]

Tab. 4 .1.3.2 Popis vývodů obvodu IR11682S [22]

Pin	Jméno	Popis
1	GATE1	Výstup pro řízení tranzistoru 2
2	VCC	Napájení
3	VS1	Snímání napětí na Source tranzistoru 1
4	VD1	Snímání napětí na Drain tranzistoru 1
5	VD2	Snímání napětí na Drain tranzistoru 2
6	VS2	Snímání napětí na Source tranzistoru 2
7	GND	Zem
8	GATE2	Výstup pro řízení tranzistoru 2



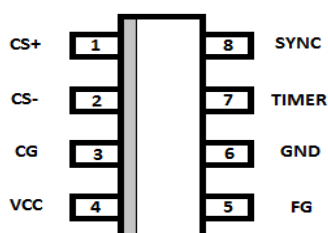
Obr. 4.1.3.2 Typické zapojení řídicího obvodu IR11682S [22]

#### 4.1.4 LTC3900

LTC3900 je řídicí obvod pro řízení jednocestného synchronního usměrňovače pro propustný měnič. Tento řídicí obvod pochází od firmy Linear Technology. Řízení spínání je zde odvozeno od synchronizačních pulzů od řídicího obvodu primární strany zdroje. Snímání napětí  $U_{DS}$  se využívá pro řízení vypnutí tranzistoru. Ochranné obvody v LTC3900 zablokují spínání tranzistorů, když chybí synchronizační signál nebo je příliš nízké napájecí napětí. [23]

Tab. 4.1.4.1 Základní údaje obvodu LTC3900 [23]

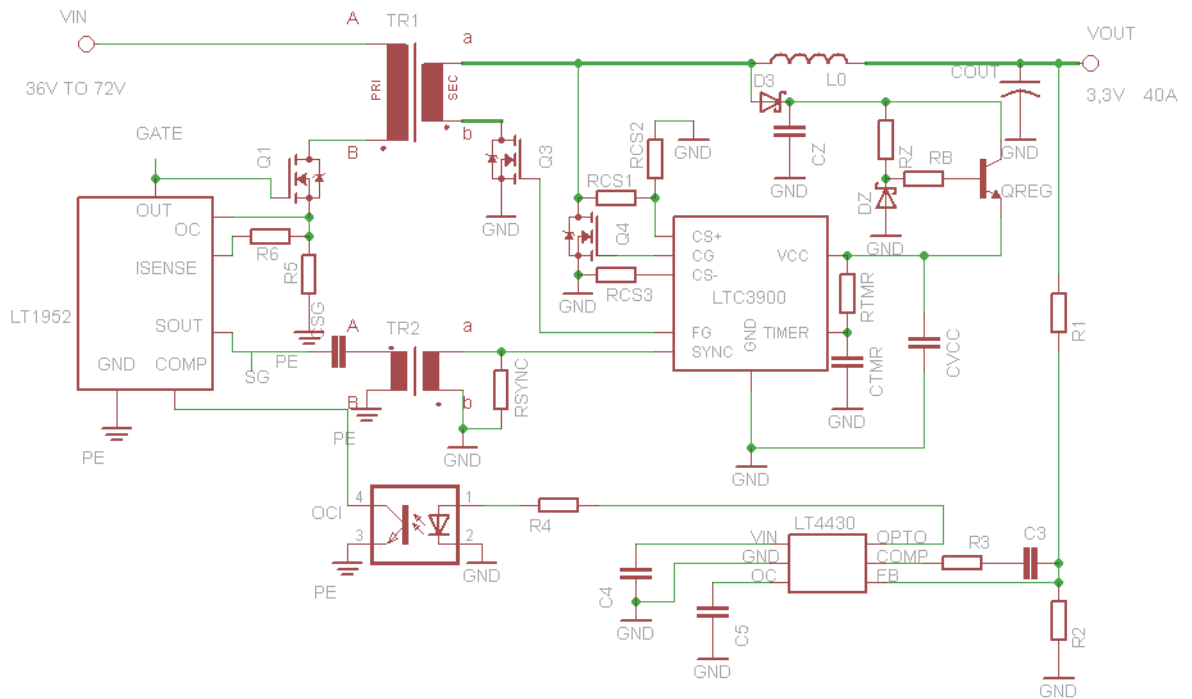
LTC3900	Min	Typ	Max
$U_{CC}$ [V]	4,5	5	11
$U_{inTH}$ [mv]	7,5	10,5	13,5
$I_{out1}$ [A]	-	2	-
$I_{out2}$ [A]	-	2	-
$f$ [kHz]	-	-	100
$t_{ris}$ [ns]	-	15	-
$t_{fal}$ [ns]	-	15	-



Obr. 4.1.4.1 Konfigurace vývodů řídicího obvodu LTC3900 [23]

Tab. 4.1.4.2 Popis vývodů obvodu LTC3900 [23]

Pin	Jméno	Popis
1	CS+	Snímání napětí na Drain tranzistoru
2	CS-	Snímání napětí na Source tranzistoru
3	CG	Výstup pro řízení tranzistoru 2
4	VCC	Napájení
5	FG	Výstup pro řízení tranzistoru 1
6	GND	Zem
7	TIMER	Nastavení spínací frekvence
8	SYNC	Synchronizační vstup



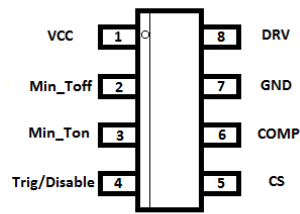
Obr. 4.1.4.2 Typické zapojení řídicího obvodu LTC3900 [23]

#### 4.1.5 NCP4304A

NCP4304A od firmy ON Semiconductor složí jako ovládací prvek pro jednocestný synchronní usměrňovač pro topologii blokující měnič a dvojčinný LLC rezonanční měnič. Externími součástkami lze nastavit spínací časy a tím omezit rušení vyvolané nedokonalým návrhem PCB nebo dalšími parazitními prvky. Díky tomu je zvýšena spolehlivost a odolnost proti rušení. Díky schopnosti obvodu dodat velký řídicí proud a parazitní indukčnost kompenzačního systému lze dosáhnout extrémně nízkého zpoždění vypnutí tranzistoru a tím zvýšení účinnosti. [24]

Tab. 4.1.5.1 Základní údaje obvodu NCP4304A [24]

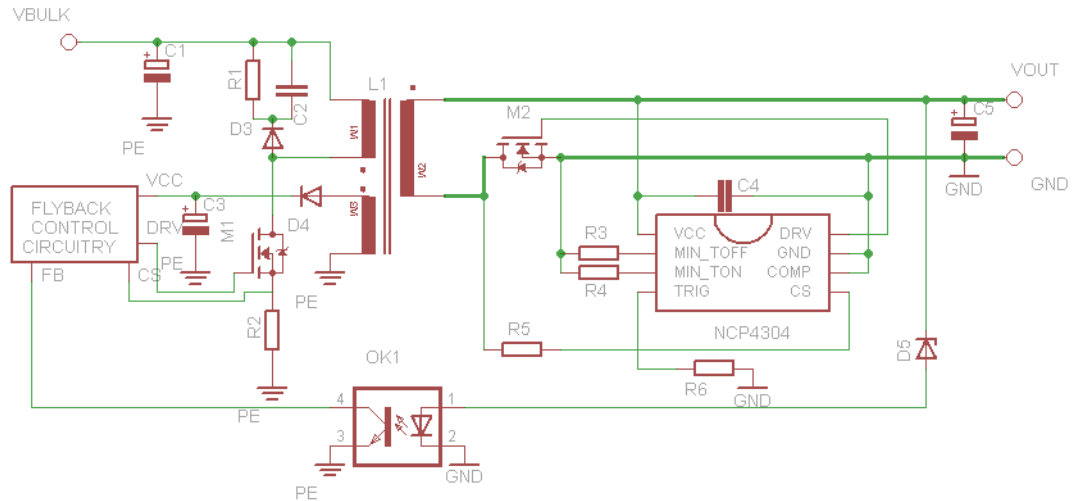
NCP4304A	Min	Typ	Max
$U_{CC}$ [V]	8,9	-	30
$U_{inTH}$ [mV]	50	85	120
$U_{out}$ [V]	10	12	14,3
$I_{outris}$ [A]	-	2,5	-
$I_{outfal}$ [A]	-	5	-
$f$ [kHz]	-	-	500
$P_d$ [mW]	-	-	800
$t_{ris}$ [ns]	-	120	-
$t_{fal}$ [ns]	-	50	-



