

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Procesorem řízený střídač 350VDC/230VAC, 50Hz, 500VA

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Michal Kubát

Vedoucí práce: Ing. Matouš Bartl

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal KUBÁT**
Osobní číslo: **E10N0134P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Procesorem řízený střídač 350VDC/230VAC, 50Hz, 500VA**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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


Cílem práce je vytvořit napěťový střídač v konfiguraci "plný můstek" se sinusovým výstupem. Pro řízení použijte procesor firmy Texas Instruments řady TMS320F28xx. Práce má přímou návaznost na zadání "Procesorem řízený spínaný izolovaný napěťový zdroj 12V/350V, 500W."

1. Prostudujte potřebnou literaturu a navrhnete koncepci zařízení.
2. Prostudujte nabídku dobře dostupných součástek a konkretizujte zapojení zařízení. Při práci komunikujte s kolegou pracujícím na výše uvedeném zadání. Při návrhu zohledněte fakt, že může být zařízení použito v automobilu.
3. Fyzicky realizujte funkční vzorek. Dbejte na dostatečnou odolnost z hlediska mechanické konstrukce i elektrických poruch, jako je přetížení výstupu.
4. Odměřte základní charakteristiky jako účinnost, zkreslení výstupního napětí a reakce na různé druhy zátěže (R,C,L).
5. Jako volitelný úkol (zejména v případě DP) vytvořte pro PC jednoduchý software určený ke komunikaci s řídicím procesorem zařízení.

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. Matouš Bartl**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací
Konzultant diplomové práce: **Ing. Matouš Bartl**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací
Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací spínaného střídače z 350 V DC na 230 V AC s maximálním výkonem 500 VA. Část práce tvoří obecný úvod do problematiky spínaných zdrojů, další část se zaměřuje na teoretický popis jednotlivých bloků střídače, jejich návrh, realizaci a ověření funkce.

Klíčová slova

Spínaný zdroj, měnič, střídač, plný můstek, TMS320, MOSFET, budič

Abstract

This master thesis deals with design and realization of 350 V DC to 230 V AC switched-mode power supply with a power rating of 500 VA. Part of this thesis deals with general introduction to switched-mode power supplies, the next part is focused on the description of individual power supply blocks, their design, realization and validation.

Keywords

Switched-mode power supply, SMPS, inverter, full bridge, TMS320, MOSFET, driver

Prohlášení

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

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.

V Plzni dne 21. 5. 2012

Michal Kubát

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu Ing. Matoušovi Bartlovi za cenné rady a konzultace potřebné k vypracování této diplomové práce.

Obsah

1	Úvod	11
2	Spínané zdroje	12
2.1	Topologie Push Pull	12
2.2	Topologie Half Bridge	12
2.3	Topologie Full Bridge	13
3	MOSFET tranzistory	14
3.1	Výkonové ztráty	14
4	Budič	15
4.1	Budič s transformátorem	15
4.2	Budič s optočlenem	16
5	Zpětná vazba	16
5.1	Měření napětí a proudu	16
5.2	Optická zpětná vazba	17
5.3	Hallův senzor	17
6	Realizace	17
6.1	Digitální signálový procesor TMS320	18
6.2	Pomocný zdroj	18
6.3	Budič	19

Seznam obrázků

1	Zdroj s topologií Push Pull	12
2	Zdroj s topologií Half Bridge	13
3	Zdroj s topologií Full Bridge	13
4	Transformátorový budič	15
5	Budič s optočlenem	16
6	Blokové schéma zdroje	18
7	Budič dolního páru tranzistorů	19
8	Budič horního tranzistoru	20

Seznam použitých zkratk

ADC	Analog-to-Digital Converter
CTR	Current Transfer Ratio
DSP	Digital Signal Processor
JTAG	Joint Test Action Group
LED	Light-Emitting Diode
MOSFET	Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
PWM	Pulse-Width Modulation
UPS	Uninterruptible Power Supply
USB	Universal Serial Bus

1 Úvod

Spínané napájecí zdroje přináší oproti lineárním zdrojům mnoho výhod. Pracují s mnohem vyšší účinností, spínaný zdroj o stejném výkonu jako zdroj lineární bude dosahovat nižší hmotnosti a rozměrů.

