České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh řídicího systému pro funkční vzorek motoru s volnými písty s využitím jednotky Microautobox od firmy D Space

Praha, červenec 2009 **Autor: Martin Němec**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne 15. 7. 2009

Martin Němec
podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval všem lidem, bez nichž by nemohla tato práce vzniknout, především svému vedoucímu diplomové práce panu *Doc. Ing. Ondřeji Vysokému, CSc.* za vedení, připomínky a poznámky k práci. Dále *Bc. Tomáši Haubertovi* za cenné připomínky.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je návrh desky pro řízení lineárního motor-generátoru v projektu lineárního spalovacího motoru. Tato deska by měla nahradit původní výkonový a oddělovací modul a umožnit využití plného výkonu nového motor-generátoru. Deska musí zajistit galvanické oddělení signálů, jejich přizpůsobení, měření proudů vinutím a napětí výkonového zdroje a indikaci chybového stavu. Vstupy a výstupy musí být kompatibilní se stávajícími moduly.

Abstract

The purpose of this bachelor thesis is to design a printed circuit board to control linear motor-generator in the linear combustion engine project. The board should replace original power and separation module and allow utilization of the full power of the new motor-generator. It has to ensure galvanic separation, signal adjustation, current and power voltage measurement and fault state indication. Inputs and outputs have to stay compatible with existing modules.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Martin Němec**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Návrh řídicího systému pro funkční vzorek motoru s volnými písty s využitím jednotky Microautobox od firmy D Space**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s vývojovým systémem D Space Microautobox a s efektivní prací v prostředí Matlab, Simulink tak, abyste mohl tento vývojový systém použít pro experimentální práci s motorem s volnými písty LCE-02.
2. Navrhněte a realizujte úpravu řídicí části výkonového invertoru tak, aby se výkonové podmínky přizpůsobily vyššímu výkonu funkčního vzorku motoru LCE-02.

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Doc.Ing. Ondřej Vysoký, CSc.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2009/10

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

LS

17. M. Demlová

doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 27. 2. 2009

Obsah

Seznam obrázků **vii**

Seznam tabulek **viii**

1 Úvod **1**
1.1 LCE . . . 1
1.1.1 Princip činnosti . . . 2
1.1.2 Zapojení výkonový modul – motor-generátor . . . 2
1.2 MicroAutoBox . . . 3

2 Návrh zapojení **4**
2.1 Upřesnění zadání . . . 4
2.2 Popis výkonového modulu PM50RLA120 . . . 6
2.2.1 Vnitřní struktura . . . 6
2.2.2 Chybové stavy . . . 6
2.2.3 Přehled důležitých parametrů . . . 8
2.3 Blokový koncept obvodu . . . 8
2.4 Obvody pro připojení IPM . . . 9
2.4.1 Galvanické oddělení vstupů . . . 9
2.4.2 Blokování průchodu signálů a buzení výstupu . . . 9
2.4.3 Galvanické oddělení signálů pro připojení k modulu . . . 9
2.4.4 Napájení spínacích bloků modulu . . . 9
2.4.5 Signalizace a přenos chybových signálů . . . 9
2.5 Měření napětí a proudů . . . 10
2.5.1 Měření proudů . . . 10
2.5.2 Měření napětí . . . 10
2.6 Nahrazení funkce procesoru . . . 12
2.6.1 Řízení chlazení . . . 12
2.6.2 Obsluha chybového stavu a povolení průchodu řídících signálů . . . 12
2.7 Napájecí část . . . 13

3 Návrh desky plošných spojů **14**
3.1 Příprava schématu pro vygenerování „netlistu“ . . . 14
3.2 Příprava před „routováním“ . . . 15
3.3 Rozmístění bloků návrhu . . . 15
3.4 Všeobecná pravidla propojování . . . 16

4 Závěr **18**

Literatura **19**

A Schémata navrženého zapojení **I**

B Jednotlivé vrstvy desky plošných spojů **V**

C Obsah CD **XIV**

Seznam obrázků

1.1 Schéma lineárního spalovacího motoru 2
1.2 MicroAutoBox 3

2.1 Vnitřní bloková struktura modulu PM50RLA120 7
2.2 Příklad způsobu odpojení tranzistoru při detekci chyby 7
2.3 Upravené Sallen-Key zapojení filtru 4. řádu s jedničkovým zesílením 10
2.4 Zapojení obvodu pro měření silového napětí 11
2.5 Zesílení a filtrace signálu 11
2.6 Zapojení obvodu pro povolení průchodu řídících signálů 12

3.1 Rozmístění navržených bloků na DPS 17

A.1 Schéma zapojení obvodu řízení IPM PM50RLA120 II
A.2 Schéma zapojení proudových a napěťových snímačů III
A.3 Schéma zapojení napájecí části desky a logiky povolení spínání IV

B.1 Plošný spoj - horní vrstva spojů (TOP) VI
B.2 Plošný spoj - horní vrstva servisního potisku (SSTOP) VII
B.3 Plošný spoj - horní vrstva nepájivé masky (SMTOP) VIII
B.4 Plošný spoj - spodní vrstva spojů (BOT) IX
B.5 Plošný spoj - spodní vrstva servisního potisku (SSBOT) X
B.6 Plošný spoj - spodní vrstva nepájivé masky (SMBOT) XI
B.7 Plošný spoj - vrtací výkres (DRL) XII
B.8 Plošný spoj - kombinace horní vrstvy spojů a servisního potisku XIII

Seznam tabulek

2.1 Významné parametry výkonového modulu PM50RLA120 8
2.2 Význam signálů v blokovací logice 13

Použité zkratky

CMOS – **C**omplementary **M**etal-**O**xide-**S**emiconductor (Doplňující se kov-oxid-polovodič)
DPS – **D**eska **P**lošných **S**pojů
IGBT – **I**nsulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor (Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem)
IPM – **I**ntelligent **P**ower **M**odule (Inteligentní výkonový modul)
LCE – **L**inear **C**ombustion **E**ngine (Lineární spalovací motor)
LED – **L**ight **E**mitting **D**iode (Elektroluminiscenční dioda)
OZ – **O**perační **Z**esilovač
PWM – **P**ulse-**W**idth **M**odulation (Pulzně-šířková modulace)
TTL – **T**ransistor-**T**ransistor **L**ogic (Tranzistorově tranzistorová logika)