Obr. 4.1.5.1 Konfigurace vývodů řídicího obvodu NCP4304A [24]

Tab. 4.1.5.2 Popis vývodů obvodu NCP4304A [24]

Pin	Jméno	Popis
1	VCC	Napájení
2	Min_Toff	Pin pro nastavení minimální doby vypnutí
3	Min_Ton	Pin pro nastavení minimální doby zapnutí
4	Trig/Disable	Volba extra rychlého vypnutí tranzistoru
5	CS	Detekce průchodu nulou
6	COMP	Kompenzace parazitní indukčnosti
7	GND	Zem
8	DRV	Výstup pro řízení tranzistoru



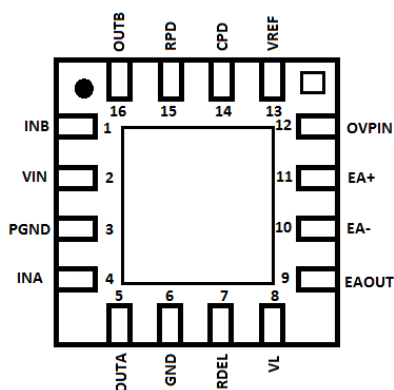
Obr. 4.1.5.2 Typické zapojení řídicího obvodu NCP4304A [24]

#### 4.1.6 SiP11203

Pro dvojitý měnič lze použít i SiP11203 od firmy Vishay Siliconix, který v tomto zdroji zastoupí funkci řídicího obvodu pro dvoucestný usměrňovač. Obvod je napájen pomocí pomocného transformátoru, který slouží i pro přenos synchronizačních pulzů. Při náběhu napájení je u SiP11203 pozdrženo řízení tranzistorů do doby, než bude napájecí napětí dostatečné pro správnou funkci celého synchronního usměrňovače. [25]

Tab. 4.1.6.1 Základní údaje obvodu SiP11203 [25]

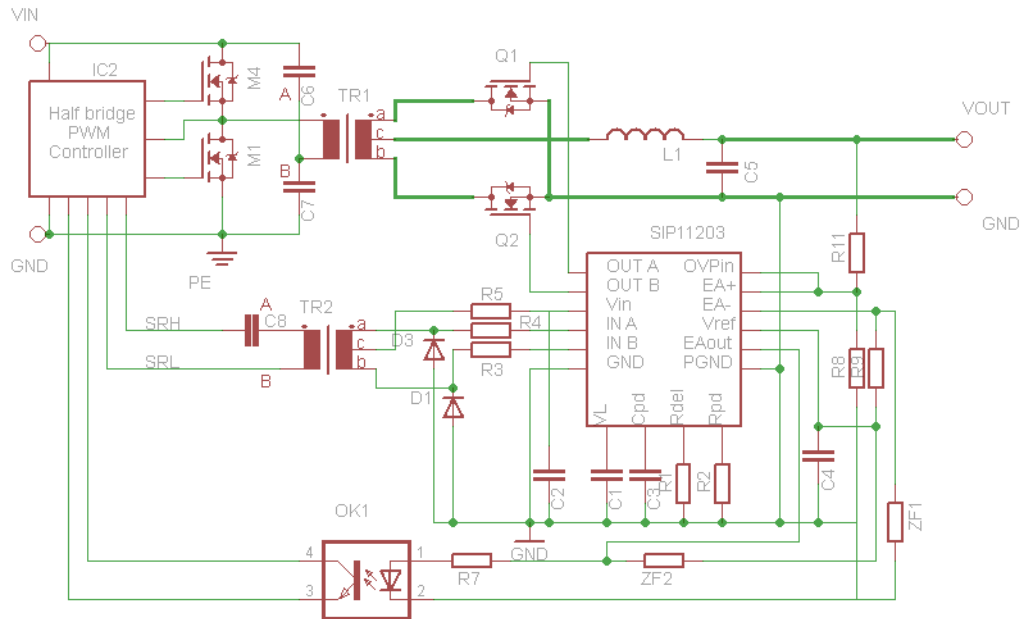
SiP11203	Min	Typ	Max
$U_{CC}$ [V]	5,5	-	13
$U_{inTH}$ [V]	-	2,5	-
$U_{out}$ [V]	4,75	5	5,25
$I_{outis}$ [A]	-	2,2	-
$I_{outfal}$ [A]	-	4	-
$f$ [kHz]	100	-	500
$P_d$ [mW]	-	-	745
$t_{ris}$ [ns]	-	42	-
$t_{fal}$ [ns]	-	32	-



Obr. 4.1.6.1 Konfigurace vývodů řídicího obvodu SiP11203 [25]

Tab. 4.1.6.2 Popis vývodů obvodu SiP11203 [25]

Pin	Jméno	Popis
1	INB	Logický vstup pro řízení tranzistoru 2
2	VIN	Vstupní napájecí napětí
3	PGND	Zem pro napájení
4	INA	Logický vstup pro řízení tranzistoru 1
5	OUTA	Výstup pro řízení tranzistoru 1
6	GND	Analogová zem
7	RDEL	Vstup pro nastavení zpoždění náběžné hrany na výstupu
8	VL	Pětivoltové napájecí napětí vnitřních obvodů
9	EAOUT	Signalizace chyby výstupního zesilovače
10	EA-	Invertující vstup chybového zesilovače
11	EA+	Neinvertující vstup chybového zesilovače
12	OVPIN	Detekce překročení napětí 1,47V
13	VREF	Referenční napětí
14	CPD	Pin pro připojení kondenzátoru pro nastavení času detekce poklesu napětí
15	RPD	Pin pro připojení rezistoru pro nastavení času detekce poklesu napětí
16	OUTB	Výstup pro řízení tranzistoru 2



Obr. 4.1.6.2 Typické zapojení řídicího obvodu SiP11203 [25]

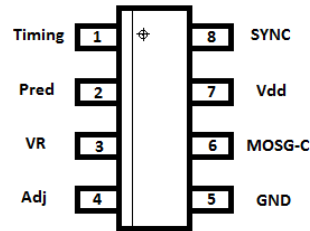
#### 4.1.7 SP6018

SP6018 je řídicí obvod pro jednocestný usměrňovač od firmy SYNC Power Corporation. Tento obvod lze využít ve všech rezonančních měničích. Pro optimalizaci spínacího času využívá systém prediktivní algoritmus, který na základě údajů získaných z předchozího cyklu upraví spínací čas. To má za následek zvýšení účinnosti a zabránění současného sepnutí dvou tranzistorů ve dvou větvích. [26]

Tab. 4.1.7.1 Základní údaje obvodu SP6018 [26]

SP6018	Min	Typ	Max
$U_{CC}$ [V]	9,4	-	16
$U_{inTH}$ [V]	3,5	3,9	-
$U_{out}$ [V]	10,5	11	-
$I_{outis}$ [A]	-	2	-
$I_{outfal}$ [A]	-	2	-
$f$ [kHz]	-	-	400
$P_d$ [mW]	-	-	250
$t_{ris}$ [ns]	-	10	25
$t_{fal}$ [ns]	-	10	25

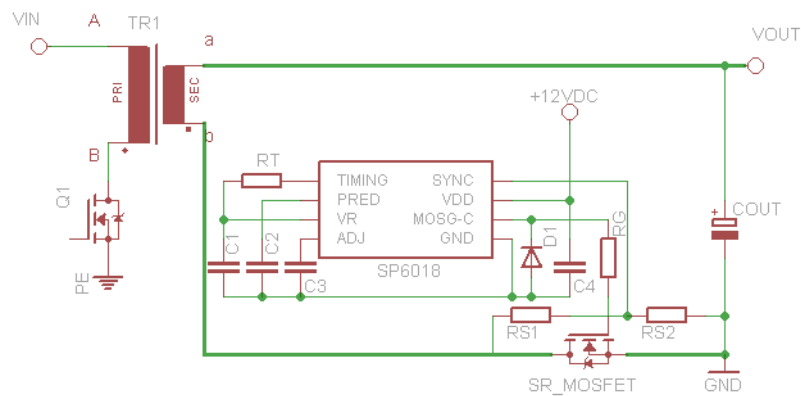




Obr. 4.1.7.1 Konfigurace vývodů řídicího obvodu SP6018 [26]

Tab. 4.1.7.2 Popis vývodů obvodu SP6018 [26]

Pin	Jméno	Popis
1	Timing	Nastavení časování
2	Pred	Zapamatování předchozího průběhu
3	VR	Napěťový regulátor
4	Adj	Nastavení spouštění
5	GND	Zem
6	MOSG-C	Výstup pro řízení tranzistoru
7	Vdd	Napájení
8	SYNC	Snímání napětí $U_{DS}$