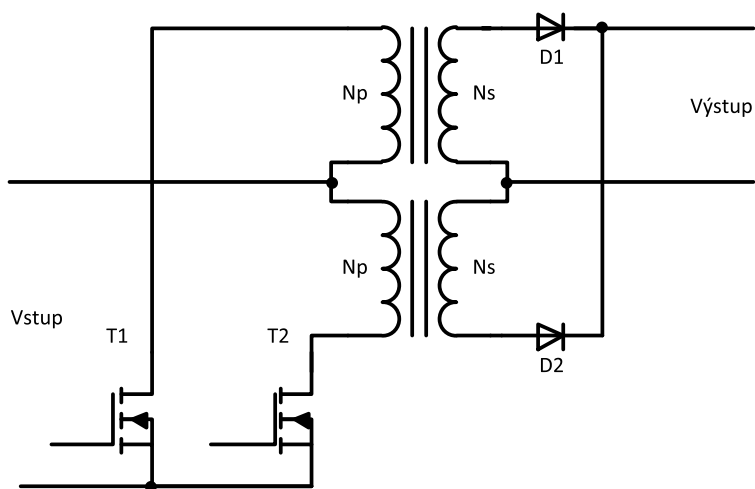
Cílem této práce je návrh a konstrukce spínaného střídače z 350 VDC na síťové napětí 230 V / 50 Hz s maximálním výkonem 500 VA, který bude spolupracovat s jiným měničem z 12 VDC na 350 VDC. Výstupem by měla být čistá sinusovka. Takovýto měnič dnes může nalézt uplatnění například jako střídač do auta nebo jako zdroj nepřerušovaného napájení - UPS. Zdroj umožňuje připojení k počítači pomocí USB kvůli možnosti pohodlné diagnostiky.

2 Spínané zdroje

Narozdíl od lineárních zdrojů využívají spínané zdroje polovodičů v tzv. spínacím režimu, kdy je buď polovodič zcela otevřený, je na něm nulové napětí a tedy i nulový ztrátový výkon, nebo je uzavřený, neprochází žádný proud a výkon je opět nulový. Díky tomu mají spínané zdroje vysokou účinnost a kladou nižší nároky na chlazení. Vysoké spínací frekvence umožňují použití malých lehkých transformátorů s feritovým jádrem. Nevýhodou spínaných zdrojů je vysoká úroveň elektromagnetické interference, plynoucí z impulzního provozu. Zdroj tedy musí být vybaven výstupním filtrem a stíněním.

2.1 Topologie Push Pull

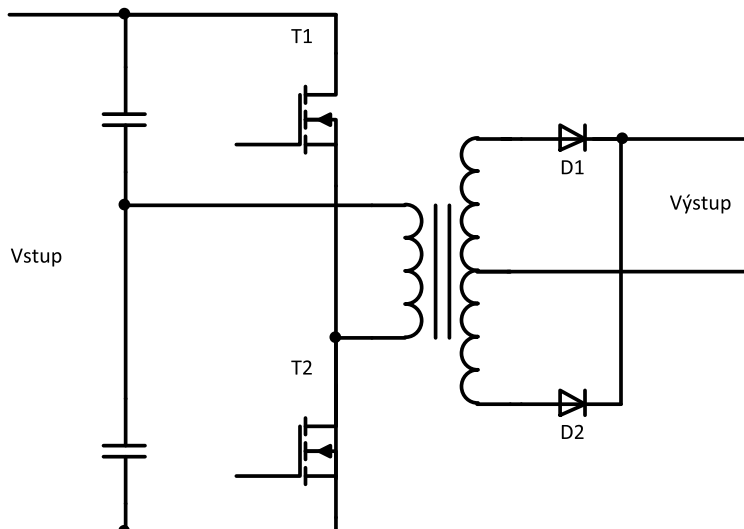
Push Pull je topologie vhodná pro nižší výkony okolo 25 - 250 W. Výhodou topologie je umístění obou tranzistorů na stejném potenciálu a z toho plynoucí jednoduché buzení. Nevýhodou je vysoké napětí na spínacích tranzistorech, které přesahuje dvojnásobek vstupního napětí a také nutnost použití transformátoru se dvěma shodnými primárními vinutími. Pro omezení namáhání tranzistorů vysokým napětím musí mít vinutí co nejtěsnější vzájemnou vazbu[4].