Kapitola 1

Úvod

Hlavním úkolem této práce je návrh a realizace výkonového a oddělovacího modulu lineárního spalovacího motoru LCE 02. Modernizace celého konceptu LCE, tedy přechod od prvního funkčního prototypu, LCE 01, k jeho výkonější variantě, LCE 02, probíhá blokově. Došlo k výměně původního lineárního motor-generátoru a k nahrazení průmyslového řídicího počítače od firmy D Space za jeho kompaktnější variantu, MicroAutoBox. Výkonový a oddělovací modul v současné struktuře LCE spojuje právě interface MicroAutoBoxu, vinutí lineárního motor-generátoru a energetickou výhybku simulující baterii. Proto je vhodné upravit i tyto moduly, aby plně vyhovovaly požadavkům celého konceptu LCE.

Výkonový modul slouží pro spínání napětí, kterým je napájeno třífázové vinutí lineárního motor-generátoru. Spínání je řízeno PWM modulací z MicroAutoBoxu. Oddělovací modul slouží pro bezpečné galvanické oddělení signálů mezi interfacem MicroAutoBoxu a výkonovým modulem. V původní koncepci LCE byly tyto dva moduly realizovány samostatně, já mám za úkol vytvořit DPS, která bude obsahovat oba moduly.

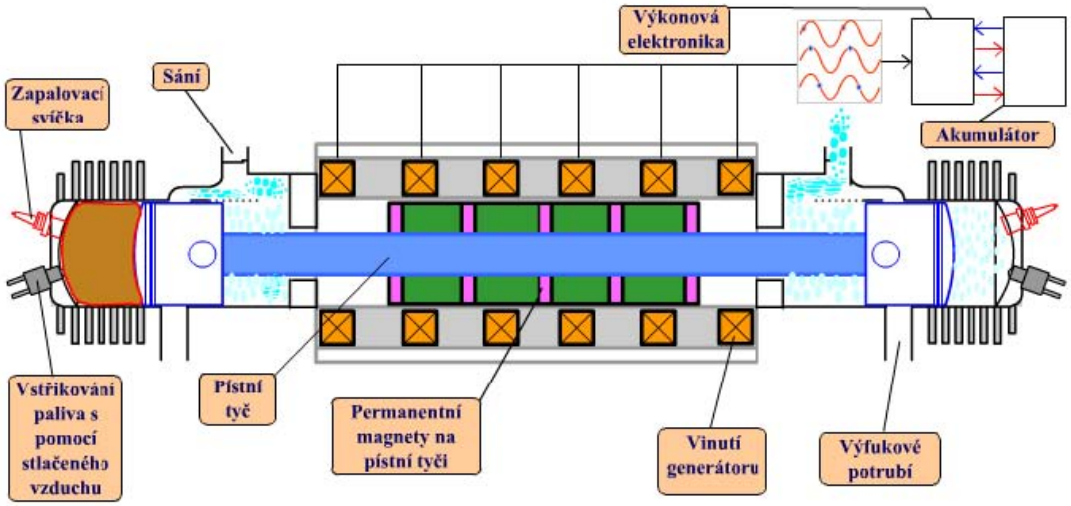
Informace týkající se LCE a připojení MicroAutoBoxu jsem čerpal z bakalářské práce [3, Interface pro spojení vývojového systému D Space MicroBox s lineárním spalovacím motorem LCE 02] Bc. Tomáše Hauberta a z osobních konzultací s jejím autorem. Ostatní informace týkající se LCE jsem čerpal z disertační práce [7, Lineární spalovací motor] Ing. Michala Šindelky, Ph.D. a z konzultací s vedoucím práce.

1.1 LCE

Lineární spalovací motor je stroj pracující jako dvoutaktní zážehový motor. Základní konstrukce je tvořena lineárním motor-generátorem a dvěma protilehlými písty. Tyto prvky jsou uspořádány v jedné linii, motor tedy vykonává pouze lineární pohyb. Výhodou tohoto uspořádání je mechanická jednoduchost, umožňující dlouhou životnost mechanických částí. Motor nemá žádnou mechanickou výstupní hřídel, jeho výstupem je přímo elektrická energie.

1.1.1 Princip činnosti

Schéma motoru je na obrázku 1.1. Během činnosti LCE je píst např. na levé straně urychlován výbuchem směsi paliva v levém válci na pravou stranu. Uvolněná energie je spotřebována kompresí nasáté směsi vzduchu s palivem v pravém válci a mechanickými ztrátami. Zbytek uvolněné energie je odveden ve formě řízeného odběru elektrické energie z vinutí generátoru tak, aby se pístní tyč zastavila ve správné pozici a nenarazila do pravého válce. Následně dochází k zapálení směsi v pravém válci a celý cyklus se periodicky opakuje. Při spouštění LCE a v případě vynechání zápalu směsi se lineární motor-generátor přepne do motorického režimu a využije se akumulované energie. Více o principu činnosti LCE lze najít v [1] a v [7].



Obrázek 1.1: Schéma lineárního spalovacího motoru

1.1.2 Zapojení výkonový modul – motor-generátor

Jak je naznačeno na obrázku 1.1, lineární motor-generátor má dvě trojfázová vinutí (na obrázku nad a pod pístní tyčí). Tato vinutí je možno spojit paralelně nebo sériově a následně připojit k výkonovému modulu. Během zkušebního provozu LCE došlo k několika výpadkům, které byly pravděpodobně způsobeny spínáním příliš velkého výkonu. Jako řešení se nabízí možnost vyrobit dva exempláře desky a připojit každé vinutí zvlášť. Pak bude možné ovládat oba moduly najednou stejnými řídícími signály, případně každý zvlášť. Rozhodnutí o nutnosti použití dvou exemplářů a konečném zapojení bude provedeno po otestování a zkoušce desky v provozu.