Obr. 4.1.7.2 Typické zapojení řídicího obvodu SP6018 [26]

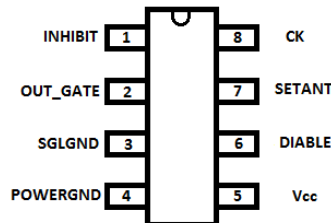
#### 4.1.8 STSR30

STSR30 od firmy STMicroelectronics je inteligentní řídicí obvod jednocestného usměrňovače pro blokující měnič. Poskytuje vysoké výstupní proudy a tím umožňuje řízení MOSFET tranzistorů při nízkém napětí. Pomocí měření napětí  $U_{DS}$  na tranzistoru jsou určeny spínací časy. Zabudovanými ochrannými obvody je zamezeno sepnutí závěrného proudu. Díky zabudovanému oscilátoru a výpočetní logice je zajištěna dvojitá kontrola spínacích časů a

nemůže tedy dojít k sepnutí opačného směru proudu. Při nezatíženém stavu dojde k vypnutí řízení a tím ke snížení ztrát. Také při vyhodnocení poruch je zablokováno řízení usměrňovače. [27]

Tab. 4 .1.8.1 Základní údaje obvodu STSR30 [27]

STSR30	Min	Typ	Max
$U_{CC}$ [V]	3,6	-	6
$U_{inTH}$ [V]	1	1,2	-
$U_{out}$ [V]	4,3	4,65	-
$I_{outtris}$ [A]	-	1,5	-
$I_{outfal}$ [A]	-	1,5	-
$f$ [kHz]	20	-	500
$P_d$ [mW]	-	-	275
$t_{ris}$ [ns]	-	40	-
$t_{fal}$ [ns]	-	40	-



Obr. 4.1.8.1 Konfigurace vývodů řídicího obvodu STSR30 [27]

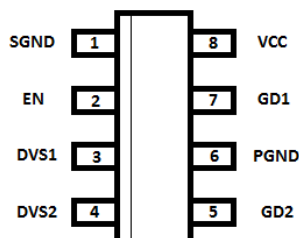
Tab. 4 .1.8.2 Popis vývodů obvodu STSR30 [27]

Pin	Jméno	Popis
1	INHIBIT	Hlídnání průchodu nulou
2	OUT_GATE	Výstup pro řízení tranzistoru
3	SGLGND	Signálová zem
4	PWRGND	Napájecí zem
5	VCC	Napájení
6	DISABLE	Vstup pro vypnutí řízení
7	SETANT	Nastavení času vypnutí
8	CK	Snímání napětí



Tab. 4.1.9.1 Základní údaje obvodu SRK2000A [28]

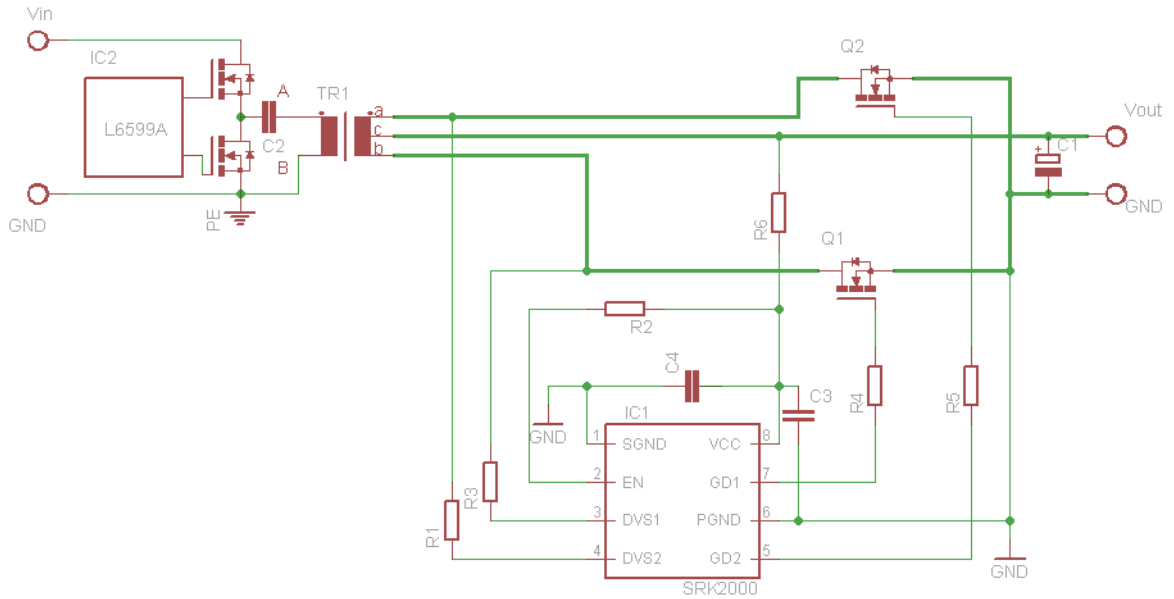
SRK2000A	Min	Typ	Max
$U_{CC}$ [V]	4,5	-	32
$U_{inTH}$ [mv]	180	200	250
$U_{out}$ [V]	4,75	-	11,9
$I_{outris}$ [A]	-	1	-
$I_{outfal}$ [A]	-	3,5	-
$f$ [kHz]	-	-	500
$P_d$ [mW]	-	-	650
$t_{ris}$ [ns]	-	40	-
$t_{fal}$ [ns]	-	18	-



Obr. 4.1.9.1 Konfigurace vývodů řídicího obvodu SRK2000A [28]

Tab. 4.1.9.2 Popis vývodů obvodu SRK2000A [28]

Pin	Jméno	Popis
1	SGND	Signálová zem
2	EN	Nastavení prahového napětí
3	DVS1	Snímání napětí $U_{DS}$ na tranzistoru 1
4	DVS1	Snímání napětí $U_{DS}$ na tranzistoru 2
5	GD2	Výstup pro řízení tranzistoru 2
6	PGND	Napájecí zem
7	GD1	Výstup pro řízení tranzistoru 1
8	VCC	Napájení



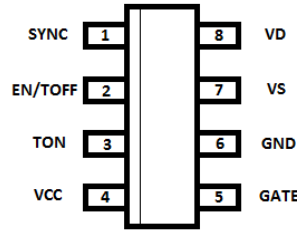
Obr. 4.1.9.2 Typické zapojení řídicího obvodu SRK2000A [28]

#### 4.1.10 UCC24610

Tento řídicí obvod od firmy Texas Instruments je určen pro řízení jednocestného usměrňovače pro blokující měnič a pro LLC rezonanční měnič. UCC24610 nabízí programovatelné spouštění spínání, programovatelný časovač automaticky přepne zařízení do režimu Light-Load Mode při malém zatížení zdroje a SYNC vstup pro volitelné vnější řízení spínání. Ochranné prvky zabráňují otevření tranzistorů při opačném směru proudu. [29]

Tab. 4.1.10.1 Základní údaje obvodu UCC24610 [29]

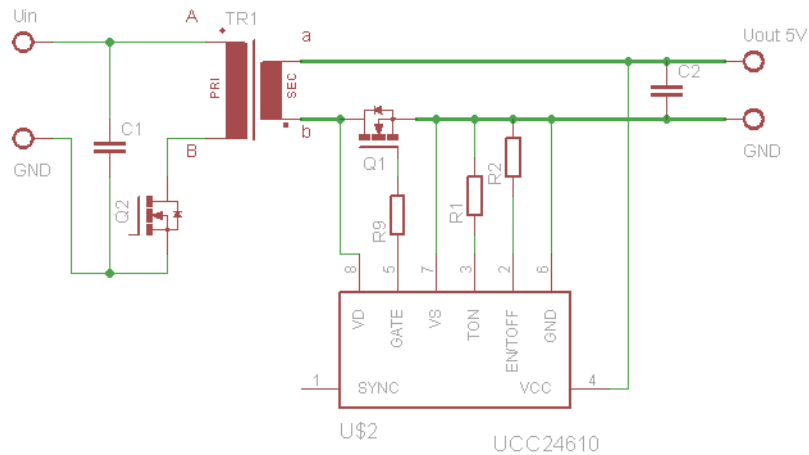
UCC24610	Min	Typ	Max
$U_{CC}$ [V]	4,5	-	5,5
$U_{inTH}$ [mV]	80	150	220
$U_{out}$ [V]	4,64	4,8	-
$I_{outtris}$ [A]	-	3	-
$I_{outfal}$ [A]	-	3	-
$f$ [kHz]	20	-	600
$P_d$ [mW]	-	-	650
$t_{ris}$ [ns]	-	14	30
$t_{fal}$ [ns]	-	9	25