Obrázek 1: Zdroj s topologií Push Pull

2.2 Topologie Half Bridge

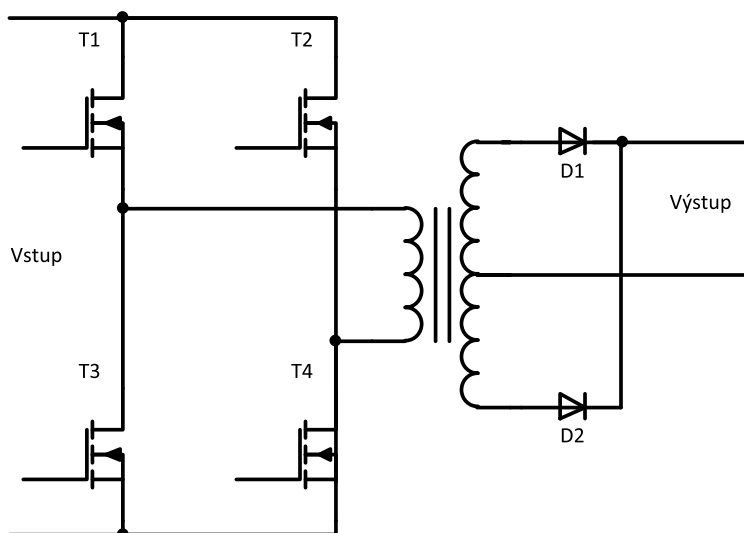
Tato topologie je vhodná pro výkony okolo 250 W - 1 kW. Výhodou je nízké maximální napětí na spínacím tranzistoru, které je rovno vstupnímu napětí. Kondenzátory tvořící kapacitní dělič musí spolehlivě fungovat při zvolené spínací frekvenci, která může být i stovky kHz.



Obrázek 2: Zdroj s topologií Half Bridge

2.3 Topologie Full Bridge

Topologie Full Bridge je určena pro vysoké výkony přesahující 500 - 1000 W. Energie se přenáší dvakrát za periodu, což znamená možnost použití menšího transformátoru a zároveň nižší zvlnění na výstupu. Nevýhodou je nutnost použití čtyř výkonových tranzistorů, které jsou na různých napět'ových potenciálech. Z toho plyne složitější buzení a vyšší cena. Proud vždy teče přes dva tranzistory, tím se zvyšují ztráty vedením. U obou typů můstek musí být zabráněno tomu, aby se mohly otevřít dva tranzistory nad sebou, což by vedlo k jejich téměř okamžitému zničení.



Obrázek 3: Zdroj s topologií Full Bridge

3 MOSFET tranzistory

Tranzistory typu MOSFET jsou tranzistory řízené napětím mezi piny Gate a Source. Důležitým parametrem tranzistoru je prahové napětí, po jehož dosažení se tranzistor začíná otevírat. Velikost prahového napětí je většinou okolo 2 V, k plnému otevření tranzistoru - saturaci - dochází při napětí okolo 8 V. Při použití MOSFETu ve spínacím režimu je tedy řídicí nutné napětí udržovat mimo toto pásmo. To znamená, že se tranzistor nedá řídit přímo součástkami využívajícími TTL logických úrovní.