1.2 MicroAutoBox

MicroAutoBox je real-time systém pro vykonávání rychlých funkcí, který může operovat bez uživatelského zásahu. Jedná se o kompaktní, nezávislou řídicí jednotku, která se využívá k vývoji, testování a optimalizaci řídících algoritmů v reálném čase. Jeho robustní a kompaktní design je navržen pro instalaci do automobilů. Program je uložen v energeticky nezávislé paměti a rozběhne se po připojení napájecího napětí. Konstrukci MicroAutoBoxu si můžete prohlédnout na obrázku 1.2

Obrázek 1.2: MicroAutoBox

Kapitola 2

Návrh zapojení

V této kapitole bude popsán postup při návrhu obvodového zapojení. Vycházel jsem z diplomové práce [6, Řídicí jednotka pro asynchronní motory pro trakční provoz] Ing. Wladyslawa Sikory, který v ní navrhl desku pro obecné řízení třífázových motorů. Mým úkolem bylo tento návrh zpracovat a upravit tak, aby vyhovoval současné struktuře LCE.

2.1 Upřesnění zadání

Upřesnění zadání vychází z konzultací s vedoucím práce a s Bc. Tomášem Haubertem, autorem interface MicroAutoBoxu. Hlavní cílem je navrhnout a realizovat DPS, která nahradí výkonový a oddělovací modul v původní struktuře LCE. Detailní požadavky návrhu se dají zformulovat následujícími body:

- **Výkonový modul**
  - Základní spínací prvek – výkonový modul Mitsubishi **PM50RLA120**.
- **Vstupní signály**
  - 6 vstupů pro řízení spínání horních a spodních tranzistorů můstku.
  - 1 vstup pro řízení spínání tranzistoru určeného k brždění.
  - 1 vstup pro nastavení chybového stavu – SD.
  - 1 vstup pro odstranění chybového stavu – FTCLR.
  - Všechny vstupy jsou binární, úrovně jsou v mezích TTL, aktivní jsou v LOW.
- **Výstupní signály**
  - Signalizace chyby nebo nefunkčnosti obvodu (binární výstup).
  - 4 signály interpretující úroveň proudů jednotlivých fází výkonové části a proudu celkového.
  - 1 signál odpovídající velikosti silového napětí.
  - Výstupní signály budou v rozsahu 0-5V.

- **Napájení**
  - Obvod bude napájen ze stejnosměrného zdroje 12V.
- **Galvanické oddělení**
  - Všechny vstupy a výstupy musí být galvanicky oddělené od silové části.
- **Ostatní požadavky**
  - Plošný spoj navrhněte tak, aby bylo možné v případě nutnosti použít zároveň dva exempláře této desky.
  - Obvod by měl být dále schopný měřit teplotu chladiče výkonového modulu a na základě její hodnoty případně řídit otáčky ventilátorů.
- **Použití obvodu**
  - Deska bude sloužit pro řízení lineárního spalovacího motoru.

Z těchto požadavků jsem vyšel a po prostudování diplomové práce [6] jsem dospěl k těmto nutným úpravám:

- **Odstranění „dead time“ logiky** – tento blok prováděl kontrolu vhodné kombinace spínacích signálů, případně tyto signály posunuval, aby byly dodržené bezpečné intervaly při přepínání tranzistorů jedné větve. Logika byla v návrhu opodstatněna použitím při řízení obecným zdrojem řídících signálů. V projektu LCE je ale k řízení použit moderní software i hardware, který zvládne ošetřit bezpečné spínání sám, a proto není nutné tento blok zahrnout.
- **Měření napětí a proudů** – MicroAutoBox je schopný zpracovat analogové signály v rozsahu 0-5V, proto bylo nutné upravit úrovně výstupních signálů z $\pm 15V$ na 0-5V. Dále bylo potřeba přizpůsobit parametry filtrace signálu.
- **Nahrazení pomocného procesoru** – procesor byl určen pro vyhodnocení chybových signálů z modulu, povolování průchodu řídicích spínacích signálů a pro měření teploty chladiče, na základě které dále řídil otáčky ventilátoru. Použití procesoru nabízí možnost zpracovávat některé signály a upravovat tak chování desky. Naprogramování je ale poměrně náročné a možnost jeho využití na desce malá, proto jsem se rozhodl nahradit ho logickými obvody.
- **Upravení napájení** – blok napájení jsem upravil tak, aby bylo desku možné napájet z interface MicroAutoBoxu, ale zároveň bylo možné ji připojit i k samostatnému zdroji napětí.
- **I/O konektory** – je potřeba použít konektory kompatibilní s interfacem MicroAutoBoxu.
- **Zlepšení „layoutu“** – pokusil jsem se navrhnout lepší layout desky. Důvodem byly změny uvedené výše a také potřeba dodržet bezpečné izolační vzdálenosti.

2.2 Popis výkonového modulu PM50RLA120

Modul PM50RLA120 od firmy Mitsubishi patří do skupiny inteligentních výkonových modulů (IPM). Jedná se o základní prvek, na kterém je návrh postaven. Následující údaje vycházejí z technické dokumentace výrobce, které lze nalézt v [4]. Rozsáhlejší aplikační informace jsou v [5] a jsou společné pro celou řadu L těchto modulů.

2.2.1 Vnitřní struktura

Na obrázku 2.1 je zobrazena vnitřní bloková struktura modulu. V podstatě se jedná o šestici výkonových IGBT tranzistorů v můstkovém zapojení. Jednotlivé dvojice tranzistorů zapojených v sérii tvoří tři větve, které jsou připojené ke vstupnímu napětí. Vodiče spojující každou dvojici tranzistorů jsou vyvedené na výstup. Obvod má pak dvě silové „vstupní“ svorky pro přivedení napájení a 3 „výstupní“ pro připojení zátěže (motoru). Kromě toho je v modulu umístěný i „brzdící“ tranzistor, který lze, jak už název napovídá, použít k brždění nebo pohlcení nadbytečné akumulované energie ve zdroji. Podrobnějším popisem významu rekuperačních diod či principu funkčnosti třífázového spínacího můstku se zde zabývat nebudu, zájemci jej můžou najít např. v [8, kapitola 9.7].