Obr. 4.1.10.1 Konfigurace vývodů řídicího obvodu UCC24610 [29]

Tab. 4.1.9.2 Popis vývodů obvodu UCC24610 [29]

Pin	Jméno	Popis
1	SYNC	Synchronizační vstup
2	EN/TOFF	Povolení řízení a nastavení minimálního času vypnutí
3	TON	Nastavení minimálního času sepnutí
4	VCC	Napájení
5	GATE	Výstup pro řízení tranzistoru
6	GND	Zem
7	VS	Snímání napětí na Source tranzistoru
8	VD	Snímání napětí na Drain tranzistoru



Obr. 4.1.10.2 Typické zapojení řídicího obvodu UCC24610 [29]

## 4.2 Porovnání řídicích obvodů

Všechny tyto porovnávané řídicí obvody mají podobné parametry. Je nutné rozdělit obvody do dvou skupin, podle toho, zdali jde o řídicí obvody pro jednocestné nebo dvoucestné usměrňovače. Řídicí obvody pro jednocestné usměrňovače lze použít i v zapojení pro dvoucestné usměrňovače, jen budeme muset zapojit do každé větve jeden, není zde však zaručeno, že nesejnou oba tranzistory najednou, jelikož zde není žádná komunikace mezi

obvody. Obvod LTC3900 má řízení založené na získávání informací z primární strany zdroje přes pulzní transformátor, proto by i tento transformátor by musel být s vyvedeným středem. Díky tomu výrazně vzroste náročnost implementace, počet součástek a cena.

#### 4.2.1 Obvody pro jednocestné usměrňovače

Z obvodů pro jednocestné usměrňovače má nejnáročnější implementaci obvod LTC3900, protože ke své správné funkci potřebuje pro řízení navíc pulzní transformátor. I celkový počet součástek je pro tento obvod nevyšší. Naopak nejmenší počet součástek potřebuje pro svou správnou funkci obvod UCC24610. Druhý obvod s nejnižším počtem součástek je IR11672ASPBF a třetí je NCP4304. STSR30 a SP6018 jsou na tom podobně.

Další rozdělení lze provést podle napájecího napětí na pětivoltové a to jsou LTC3900, STSR30 a UCC24610. Ostatní tři jsou optimalizovány na napájecí napětí  $U_{CC} = 12$  V. Obvod NCP4304 lze připojit na  $U_{CC}$  až 30 V. Nejmenší rozhodovací úroveň napětí má obvod LTC3900 a to  $U_{in TH} = 10,5$  mV. Nejhůře je na tom obvod SP6018, který má  $U_{in TH} = 3,9$  V. Maximální spínací frekvence se u všech uvedených pohybuje okolo 500 kHz, kromě obvodu LTC3900, který má uvedenou maximální spínací frekvenci 100 kHz. Nejlépe je na tom obvod UCC24610, který má maximální spínací frekvenci 600 kHz. Vliv na účinnost celého synchronního usměrňovače má v neposlední řadě i ztrátový výkon řídicích obvodů. Nejmenší ztrátový výkon má obvod SP6018  $P_d = 250$  mW. Největší ztrátový výkon  $P_d = 970$  mW je uveden u IR1167ASPBF.

Jedním z nejdůležitějších parametrů je maximální výstupní napětí pro řízení MOSFET tranzistorů. Z obvodů, které jsou napájeny 5 V, je schopen mít na výstupu nevyšší napětí obvod UCC24610  $U_{out} = 4,8$  V (obvod LTC3900 nemá toto napětí uvedeno). Z ostatních má nejvyšší  $U_{out}$  NCP4304 s hodnotou  $U_{out} = 12$  V. Pro rychlé otevření tranzistorů je důležitým parametrem proud do řídicí elektrody (je potřeba nabít kapacitu na vstupu). Největší dodávaný proud do řídicí elektrody má UCC24610  $I_{outtris} = 3$  A. Naopak nejmenší má obvod STSR30  $I_{outtris} = 1,5$  A. Odebíraný proud z řídicí elektrody bývá obvykle větší, u IR1167ASPBF je tato hodnota  $I_{outfal} = 7$  A. Nejmenším odebíraným proudem disponuje obvod STSR30  $I_{outfal} = 1,5$  A.

Tab. 4.2.1.1 Porovnání základních údajů

Obvod	LTC3900	STSR30	UCC24610	IR11672ASPBF	NCP4304A	SP6018
$U_{CC}$ [V]	4,5 - 11	3,6 - 6	4,5 - 5,5	11,4 - 18	8,9 - 30	9,4 - 16
$U_{inTH}$ [mV]	10,5	1200	150	100	85	3900
$U_{out}$ [V]	-	4,65	4,8	10,7	12	11
$I_{outtris}$ [A]	2	1,5	3	2	2,5	2
$I_{outfal}$ [A]	2	1,5	3	7	5	2
$f$ [kHz]	do 100	20 - 500	20 - 600	do 500	do 500	do 400
$P_d$ [mW]	-	275	650	970	800	250
$t_{ris}$ [ns]	15	40	14	18 - 125	120	10
$t_{fal}$ [ns]	60	40	9	10 - 30	50	10

#### 4.2.2 Obvody pro dvoucestné usměrňovače

U dvoucestných usměrňovačů je složitost zapojení vyšší z důvodu většího počtu větví. Nejnáročnější implementací disponuje obvod SiP11203, což je dáno nejen nutností dalšího transformátoru pro synchronizaci, ale i počtem vývodů pouzdra, který je dvojnásobný oproti ostatním obvodům. Oproti tomu nejjednodušší implementaci má obvod SRK2000A a obvod IR11682SPBF. Středně složitou implementaci má obvod FAN6208.

Největší rozsah napájecího napětí  $U_{CC}$  má SRK2000A od 4,5 V do 32 V. Naopak nejmenší rozsah napájecího napětí má obvod SiP11203 od 5,5 V do 13 V. Druhý nejmenší rozsah napájecího napětí má IR11682SPBF od 8,6 V do 18 V. Druhý největší rozsah má obvod FAN6208 od 8,8 V do 28 V. Nejmenší rozhodovací úroveň napětí má obvod IR11682SPBF a to  $U_{in TH} = 140$  mV. Nejhůře je na tom obvod SiP11203, který má  $U_{in TH} = 2,8$  V. Maximální spínací frekvence se u všech uvedených pohybuje okolo 500 kHz, kromě obvodu FAN6208, který má uvedenou maximální spínací frekvenci 240 kHz. Obvod FAN6208 má největší ztrátový výkon 1W. Naproti tomu obvod SRK2000 má ztrátový výkon 650 mW.

Výstupní řídicí napětí je největší u obvodu FAN6208, kde dosahuje typicky 12 V. Nejmenší je u obvodu SiP11203 z důvodu nižšího napájecího napětí, typická hodnota tohoto



napětí je 5 V. U obvodu FAN6208 je uveden nejmenší výstupní řídicí proud, který je stejný pro oba směry  $I_{\text{outtris}} = I_{\text{outfal}} = 0,1$  A. V tomto ohledu je na tom nejlépe obvod SiP11203, který je schopen dodat proud  $I_{\text{outtris}} = 2,2$  A a odebrat  $I_{\text{outfal}} = 4$  A.

**Tab. 4 .2.2.1 Porovnání základních údajů**

Obvod	FAN6208	IR11682SPBF	SiP11203	SRK2000A
$U_{CC}$ [V]	8,8 - 28	8,6 - 18	5,5 - 13	4,5 - 32
$U_{inTH}$ [mV]	2000	140	2500	200
$U_{out}$ [V]	12	10,7	5	4,75 - 11,9
$I_{\text{outtris}}$ [A]	0,1	1	2,2	1
$I_{\text{outfal}}$ [A]	0,1	4	4	3,5
$f$ [kHz]	50 - 240	do 400	100 - 500	do 500
$P_d$ [mW]	350 - 1000	970	745	650
$t_{\text{ris}}$ [ns]	70	10 - 80	42	40
$t_{\text{fal}}$ [ns]	50	5 - 25	32	18

## 5 Návrh synchronního usměrňovače

Jako primární část zdroje jsem použil modifikovaný ATX zdroj EC Model:200X/250X. Tento zdroj disponuje transformátorem s vyvedeným středem. Výstupní napětí jsem zvolil 12V. Pro tuto konfiguraci je nejvhodnější obvod SRK2000. Z jednocestných jsem vybral obvod UCC24610, není sice úplně nejlepší, protože potřebuje stabilizaci napájecího napětí na 5V, ale pro svoji funkci potřebuje nejmenší počet součástek a zároveň je schopen pracovat i na nižším napětí. Další jeho předností je schopnost dodat velký proud do tranzistoru.