Při změně napětí na hradle (Gate) je třeba překonat kapacitu hradla zesílenou Millero-vým jevem. Při přivedení napětí na hradlo začne jeho hodnota narůstat, až dosáhne prahového napětí. Poté se začne nabíjet kapacita hradla a tranzistor se otevírá, dokud nedojde k jeho saturaci[2]. Pro rychlý přechod přes tuto oblast, ve které tranzistor nepracuje ve spínacím režimu, je třeba do hradla dodávat dostatečně vysoký proud, který může dosahovat i několika ampér. Požadovaný proud I_G lze vypočítat z celkového náboje hradla Q_G a požadované maximální doby přechodu t_{tran} :

$$I_G = \frac{Q_G}{t_{tran}}$$

3.1 Výkonové ztráty

Výkonové ztráty na spínacím tranzistoru dělíme do dvou skupin. Za prvé je to ztráta vznikající díky nenulovému odporu kanálu $R_{DS(on)}$ v sepnutém stavu.

$$P_{ON} = R_{DS(on)} \times I^2$$

Při volbě tranzistoru se musí brát ohled na požadovaný maximální proud a podle toho zvolit tranzistor s vhodným $R_{DS(on)}$. Tento odpor se u výkonových tranzistorů pohybuje řádově od desetin $m\Omega$ až do jednotek Ω . Dále jsou to ztráty spínací, způsobené tím, že při spínání a vypínání tranzistoru je třeba nejprve dodat náboj do hradla, respektive ho odčerpat. To způsobuje, že během přepínání tranzistor nepracuje ve spínacím režimu, na přechodu je nenulové napětí a teče nenulový proud a vzniká tedy výkonová ztráta.

$$P_{SW} = 1/2 \times V_{DS} \times I_D \times f_{sw} \times (t_{on} + t_{off})$$

Tato ztráta závisí na počtu sepnutí tranzistoru, je tedy závislá na spínací frekvenci f_{sw} . Ztrátu lze omezit zkrácením doby otevírání a zavírání tranzistoru t_{on} a t_{off} , tedy výběrem tranzistoru s malým nábojem Gate Q_g nebo zvýšením budicího proudu, nebo je možné omezit počet sepnutí snížením spínací frekvence.

Vzniká také ztráta na budiči, který musí střídavě dodávat náboj Q_g a poté nahromaděnou energii odvádět do země. Ztráta opět závisí na náboji hradla a na spínací frekvenci.

$$P_{DR} = V_{CC} \times Q_g \times f_{sw}$$

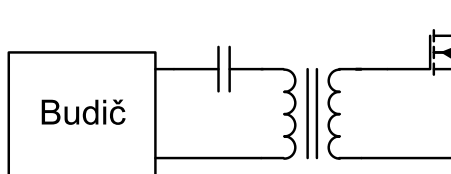
4 Budič

Vzhledem k vysokým spínacím proudům a napětím není možné tranzistor spínat přímo z mikrokontroléru nebo z výstupu optočlenu. Ke spínání se v praxi používají tranzistory v zapojení Push-pull, nebo integrované budiče. Horní tranzistory v můstkových zapojeních vyžadují k otevření napětí přesahující vstupní napětí můstku, výkonové tranzistory v těchto zapojeních navíc nejsou na stejném potenciálu. Tento problém se dá vyřešit pomocí nábojové pumpy[1], nebo galvanickým oddělením budiče. Při vyšších napětích na tranzistoru je galvanické oddělení vhodné i z hlediska bezpečnosti.

Budič může kromě samotné výkonové části obsahovat i ochrany tranzistoru[3]. Nejdůležitější ochranou je ochrana nadproudová, která díky umístění přímo na budiči vypne tranzistor dříve, než by řídicí obvod nadproud vyhodnotil a zareagoval na něj. K měření proudu není třeba do obvodu vkládat snímací odpor, ale je možné měřit napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru. V sepnutém stavu toto napětí odpovídá protékajícímu proudu, komparátor napětí porovnává s nastavenou hodnotou závislou na typu tranzistoru a při překročení této hodnoty je tranzistor odpojen a případně je celý budič zablokovan. Další ochranou může být tepelná ochrana tranzistoru nebo hlídání napájecího napětí budiče - nižší spínací napětí prodlouží dobu přepínání tranzistoru a tím zvýší výkonové ztráty.