Bloky, k nimž jsou tranzistory připojené, představují obvody, které zajišťují v první řadě spínání tranzistorů, ale jsou v nich i ochrany proti zkratu[1], proti proudovému a tepelnému přetížení a detekci úrovně napájecího napětí v povolených mezích (napájení bloku).

Aby mohl obvod spolehlivě pracovat, je nutné zajistit galvanicky oddělené napájení jednotlivých spínacích bloků. Z obrázku je vidět, že celkem je zapotřebí 4 zdrojů. 3 jsou určené pro napájení bloků pro spínání horních tranzistorů a čtvrtý se využívá jako společný zdroj pro bloky spodních tranzistorů a brždění. Důvodem pro toto oddělení je především složitost sepnutí horního tranzistoru, u kterého je zapotřebí vygenerovat spínací puls s vyšším potenciálem hradla než je potenciál kolektoru, který je jen o něco málo menší než potenciál silového napájení.

2.2.2 Chybové stavy

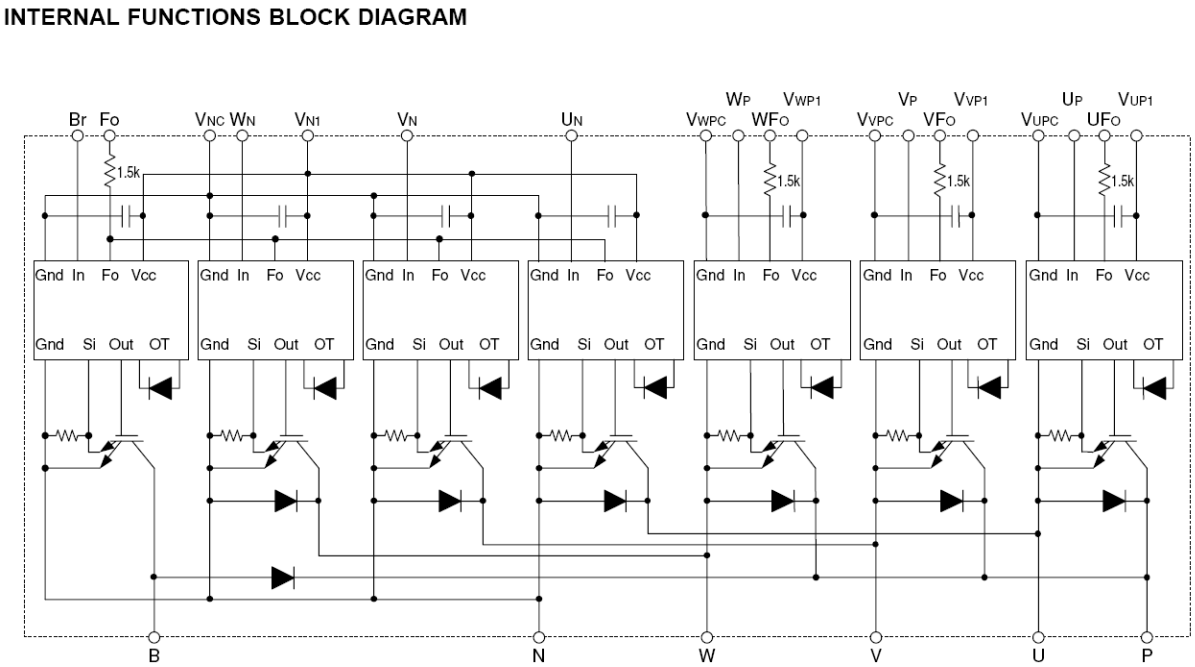
V modulu jsou umístěné čtyři typy ochran, díky kterým je schopen detekovat zkrat, překročení maximálního povoleného proudu, tepelné přetížení a překročení povolených mezních napájecích napětí.

Výše zmíněné chybové stavy jsou detekovány jedním výstupem. Na obrázku 2.1 jsou označené UFo, VFo, WFo a Fo. Horní 3 tranzistory mají chybové výstupy vlastní[2] – UFo, VFo, WFo, spodní tranzistory a brzdící tranzistor pak čtvrtý, společný výstup Fo. Při detekci chyby tedy není možné určit o jakou chybu se jedná, jde pouze o signalizaci nadřazenému obvodu, aby nějakým způsobem zareagoval.

Za zmínku stojí i chování modulu po zapnutí, resp. po signalizaci chyby. V těchto případech nejsou tranzistory sepnuté! Když je na vstupu obvodu požadavek na sepnutí, dojde k vygenerování chybového impulsu, po kterém již tranzistor není sepnut, i když je na vstupu stále aktivní požadavek na sepnutí. K následnému sepnutí dojde až po

[1] Při chybném sepnutí obou tranzistorů v jedné větvi nebo při přemostění jednoho z tranzistorů téže větve v době, kdy je druhý sepnutý, by došlo ke zkratu.