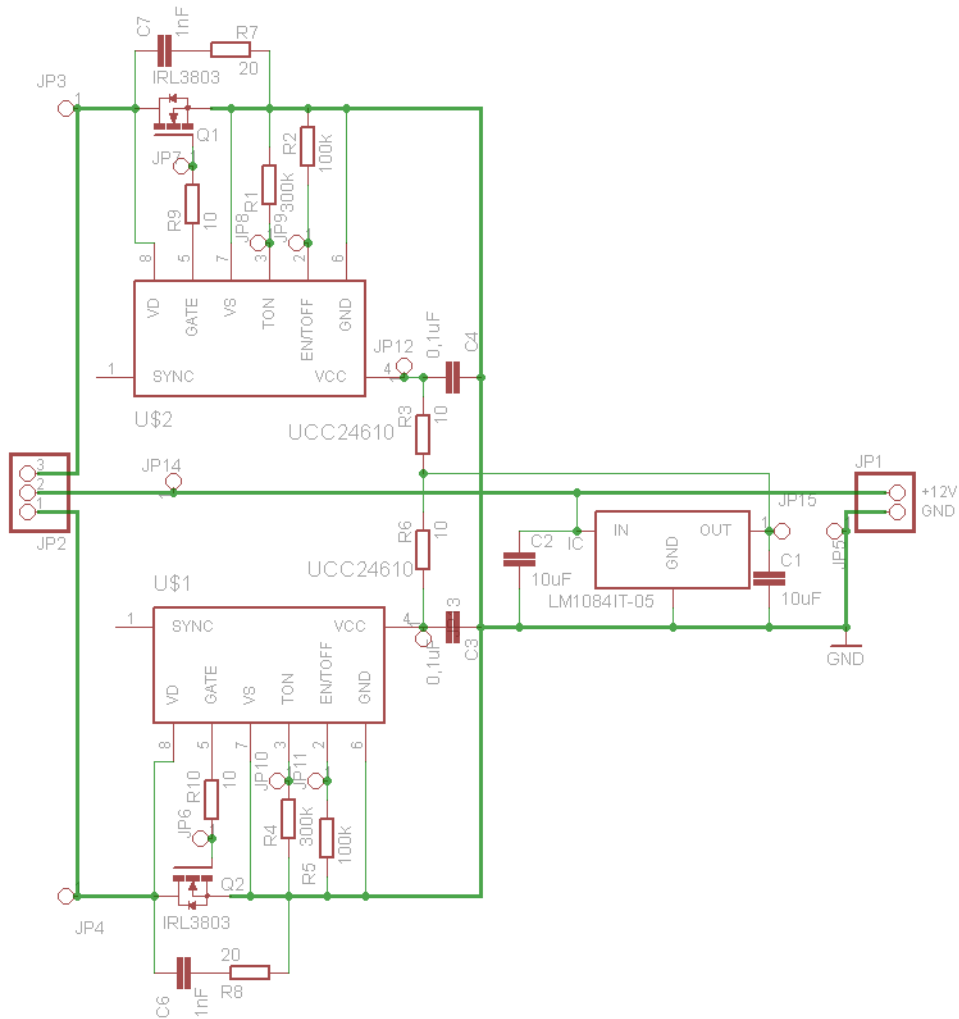
Aby bylo možné porovnávat řídicí obvody, rozhodl jsem se pro jeden typ tranzistoru. Tranzistor jsem volil tak, aby měl minimální odpor mezi Drain a Source v sepnutém stavu a aby měl co nejmenší kapacitu  $C_{GS}$ . Tranzistor IRL3803 splňuje oba tyto požadavky  $R_{DS(on)}=0,006\Omega$  a  $C_{GS}=5nF$ . [30]

### 5.1 UCC24610

Při návrhu jsem vycházel ze základního typického zapojení pro UCC24610 viz *Obr. 4.1.10.2*. Toto obvodové schéma jsem zdvojnásobil a zapojil do obou větví transformátoru. Protože je tento obvod potřeba napájet napětím 5V bylo nutné toto zapojení doplnit o stabilizátor napětí. Pro tento účel jsem zvolil obvod LM1084IT. Tento obvod by měl být schopen dodat dostatečný výkon pro oba řídicí obvody.

Při návrhu bylo potřeba nastavit kombinaci odporů a tím nastavit minimální čas sepnutí tranzistorů a minimální čas vypnutí tranzistorů, aby se zabránilo spínání vlivem parazitních výkyvů napětí. Minimální dobu sepnutí  $t_{ON}$  jsem nastavil dle vzorce 5.1.1 [29] na hodnotu 4,5  $\mu s$ , protože frekvence spínaného ATX zdroje je 41kHz. Minimální dobu vypnutí jsem nastavil na 7,80  $\mu s$  odporem  $R_2 = R_6 = 100k\Omega$ .

$$R_{TON} = \frac{TON[\mu s]}{15[\frac{\mu s}{M\Omega}]} = \frac{4,5}{15} = 0,3[M\Omega] \quad (5.1.1)$$



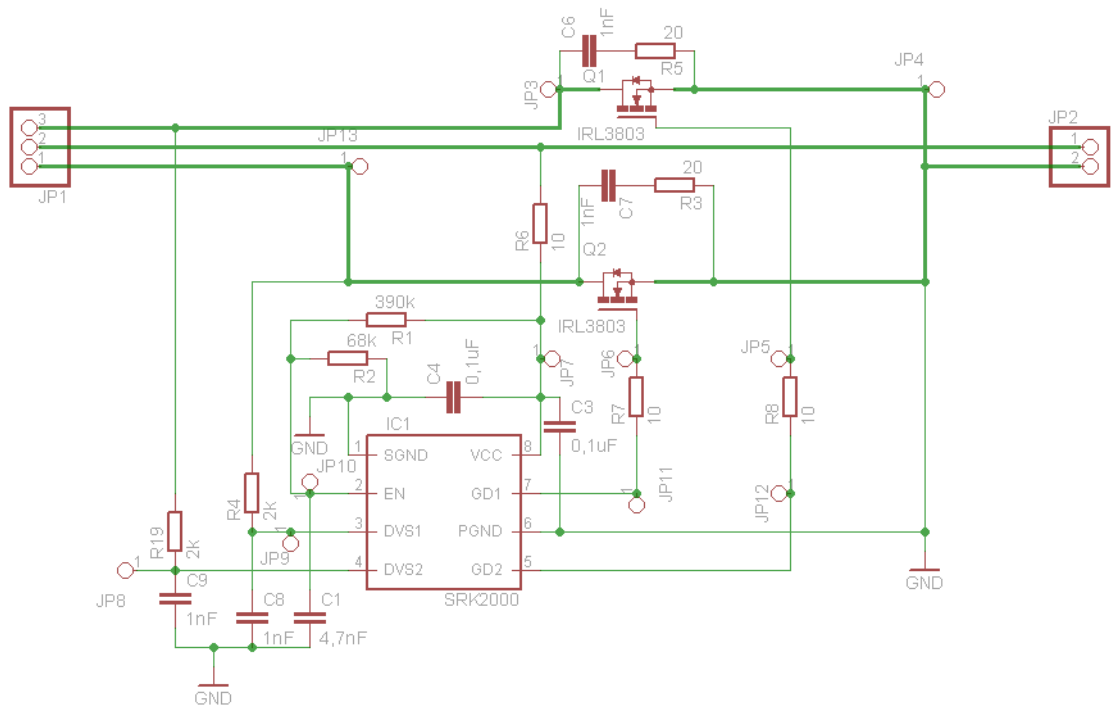
Obr. 5.1.1 Návrh synchronního usměrňovače s řídicím obvodem UCC24610

## 5.2 SRK2000

Při návrhu jsem vycházel ze základního typického zapojení pro SRK2000 viz Obr. 4.1.9.2. Pomocí napěťového děliče na pinu EN jsem nastavil  $U_{DVS1,2\_Off}$  na  $-25\text{mV}$ . Odpory jsem spočítal podle vzorce[29]:

$$R1 = \frac{V_{CC_{on}} - V_{EN} \frac{V_{CC\_G}}{V_{EN\_on}}}{I_{EN}} = \frac{4,75 - 0,31 * \frac{12}{1,8}}{7 * 10^{-6}} \doteq 390\text{k}\Omega \quad (5.2.1)$$

$$R2 = R1 \frac{V_{EN\_on}}{V_{CC\_G} - V_{EN\_on}} = 390000 * \frac{1,8}{12 - 1,8} \doteq 68\text{k}\Omega \quad (5.2.2)$$



Obr. 5.2.1 Návrh synchronního usměrňovače s řídicím obvodem SRK2000A

### 5.3 Měření účinnosti

Pro měření jsem použil spínaný zdroj s výstupním napětí 12V a výstupním proudem 10A. Vstupní napětí zdroje bylo 230V. Spínací frekvence byla 40Khz. Jedná se o zdroj ATX EC Model:200X/250X, ze kterého byla na sekundární straně ponechána jen 12-tivotlová část se zpětnou vazbou a Schottkyho diody byly nahrazeny přírady pro připojení mnou navržených obvodů.