4.1 Budič s transformátorem

Izolační transformátor umožňuje buzení spínacího tranzistoru bez potřeby galvanicky odděleného pomocného napájení[6]. Výkonová část budiče je umístěna na primární straně transformátoru a je tedy galvanicky oddělena od tranzistoru. Na sekundární straně je pouze tranzistor a případně pasivní součástky kvůli impedančnímu přizpůsobení, omezení proudu a omezení napět'ových špiček.

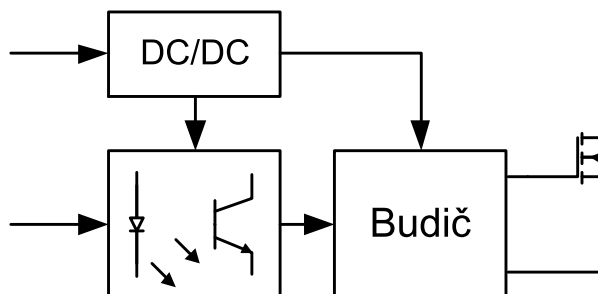


Obrázek 4: Transformátorový budič

Transformátor je schopný přenášet pouze střídavé signály, nelze jej tedy použít v aplikacích vyžadujících trvalé sepnutí tranzistoru, neumožňuje ale ani spínání tranzistoru s vysokou střídou. Tento budič může být použit v DC/DC měničích, jejichž tranzistory jsou buzeny vždy se střídou menší než 50 % [5]. Střídač vyžaduje při maximální zátěži střídu blízkou 100 %, tento princip u něj tedy není možné využít. Velkou výhodou je malý počet součástek, nulové zpoždění signálu [1] a možnost použití několika oddělených sekundárních vinutí pro současné buzení více tranzistorů na různých potenciálech. Volbou vhodného poměru závitů na vinutích může být budič napětí jednoduše zvýšeno nebo sníženo.

4.2 Budič s optočlenem

V budiči, který využívá k řízení tranzistoru optočlenu, je výkonová část umístěna na straně tranzistoru. Budiče tranzistorů na různých potenciálech proto musí mít vlastní galvanicky oddělená napájení schopná dodat dostatečný spínací proud. S tímto typem budiče je možné tranzistor otevírat s libovolnou střídou.



Obrázek 5: Budič s optočlenem

5 Zpětná vazba

Pokud má řídicí elektronika zdroje regulovat napětí na výstupu, musí mít velikost tohoto napětí nutně k dispozici, je tedy nutné zavést zpětnou vazbu. Pro spolehlivý provoz je také vhodné snímat vstupní napětí přicházející ze stejnosměrného mezistupně. Pokud má být v mikrokontroléru implementována ochrana proti přetížení - „softwarová pojistka” - je nutné snímat výstupní proud. Vzhledem k velikosti napětí je vhodné, aby byl procesor od všech snímačů napětí i proudu galvanicky oddělen.

5.1 Měření napětí a proudu

U některých typů spínaných zdrojů, jako je například topologie Flyback, je možné snímat výstupní napětí na pomocném vinutí. U ostatních topologií se musí napětí nejprve odpro-

vým děličem snížit na vhodnou úroveň a v případě potřeby ještě galvanicky oddělit. Toho může být dosaženo několika způsoby, například pomocí optočlenu nebo izolačního zesilovače.

Proud můžeme měřit jako úbytek napětí na snímacím rezistoru, nebo pomocí Hallova senzoru. V případě využití snímacího rezistoru musíme brát ohled na výkonovou ztrátu na tomto rezistoru.