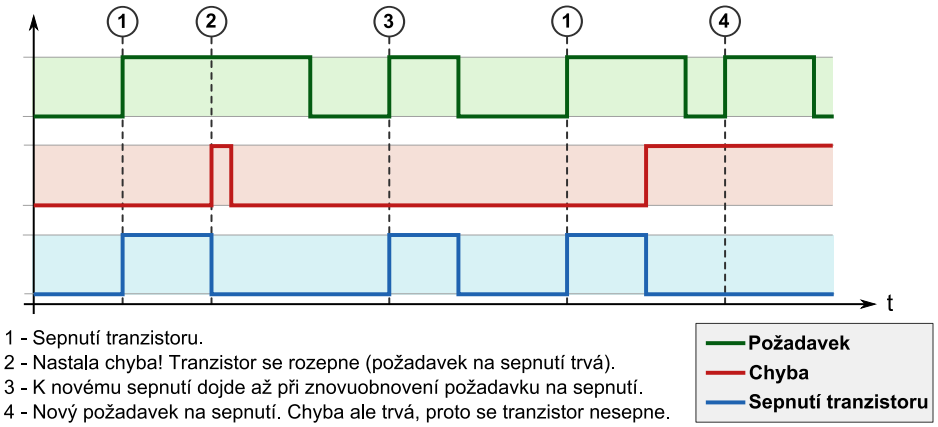
[2] Horní tranzistory mají galvanicky oddělené napájecí zdroje spínací logiky.



Obrázek 2.1: Vnitřní bloková struktura modulu PM50RLA120

přechodu požadavku z neaktivního do aktivního stavu. Popsané možnosti jsou znázorněné na obrázku 2.2.

Chování obvodu po zapnutí je obdobné, jako v době po detekci chyby. Po zapnutí se totiž aktivují všechny chybové stavy (dá se vysvětlit i nárůstem napájecího napětí), které po odeznění, v případě aktivního požadavku, zamezí sepnutí tranzistoru.



Obrázek 2.2: Příklad způsobu odpojení tranzistoru při detekci chyby

2.2.3 Přehled důležitých parametrů

V tabulce 2.1 jsou vypsány některé důležité omezující parametry modulu. Kompletní výpis parametrů je k nahlédnutí v dokumentaci [4].

Kromě omezujících hodnot napětí a proudu jsou zajímavými údaji doby potřebné pro sepnutí a vypnutí tranzistoru, které je potřeba zohlednit při samotném řízení invertoru. Tyto doby jsou taktéž úzce spjaty s maximální spínací frekvencí ($\leq 20kHz$). Přechodové děje při sepnutí a rozepnutí jsou totiž časové intervaly, kdy dochází k největšímu ohřevu tranzistoru. Pokud bychom vycházeli pouze z maximálních hodnot t_{ON-MAX} a $t_{OFF-MAX}$, mohli bychom říci, že omezující frekvence spínání je rovna $1/t_{ON-MAX} + t_{OFF-MAX}$, tedy cca. $180kHz$. Tato frekvence je ovšem prakticky nepoužitelná, protože by byl poměr mezi energiemi spotřebovanými na tranzistorech (teplo) a zátěži příliš velký a docházelo by k neúměrnému zahřívání modulu. Energetické ztráty v sepnutém stavu pak určuje velikost saturačního napětí a aktuálního proudu.

Maximální spínací napětí invertoru (trvalé):	**800**	**V**
Maximální spínací napětí invertoru (krátkodobě):	**1000**	**V**
Izolační napětí (střídavé, 60Hz, sinus, < 1 min):	**2500**	**Vrms**
Maximální proud tranzistorem (trvalý):	**50**	**A**
Maximální proud tranzistorem (krátkodobě):	**100**	**A**
Maximální proud při brždění (trvalý):	**25**	**A**
Maximální proud při brždění (krátkodobě):	**50**	**A**
Maximální proud diodou u brzdy (trvalý):	**25**	**A**
Typické/maximální saturační napětí na tranzistoru ($I_C = 50A$):	**1.8/2.4**	**V**
Napájecí napětí spínací logiky:	**15 ±1.5**	**V**
Maximální napájecí napětí logiky:	**20**	**V**
Horní mez spínací frekvence:	**≤ 20**	**kHz**
Typická/maximální doba sepnutí t_{ON} ($I_C = 50A$):	**1.0/2.5**	**μs**
Typická/maximální doba vypnutí t_{OFF} ($I_C = 50A$):	**2.0/3.0**	**μs**

Tabulka 2.1: Významné parametry výkonového modulu PM50RLA120

2.3 Blokový koncept obvodu

Návrh obvodu lze rozdělit do tří oddělených bloků:

1. **IPM – podpůrný obvod** – jedná se o část obvodu, která zajišťuje napájení modulu, připojení galvanicky oddělených řídicích vstupů pro spínání tranzistorů, jejich bezpečnostní blokování a přenos výstupních chybových signálů.

2. **Měření napětí a proudů** – blok určený ke snímání proudů a měření napětí silového zdroje.

3. **Napájení** – vstupní napětí je v tomto bloku stabilizováno na +5 a $+12V$.

2.4 Obvody pro připojení IPM

Návrh periferních obvodů pro připojení výkonového modulu vychází především z aplikační dokumentace (viz [5]), ve které je doporučené zapojení.

Výsledné navržené schéma tohoto bloku najdete v příloze A.1, na straně II. Schéma neobsahuje pouze periferní obvody pro připojení modulu, ale i další části navržené pro úplný přenos signálu ze vstupu na výstup. Celkem zde řeším tato zapojení:

- Galvanické oddělení vstupů a indikace signálu
- Bezpečnostní blokování průchodu signálů (Enable) a buzení výstupu
- Galvanické oddělení signálů pro připojení k modulu
- Napájení spínacích bloků modulu (galvanicky oddělené)
- Signalizace a přenos chybových signálů

2.4.1 Galvanické oddělení vstupů

Galvanické oddělení vstupů jsem převzal z návrhu v [6].

2.4.2 Blokování průchodu signálů a buzení výstupu

V popisu modulu je uvedeno, že po připojení obvodu k napájení nebo po vzniku chyby jsou výkonové tranzistory odpojeny. Chyba ovšem zpravidla rychle odezní (vypnutí po zkratu nebo přetížení) a obvod přejde do provozního stavu. Tak může opakovaně docházet ke stejné chybě, což může negativně ovlivnit životnost (případně i funkčnost) modulu. Proto je nutné zavést blokovací signál, který umožní výkonový modul zabezpečit před nevhodným spínáním.