Tab. 5.3.1 Naměřené hodnoty vstupních a výstupních napětí a proudů

$U_{IN}$	$I_{OUT}$	$I_{IN}$			$U_{OUT}$		
		F12C20	UCC24610	SRK2000	F12C20	UCC24610	SRK2000
230	0	53	63	72	12,03	12,03	12,03
230	0,5	80	96	101	11,98	11,98	11,98
230	1	105	123	127	11,93	11,93	11,93
230	1,5	130	140	142	11,88	11,87	11,88
230	2	155	155	163	11,83	11,83	11,83
230	2,5	180	171	184	11,78	11,78	11,78
230	3	207	194	205	11,73	11,73	11,73
230	3,5	233	223	229	11,68	11,69	11,68
230	4	260	249	256	11,63	11,63	11,63
230	4,5	288	274	280	11,58	11,58	11,58
230	5	320	308	309	11,54	11,54	11,55
230	5,5	351	335	340	11,48	11,48	11,48
230	6	384	372	372	11,43	11,43	11,43
230	6,5	411	399	400	11,39	11,39	11,40
230	7	444	432	437	11,34	11,34	11,34
230	7,5	478	469	475	11,28	11,28	11,27
230	8	505	498	504	11,24	11,24	11,23
230	8,5	539	535	539	11,18	11,18	11,15
230	9	575	570	579	11,12	11,12	11,08
230	9,5	606	609	615	11,08	11,08	11,05
230	10	650	645	674	11,03	11,03	11,00

Z naměřených hodnot jsem dopočítal příkon do zdroje a dodávaný výkon a z výkonů jsem dopočítal účinnost.

$$P_{IN} = U_{IN} * I_{IN} \quad (5.3.1)$$

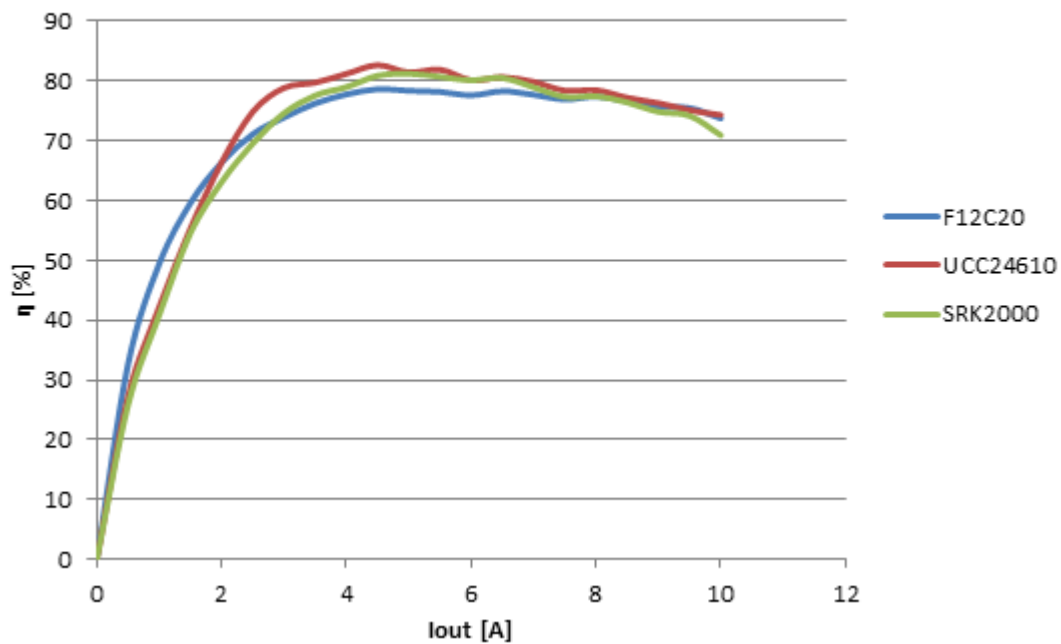
$$P_{OUT} = U_{OUT} * I_{OUT} \quad (5.3.2)$$

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} * 100 \quad (5.3.3)$$

Tab. 5 .3.2 Tabulka účinností

$P_{IN}$ [W]			$P_{OUT}$ [W]			$\eta$ [%]		
<i>F12C20</i>	<i>UCC24610</i>	<i>SRK2000</i>	<i>F12C20</i>	<i>UCC24610</i>	<i>SRK2000</i>	<i>F12C20</i>	<i>UCC24610</i>	<i>SRK2000</i>
12,19	11,49	16,56	0	0	0	0	0	0
18,40	22,08	23,23	5,99	5,99	5,99	32,55	27,13	25,79
24,15	28,29	23,21	11,93	11,93	11,93	49,40	42,17	40,84
29,90	32,2	32,66	17,82	17,81	17,82	59,60	55,30	54,56
35,65	35,65	37,49	23,66	23,66	23,66	66,37	66,36	63,11
41,40	39,33	42,32	29,45	29,45	29,45	71,14	74,88	69,59
47,61	44,62	47,15	35,19	35,19	35,19	73,91	78,86	74,63
53,59	51,29	52,67	40,88	40,92	40,88	76,28	79,77	77,62
59,8	57,27	58,88	46,52	46,52	46,52	77,79	81,23	79,01
66,24	63,02	64,40	52,11	52,11	52,11	78,67	82,69	80,92
73,6	70,84	71,07	57,70	57,70	57,75	78,40	81,45	81,26
80,73	77,05	78,20	63,14	63,14	63,14	78,21	81,95	80,74
88,32	85,56	85,56	68,58	68,58	68,58	77,65	80,15	80,15
94,53	91,77	92,00	74,04	74,04	74,10	78,32	80,67	80,54
102,12	99,36	100,51	79,38	79,38	79,38	77,73	79,89	78,98
109,94	107,87	109,25	84,60	84,60	84,53	76,95	78,43	77,37
116,15	114,54	115,92	89,92	89,92	89,84	77,42	78,51	77,50
123,97	123,05	123,97	95,03	95,03	94,78	76,66	77,23	76,45
132,25	131,10	133,17	100,08	100,08	99,72	75,68	76,34	74,88
139,38	140,07	141,45	105,08	105,26	104,98	75,52	75,15	74,21
149,5	148,35	155,02	110,30	110,30	110,00	73,78	74,35	70,96

## Účinnost usměrňovačů



Obr. 5.3.1 Porovnání účinností usměrňovačů

## Závěr

Cílem této práce bylo porovnat synchronní usměrňovače s usměrňovači se Schottkyho diodami. Problematika spočívá ve výhodnosti použití synchronních usměrňovačů. Zdali se vyplatí za cenu vyšší náročnosti implementace snížení ztrát na usměrňovači.

V teoretickém úvodu jsem objasnil principy usměrňování a základních typů usměrňovačů. V další kapitole jsem popsal několik aplikací synchronních usměrňovačů. Zaměřil jsem se na aplikace, kde se k řízení spínání tranzistorů používají řídicí obvody, protože při řízení tranzistorů pomocí zapojení s diskrétními součástkami není dosahováno takové účinnosti.

V následující kapitole jsem porovnával vhodnost použití synchronních usměrňovačů oproti usměrňovačům se Schottkyho diodami. Rozhodujícím faktorem pro výběr usměrňovače je ztrátový výkon, který ovlivňuje všechny ostatní parametry. S rostoucím výkonem zdroje je vhodnější použít synchronní usměrňovač. Především pro napětí do 5 V je vhodnější použít synchronní usměrňovač, protože s klesajícím napětím rostou ztráty na usměrňovači se Schottkyho diodami.