5.2 Optická zpětná vazba

Zpětná vazba s optočlenem využívá k přenosu informace LED a galvanicky oddělenou fotodiodu nebo fototranzistor. Optočlen se chová jako proudový zesilovač, kde proudový zisk udává proudový přenosový činitel CTR:

$$CTR = \frac{I_{CE} \times 100\%}{I_F}$$

Kde I_{CE} je proud procházející tranzistorem a I_F je budicí proud diodou. Problémem optočlenu z hlediska využití pro přenos analogového signálu je jeho nelinearita a značná teplotní závislost CTR. Zatímco samotnou nelinearitu by bylo možné změřit a v mikroprocesoru pak provádět její korekci, vliv teploty se musí řešit jiným způsobem.

Jednou z možností, jak eliminovat nelinearitu a zároveň se zbavit teplotní závislosti optočlenu, je využití speciální součástky se dvěma fotodiodami[7]. Tyto diody jsou od sebe galvanicky odděleny, mají shodnou charakteristiku a díky umístění v jednom pouzdře mají i stejnou teplotu a napětí na jedné diodě tedy odpovídá napětí na druhé diodě.

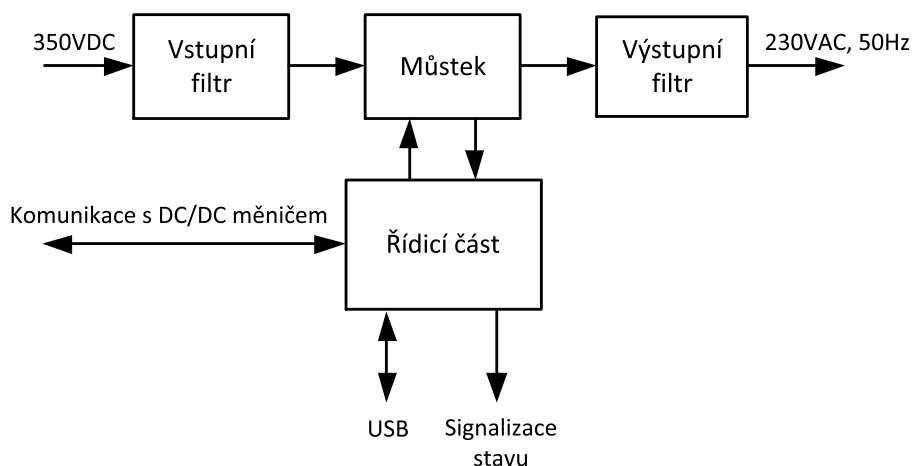
5.3 Hallův senzor

Pro snímání proudu je možné použít snímač s Hallovým senzorem. Tento typ měření proudu nevyžaduje snímací odpor a umožňuje snímat proudy ve velkém rozsahu. Velkou výhodou je to, že senzor je z principu galvanicky oddělen od snímaného obvodu a nevyžaduje tedy ani oddělené napájecí napětí. Výstupem z hallova senzoru je napětí lineárně závislé na procházejícím proudu. Hallovy senzory umožňují podle typu měřit proud buď pouze v jednom směru, nebo v obou směrech.

6 Realizace

Tento střídač je určený ke spolupráci s DC/DC měničem z 12 V akumulátoru na 350 V. Zdroj umožňuje komunikaci přes virtuální sériový port přes USB. Z počítače lze zdroj za-

pnout/vypnout a případně číst informace o jeho stavu. Střídač využívá tranzistory MOS-FET zapojené v topologii Full Bridge.