Signály řídící spínání všech tranzistorů jsou připojeny k neinvertujícímu budiči **74HCT541** (dokumentace viz přiložené CD: *Datasheet/74HCT541.pdf*). Použít budič sběrnice je vhodné pro zlepšení vlastností signálu z optického oddělovače. Na oba povolovací vstupy budiče je připojen signál Enable, který je aktivní v LOW. Je-li tedy Enable na úrovni HIGH, jsou všechny výstupy budiče ve stavu vysoké impedance – OFF.

2.4.3 Galvanické oddělení signálů pro připojení k modulu

Galvanické oddělení signálů pro připojení k modulu jsem převzal z návrhu v [6].

2.4.4 Napájení spínacích bloků modulu

Napájení spínacích bloků modulu jsem převzal z návrhu v [6].

2.4.5 Signalizace a přenos chybových signálů

Připojení chybových signálů jsem převzal z návrhu v [6].

2.5 Měření napětí a proudů

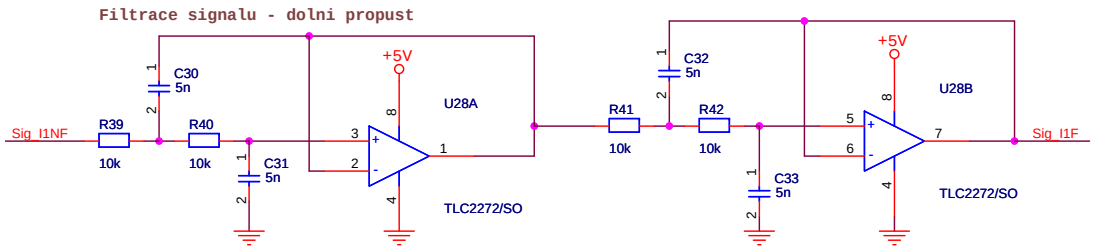
Obvody pro měření napětí a proudů jsem převzal z návrhu v [6]. Bylo je ale potřeba upravit, aby výstupní signál byl v mezích 0-5V. Upravil jsem také filtraci signálu, která byla původně nastavená na špatnou zlomovou frekvenci.

2.5.1 Měření proudů

Zapojení proudového senzoru jsem upravil tak, aby jeho nominální rozsah byl $\pm 12A$, čemuž odpovídá nominální výstup 2,5±0,600V. V tomto zapojení má senzor měřící rozsah $\pm 40A$. Výstup z použité proudové sondy je v rozmezí 0,5-4,5V, takže tento signál není potřeba dále zesilovat. OZ tedy mohu použít výhradně k filtraci signálu, pouze je potřeba nahradit původní OZ za nesymetricky napájené 0-5V. Po konzultaci s vedoucím práce jsem vybral OZ **TLC2272** (dokumentace viz přiložené CD: *Datasheet/tlc2272.pdf*).

Filtrace signálu

Filtr jsem zvolil čtvrtého řádu, typu Butterworth. Zapojení je zobrazeno na obrázku 2.3. Hodnoty odporů a kondenzátorů filtru jsem nejprve vypočítal podle [8, kapitola 4.1] a poté upravil na základě simulací v programu MultiSim od National Instruments podle následujících požadavků: užitečný signál je sinusovka o frekvenci kmitání pístní tyče LCE (přibližně 200 Hz) a rušení, které je potřeba odfiltrovat, bude o frekvenci PWM (přibližně 20 kHz).

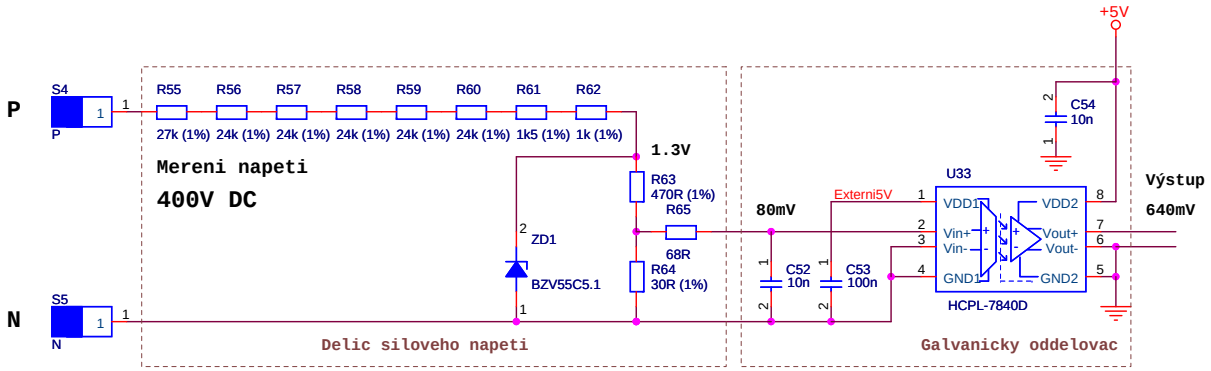


Obrázek 2.3: Upravené Sallen-Key zapojení filtru 4. řádu s jedničkovým zesílením

2.5.2 Měření napětí

Na obrázku 2.4 je v levé části vidět zapojení děliče. Velikost a počet odporů jsem volil s ohledem na kombinaci možných hodnot řady E24 a na výkonové zatížení vzhledem k použitým pouzdrům. Pro lepší ochranu vstupu oddělovače jsem navíc zařadil zenerovou diodu, která zajistí, aby se na vstup nedostalo napětí větší než cca 300mV (dioda se aktivuje až při napětí zdroje převyšujícím hodnotu 1500V). Pro napětí 400V je na výstupu děliče 80mV.

Pro galvanické oddělení naměřené hodnoty jsem použil analogový optický převodník **HCPL7840** (dokumentace viz přiložené CD: *Datasheet/Optoclen_HCPL7840.pdf*). Jedná se o převodník pracující na principu převodu vstupního signálu na digitální signál, který je optočlenem galvanicky oddělen a na výstupu je znovu pomocí dolnopropustního filtru převeden na analogový signál. Minimální izolační napětí je 2500V_{rms}.