V předposlední kapitole jsem se věnoval jednotlivým řídicím obvodům a porovnával jsem jejich vlastnosti. Při výběru řídicího obvodu je nutné volit mezi řídicím obvodem pro jednocestné usměrňovače a obvodem pro dvoucestné usměrňovače. Implementace řídicích obvodů pro jednocestné usměrňovače je náročnější. Pro jednocestné usměrňovače je pro pěťovoltové aplikace nejvhodnější řídicí obvod UCC24610, i za cenu vyššího ztrátového výkonu. Pro dvanáctivoltové aplikace je nevhodnější NCP4304A, jeho výhodou je velký rozsah napájecího napětí. U obvodů pro dvoucestné usměrňovače je nevýhodnější obvod SRK2000A. Pro složitost je nejméně vhodný obvod SiP11203.

V poslední kapitole jsem se zabýval návrhem dvou synchronních usměrňovačů a měření účinnosti zdroje. Navrhl jsem a sestrojil synchronní usměrňovač s obvodem SRK2000 a UCC24610. Při měření účinnosti nejlepší vliv na měl obvod se dvěma obvody UCC24610. Účinnost se pohybovala těsně nad 80 %. Můj návrh obvodu s řídicím obvodem SRK2000 byl mírně horší, jeho účinnost se pohybovala okolo 80%. Nejhorší účinnost měly Schottkyho



diody, jejich účinnost se pohybovala okolo 78%. Na začátku a na konci byly však lepší Schottkyho diody než oba obvody. Toto mohlo být způsobeno nepřesnostmi v měření, rušivými vlivy z okolí, zaokrouhlováním při výpočtech a nedokonalým návrhem. Při těchto výkonech bylo třeba diody i tranzistory mít připevněny na chladiči a chladit je proudem vzduchu z ventilátoru. Z cenového hlediska je nesrovnatelně lepší Schottkyho dioda, cena obvodů je 4x větší u SRK2000 a 6x větší u UCC24610. I rozloha obvodů je několikanásobně větší než u Schottkyho diod.

Z tohoto hlediska vyplývá, že synchronní usměrňovače se vyplatí především při sériové výrobě a při používání zdroje při středním zatížení.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

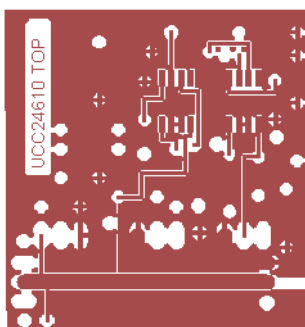
- [1] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. Plzeň: Vydavatelství Západočeské univerzity, 1998. 181 s. ISBN 55-087-98
- [2] TRUHLÁŘ, Michal, ŠVELA, Ondřej. *Schottkyho dioda* [online]. 2010. [Cit. 5.5.2014]. Dostupné z: <http://mealtiner.net/Publikace/SchottkyhoDioda.pdf>
- [3] NOVOTNÝ, Vlastislav, PATOČKA, Miroslav, VOREL, Pavel. *Napájení elektronických zařízení*. Ústav radioelektroniky FEI VUT, 1999. 129 s.
- [4] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION, FEBFAN6754WAMR\_CP450v1 [online]. Fairchild Semiconductor Corporation, ©2013. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: [http://www.fairchildsemi.com/evb/febfan6754wamr\\_cp450v1.pdf](http://www.fairchildsemi.com/evb/febfan6754wamr_cp450v1.pdf)
- [5] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION, FDP083N15A [online]. Fairchild Semiconductor Corporation, ©2013. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <https://www.fairchildsemi.com/ds/FD/FDP083N15A.pdf>
- [6] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION, FDP032N08 [online]. Fairchild Semiconductor Corporation, ©2013. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://www.fairchildsemi.com/ds/FD/FDP032N08.pdf>
- [7] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION, FEBFAN6920MR\_T02U120A [online]. Fairchild Semiconductor Corporation, ©2013. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: [http://www.fairchildsemi.com/evb/febfan6920mr\\_t02u120a.pdf](http://www.fairchildsemi.com/evb/febfan6920mr_t02u120a.pdf)
- [8] PERICA, Goran. Efficient and Reliable Drive for Synchronous MOSFET Rectifiers [online]. Linear Technology Magazine, ©2005. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: [http://cds.linear.com/docs/en/lt-journal/05\\_03-11-LTC3900-Perica.pdf](http://cds.linear.com/docs/en/lt-journal/05_03-11-LTC3900-Perica.pdf)
- [9] VISHAY SILICONIX, Si7370DP [online]. Vishay Siliconix, ©2009. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/71874/71874.pdf>
- [10] NXP SEMICONDUCTORS, PH4840S [online]. NXP Semiconductors, ©2006. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/PH4840S.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PH4840S.pdf)
- [11] STMICROELECTRONICS, AN3014 [online]. STMicroelectronics, ©2010, ©2013. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application\\_note/CD00242940.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application_note/CD00242940.pdf)
- [12] STMICROELECTRONICS, STB60N55F3, STD60N55F3, STF60N55F3, STI60N55F3, STP60N55F3, STU60N55F3 [online]. STMicroelectronics, ©2009. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00152203.pdf>
- [13] TEXAS INSTRUMENTS, PMP5967 Rev C Test Results [online]. Texas Instruments Incorporated, ©2012. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/sl00613/sl00613.pdf>
- [14] TEXAS INSTRUMENTS, slur470 [online]. Texas Instruments Incorporated, ©2012. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/df/slur470/slur470.pdf>
- [15] TEXAS INSTRUMENTS, CSD18501Q5A [online]. Texas Instruments Incorporated, ©2012. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/csd18501q5a.pdf>
- [16] TAO, M. *Electrical, Thermal, and EMI Designs of High-Density, Low-Profile Power Supplies* [online], Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999 [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-173510281975580/unrestricted/chapter2.pdf>
- [17] BARTOŇ, Karel. *Aktivní výkonové usměrňovače s MOSFET*. AMARO spol. s.r.o., 10.2011. 92 s. ISSN 1804-7173

- [18] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION, FEBFAN6756MR\_T03U065A [online]. Fairchild Semiconductor Corporation, ©2012. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: [https://www.fairchildsemi.com/evb/febfan6756mr\\_t03u065a.pdf](https://www.fairchildsemi.com/evb/febfan6756mr_t03u065a.pdf)
- [19] MOSPEC, S50D30-S50D60 [online]. MOSPEC Semiconductor Corporation. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://www.mospec.com.tw/pdf/schottky/S50D30-S50D60.pdf>
- [20] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION, FAN6208 [online]. Fairchild Semiconductor Corporation, ©2013. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://www.fairchildsemi.com/ds/FA/FAN6208.pdf>
- [21] INTERNATIONAL RECTIFIER, IR11672AS [online]. International rectifier, ©2013. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir11672as.pdf>
- [22] INTERNATIONAL RECTIFIER, IR11682S [online]. International rectifier, ©2011. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir11682s.pdf>
- [23] LINEAR TECHNOLOGY, LTC3900fb [online]. USA: Linear Technology Corporation, ©2003. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3900fb.pdf>
- [24] ON SEMICONDUCTOR, NCP4304A, NCP4304B [online]. Semiconductor Components Industries, ©2014. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/NCP4304-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCP4304-D.PDF)
- [25] VISHAY SILICONIX, SiP11203, SiP11204 [online]. Vishay Siliconix, ©2011. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/73868/sip11203.pdf>
- [26] SYNC POWER CORPORATION, SP6018 Synchronous Rectifier Driver [online]. SYNC Power Corporation, ©2013. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://www.syncpower.com/datasheet/SP6018.pdf>
- [27] STMICROELECTRONICS, STSR30 [online]. STMicroelectronics, ©2014. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00003557.pdf>
- [28] STMICROELECTRONICS, SRK2000A [online]. STMicroelectronics, ©2013. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00097737.pdf>
- [29] TEXAS INSTRUMENTS, UCC24610 [online]. Texas Instruments Incorporated, ©2010. [Cit. 8.5.2014]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/slusa87b/slusa87b.pdf>
- [30] INTERNATIONAL RECTIFIER, IRL3803 [online]. International rectifier, ©1997. [Cit. 11.8.2014]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/213/188/irl3803-datasheet-1.pdf>