Obrázek 6: Blokové schéma zdroje

6.1 Digitální signálový procesor TMS320

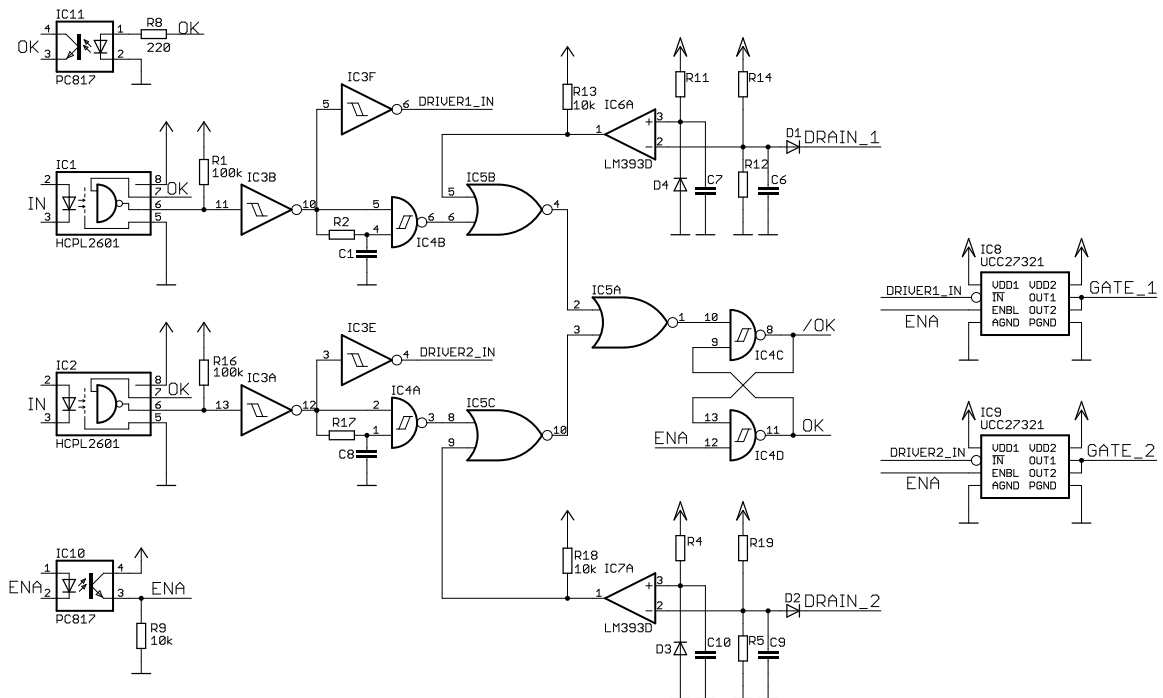
Ve zdroji je použitý digitální signálový procesor z rodiny TMS320C28x od společnosti Texas Instruments. Tento 32 bitový procesor je určen pro použití ve výkonových aplikacích jako je řízení pohonů, spínaných měničů atd. Tomu odpovídá výbava procesoru, je možné využít až 16 kanálů PWM a 16 kanálů ADC. Blok PWM je vybaven *Dead-band* generátorem, který u můstkových zapojení zajišťuje, že se ani při chybě v programu nemohou otevřít dva tranzistory umístěné nad sebou a způsobit tak nebezpečný zkrat. Za normálního provozu zpožďuje při přepínání tranzistorů zapínací signál pro tranzistor tak, aby uplynula dostatečná prodleva nutná k uzavření vypínaného tranzistoru.

6.2 Pomocný zdroj

Pro provoz střídače je potřeba pomocný zdroj pro napájení řídicí logiky a budičů. Střídač vyžaduje 5 galvanicky oddělených větví - jednu pro napájení procesorové části, dvě pro napájení horních tranzistorů v můstku, jednu pro napájení dolního páru tranzistorů a jednu pro napájení izolačního zesilovače, který snímá napětí na výstupu. Pomocný zdroj využívá topologie Push-Pull a transformátoru s pěti sekundárními vinutími. Primární strana je napájena z 12 V z předchozího stupně, tranzistory jsou spínány jednoduchým oscilátorem tvořeným Schmittovým klopným obvodem.