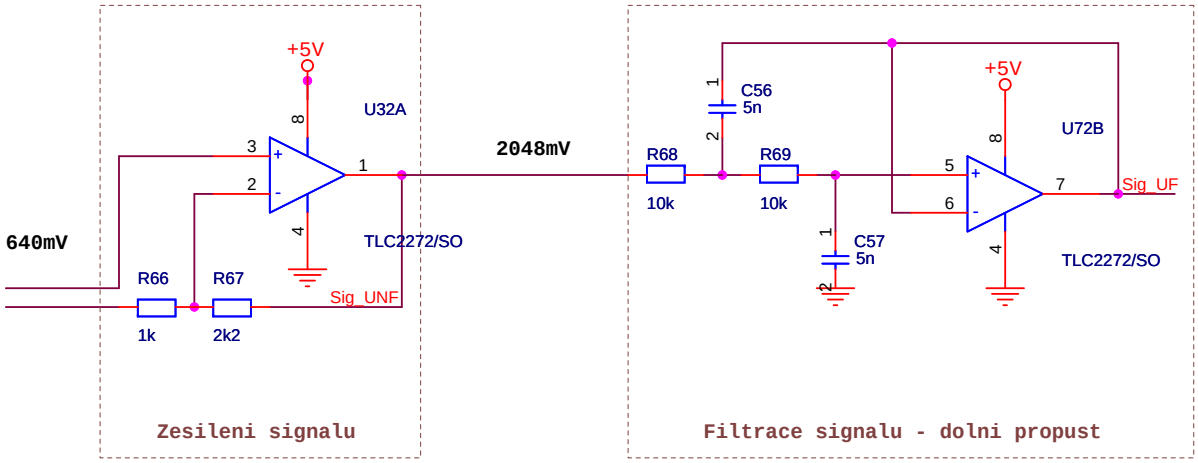


Obrázek 2.4: Zapojení obvodu pro měření silového napětí

Analogový převodník se ale musí napájet na obou stranách. Z druhé strany, kde se bude signál zpracovávat, jej budeme napájet centrálním napětím $5V$. V silové části budeme převodník napájet externím napětím $5V$, které získáme z desky interface MicroAutoBoxu.

Výstupní diferenční signál z analogového oddělovače je zesílen OZ v neinvertujícím zapojení se zesílením 3,2. Zesílení optočlenu je rovno 8. Pro $400V$ na vstupu, je na výstupu napětí $2{,}048V$. Měřitelné maximum se tak pohybuje okolo $1000V$.

Na výstup je připojen stejný filtr, který jsem použil pro filtraci proudu, ale pouze druhého řádu.



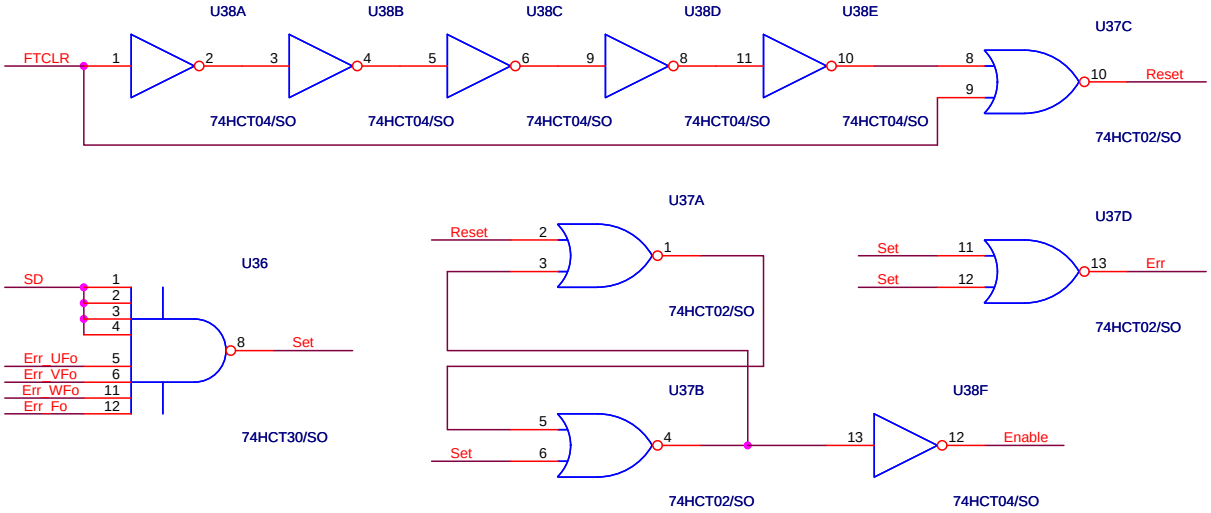
Obrázek 2.5: Zesílení a filtrace signálu

2.6 Nahrazení funkce procesoru

2.6.1 Řízení chlazení

Rozhodl jsem se, že sekci řízení otáček ventilátoru vynechám. Z napájení vyvedu pouze dva 3-pinové molexy pro klasické připojení $12V$ ventilátorů. Pro chlazení předpokládám použití ventilátoru Pro TC od firmy Arctic Cooling se zabudovaným automatickým řízením otáček podle teploty.

2.6.2 Obsluha chybového stavu a povolení průchodu řídících signálů



Obrázek 2.6: Zapojení obvodu pro povolení průchodu řídících signálů

Jádrem obsluhy je RS klopný obvod vytvořený ze dvou hradel NOR, který uchovává informaci o chybovém stavu. Na vstupech jsou signály Set a Reset, signál Enable je znegovaný výstup RS hradla. Jak bylo popsáno v kapitole 2.4.5, modul má 4 chybové signály. Signál SD umožňuje nastavit chybový stav externě. Pomocí osmivstupového NANDu sjednotím tyto signály v jeden - signál Set. Signál FTCLR slouží pro odstranění chybového stavu. Tento signál přivedu na detektor spádové hrany, který z libovolně dlouhého signálu vytvoří velmi krátký impuls - signál Reset. Důvodem je chování RS obvodu při aktivním signálu FTCLR - v tomto případě by každý chybový signál nastavil chybový stav, ale okamžitě po odeznění chybového signálu by došlo k resetování chyby signálem FTCLR. Toto chování by mohlo vést ke snížení životnosti, a proto jsem ho ošetřil výše zmíněným detektorem spádové hrany. Jeho impuls postačuje k resetu RS hradla a zaručí, že zresetuje pouze aktuální chybu, ale neovlivní chyby budoucí.