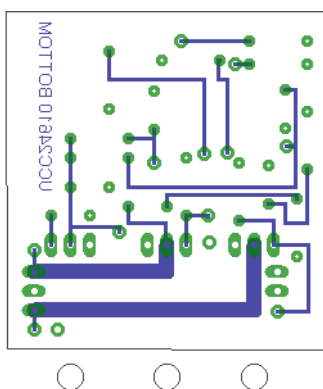
**PŘÍLOHY**

**Příloha A – UCC24610**

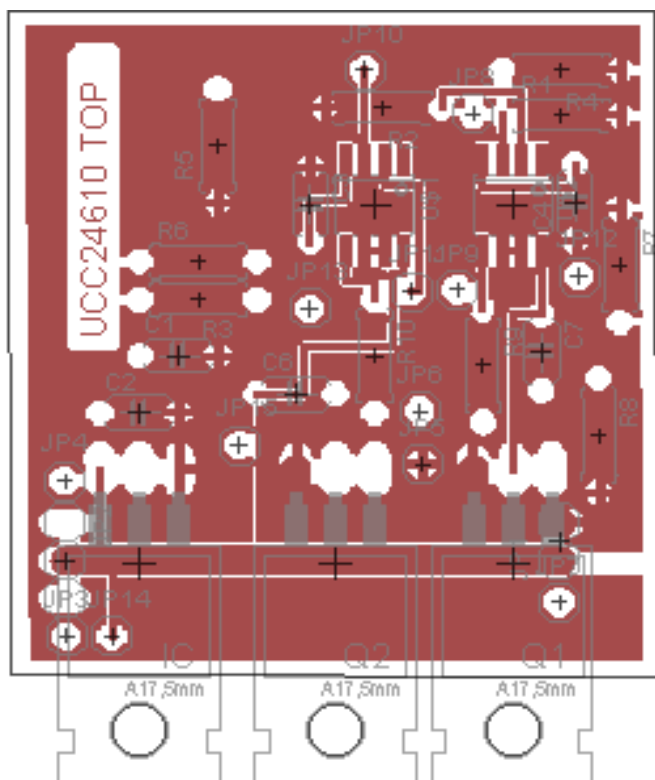
**A.1 Deska plošného spoje – top (strana součástek) - měřítko 1:1**



**A.2 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů) - měřítko 1:1**

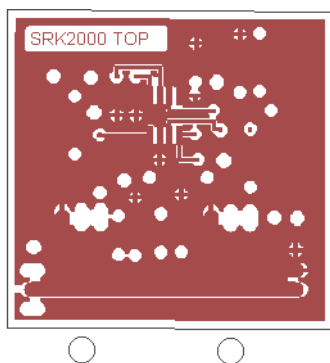


### A.3 Deska plošného spoje – Osazovací plán - měřítko 2:1

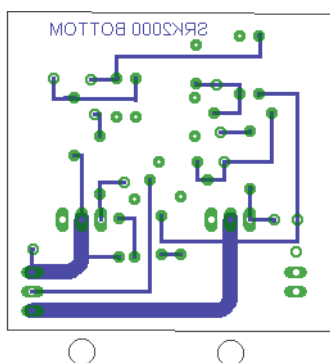


## Příloha B – SRK2000

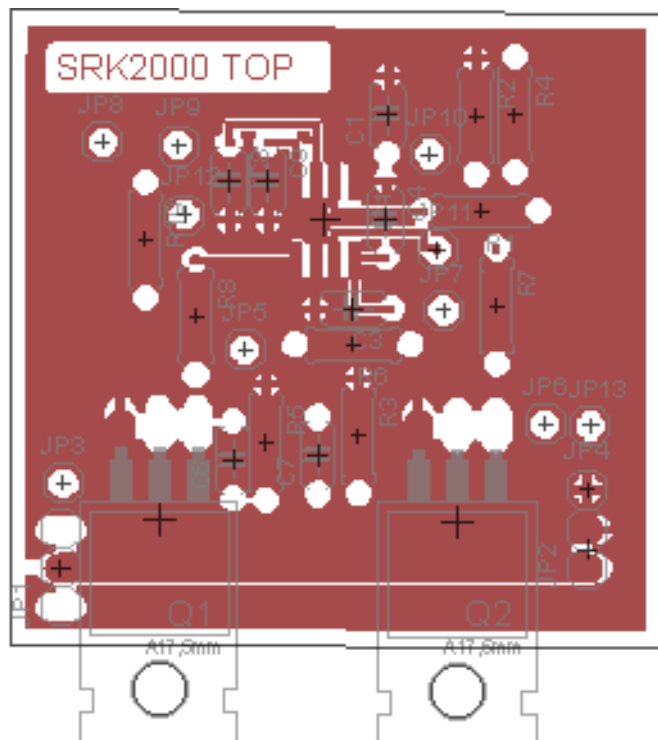
### B.1 Deska plošného spoje – top (strana součástek) - měřítko 1:1

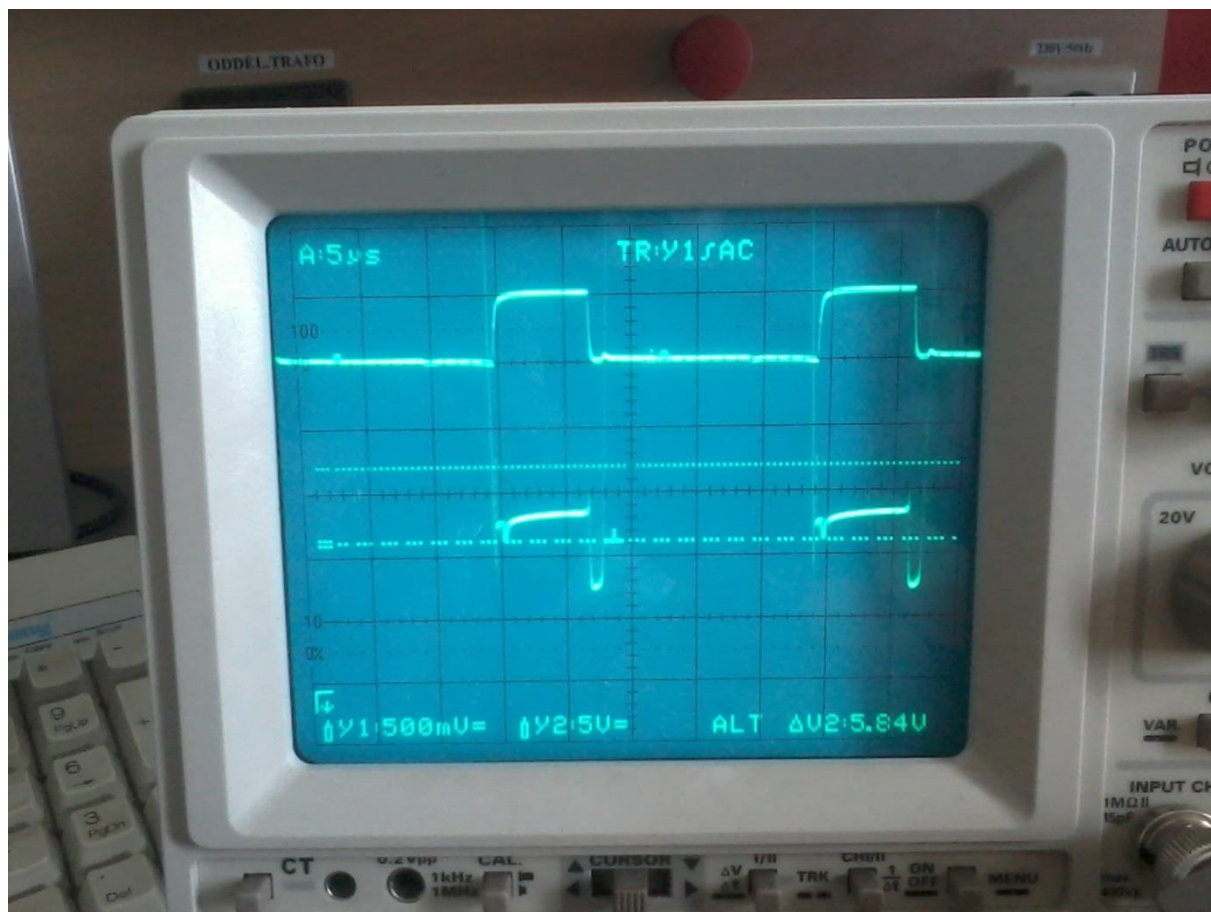


### B.2 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů) - měřítko 1:1



### B.3 Deska plošného spoje – Osazovací plán - měřítko 2:1



**C Obrázek průběhů spínání tranzistoru z měření**

Horní průběh znázorňuje průběh napětí na Gate.  
Spodní průběh představuje průběh napětí Drain Source