6.3 Budič

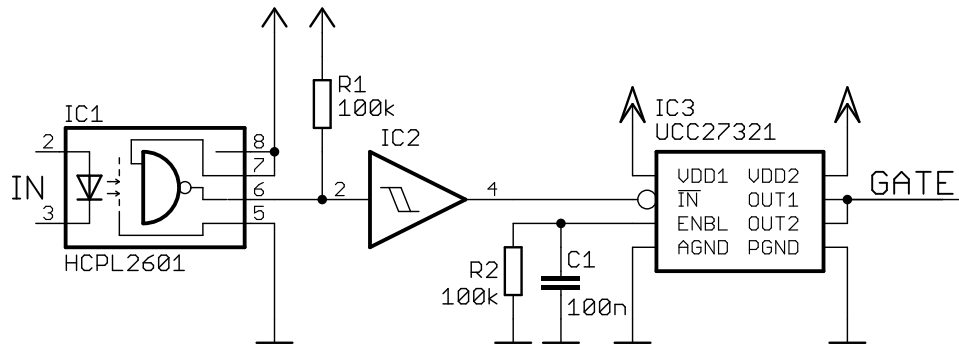
Budič výkonových tranzistorů je tvořený třemi galvanicky oddělenými obvody. Spodní dva tranzistory jsou umístěny na stejném potenciálu a mají proto část budiče společnou. K buzení jsou využity obvody UCC37322, které mohou dodat špičkový proud až 9 A při napájecím napětí 4 - 15 V. Galvanické oddělení spínacích signálů zajišťují vysokorychlostní optočleny, řídicí signál a hlášení chyby jsou přenášeny pomocí obyčejných pomalých optočlenů PC817.



Obrázek 7: Budič dolního páru tranzistorů

Tranzistory ve spodní části jsou vybaveny desaturační ochranou, která snímá napětí U_{DS} tranzistorů, v případě překročení jeho maximální hodnoty překlopí komparátor RS klopný obvod a tím oba tranzistory vypne. Tím zároveň přes optočlen vydá signál procesoru, ten pak může přes další optočlen obnovit funkci budiče resetem klopného obvodu. Ochrana musí být blokována při uzavřeném tranzistoru, kdy je napětí U_{DS} rovné vstupnímu napětí, a ještě krátkou chvíli po signálu k sepnutí tranzistoru. To je zajištěno pomocí obvodu IC4B Tato ochrana se aktivuje v případě zkratu na výstupu, kdy by procesor nestačil zareagovat. Funkce ochrany je nezávislá na procesoru, může tedy zareagovat i v případě chyby v programu nebo v případě, kdy procesorová část nebude z nějakého důvodu napájena. Horní tranzistory mají vlastní zjednodušené budiče bez ochrany, předpokládá se že v případě zkratu

zareaguje ochrana u dolních tranzistorů.



Obrázek 8: Budič horního tranzistoru

Reference

- [1] Abhijit D. Pathak, Ralph E. Locher. *How to drive MOSFETs and IGBTs into the 21st century*. <http://www.ixys.com/Documents/Appnotes/IXAN0009.pdf>.
- [2] Abid Hussain. *Driving Power MOSFETs in High-Current, Switch Mode Regulators*. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00786a.pdf>.
- [3] Ing. Pavel Vorel, Ph.D., Doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka. *Budiče výkonových tranzistorů MOSFET a IGBT*. <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04030/index.html>.
- [4] Sergio Sánchez Moreno. *What topology to choose?* <http://www.alltomelektronik.se/Files/080198-W.pdf>.
- [5] International Rectifier. *Transformer-Isolated Gate Driver Provides very large duty cycle ratios*. <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-950.pdf>.
- [6] Dr. Ray Ridley. *Gate Drive Design Tips*. <http://www.scribd.com/doc/7342768/Gate-Drive-Design-Tips-Ridley>.
- [7] Vishay Semiconductors. *Optoelectronic Feedback Control Techniques for Linear and Switch Mode Power Supplies*. <http://www.vishay.com/docs/83711/appn55.pdf>.