Signál	LOW	HIGH
FTCLR	reset chybového stavu[3]	-
SD	nastavení chybového stavu	-
Err_UFo	chyba nastala	-
Err_VFo	chyba nastala	-
Err_WFo	chyba nastala	-
Err_Fo	chyba nastala	-
Enable	spínání povoleno	spínání blokováno

Tabulka 2.2: Význam signálů v blokovací logice

2.7 Napájecí část

Napájecí část jsem upravil podle návrhu v [3]. Tato část obsahuje stabilizátory, které ze vstupního napětí vyrábí požadovaná napětí ($+5V$ a $+12V$). Napájení se přivádí na svorkovnici J6. Dále je zapojena pojistka 1A, varistor P6KE15CA (krátkodobá ochrana proti přepětí) a dioda indikující stav pojistky. Za pojistkou jsou zapojeny paralelně dva bloky stabilizující požadované úrovně napájení. Použil jsem klasické stabilizátory 78xx v pouzdrech TO220. Chlazení těchto stabilizátorů jsem vyřešil tak, že na desce jsou pouze konektory a samotné stabilizátory budou připevněné na chladiči výkonového modulu. Blok, jehož výstupem je napětí $+12V$, je doplněn přepínačem SW6, který určuje, zda se bude napětí $+12V$ brát přímo z napájecího napětí, nebo ze stabilizátoru. Tento přepínač je realizován jako 3 pájecí plošky, z nichž se dvě propojí cínem. Oba napěťové výstupy jsou opět doplněny LED diodami, indikujícími funkčnost stabilizátorů.

[3]Reset chybového stavu vyvolá pouze spádová hrana HIGH-LOW

Kapitola 3

Návrh desky plošných spojů

Po dokončení návrhu schématu elektrického obvodu v programu Capture následuje přechod k návrhu DPS a samotný návrh v programu Layout. Vycházel jsem z postupu uvedého v [6] a dále jsem použil poznatky z literatury [9] a [10]. Pro kontrolu pouzder jsem použil [2].

3.1 Příprava schématu pro vygenerování „netlistu“

Po dokončení návrhu v programu OrCAD Capture je potřeba výsledná schémata zkontrolovat, aby bylo možné vygenerovat speciální soubor („netlist“), který obsahuje data potřebná pro program OrCAD Layout, ve kterém budu plošný spoj navrhovat.

Kontrola označení a číslování součástek

Při návrhu schématu došlo k automatickému očíslování součástek. Aby čísla více odpovídala blokové koncepci, provedl jsem přečíslování ručně. Návrh je tak dle mého názoru přehlednější. Rovněž byla provedena ještě jedna celková kontrola nastavených hodnot součástek a výpočtů, podle kterých byly při návrhu stanoveny.

Porovnání dostupných typů pouzder

V dalším kroku bylo nutné zkontrolovat, v jakých pouzdrech jsou součástky u distributorů dostupné (základní kontrola dostupnosti byla provedena už při výběru součástek během návrhu).

Příprava knihoven pouzder a přiřazení k součástkám

Na základě předchozího bodu jsem si připravil knihovny pouzder součástek. Většina součástek se nacházela v knihovně z [6] nebo v již připravených knihovnách. Některá pouzdra jsem musel mírně upravit. Všechna upravená nebo nově navržená pouzdra jsou uložena v knihovně *bp.llb*, kterou naleznete na přiloženém CD (*OrCAD/Knihovny/bp.llb*).

Po přípravě se pouzdra přiřadí ve schématu k odpovídajícím součástkám a vygeneruje „netlist“.

3.2 Příprava před „routováním“

Po vygenerování „netlistu“ se můžeme přesunout k programu OrCAD Layout, ve kterém se bude deska navrhovat. Po úspěšném načtení se musí stanovit základní kritéria návrhu:

- **Třída přesnosti** – Třídu přesnosti volím č. 4[1].
- **Počet vrstev** – Součástky budou propojovány ve dvou vrstvách (TOP a BOTTOM).
- **Rozměry desky** – Orientační tvar jsem převzal z rozměrů desky z [6]. Při rozmísťování součástek jsem tvar upravil, aby lépe vyhovoval mému návrhu.
- **Rozmístění jednotlivých částí obvodu** – Rozmístění výkonových svorek a konektoru pro řízení předurčuje umístění jednotlivých bloků návrhu. Podrobnější popis rozmístění bude uveden v následující kapitole 3.3.

3.3 Rozmístění bloků návrhu

Na obrázku 3.1 jsou vyznačené oblasti, ve kterých jsou zapojené jednotlivé bloky obvodu.

Hnědá oblast:

Je umístěna v levém horním rohu desky. Jedná se o napájecí část se stabilizátory $+5V$ a $+12V$[2]. Dále se zde nachází konektory pro napájení ventilátorů chladiče.

Žlutá oblast:

Vstupní a výstupní konektory pro spojení s interfacem MicroAutoBoxu. Jedná se o dva vzájemně propojené „vstupní“ konektory pro řídící signály a chybový signál.

Červená oblast:

Logika pro blokování spínání.

Zelená oblast:

Jde o blok s obvody zajišťující napájení a přívod signálů do spínacích obvodů invertoru. Na tuto část jsou kladeny zvýšené nároky pro zabezpečení galvanického oddělení.

Modrá oblast:

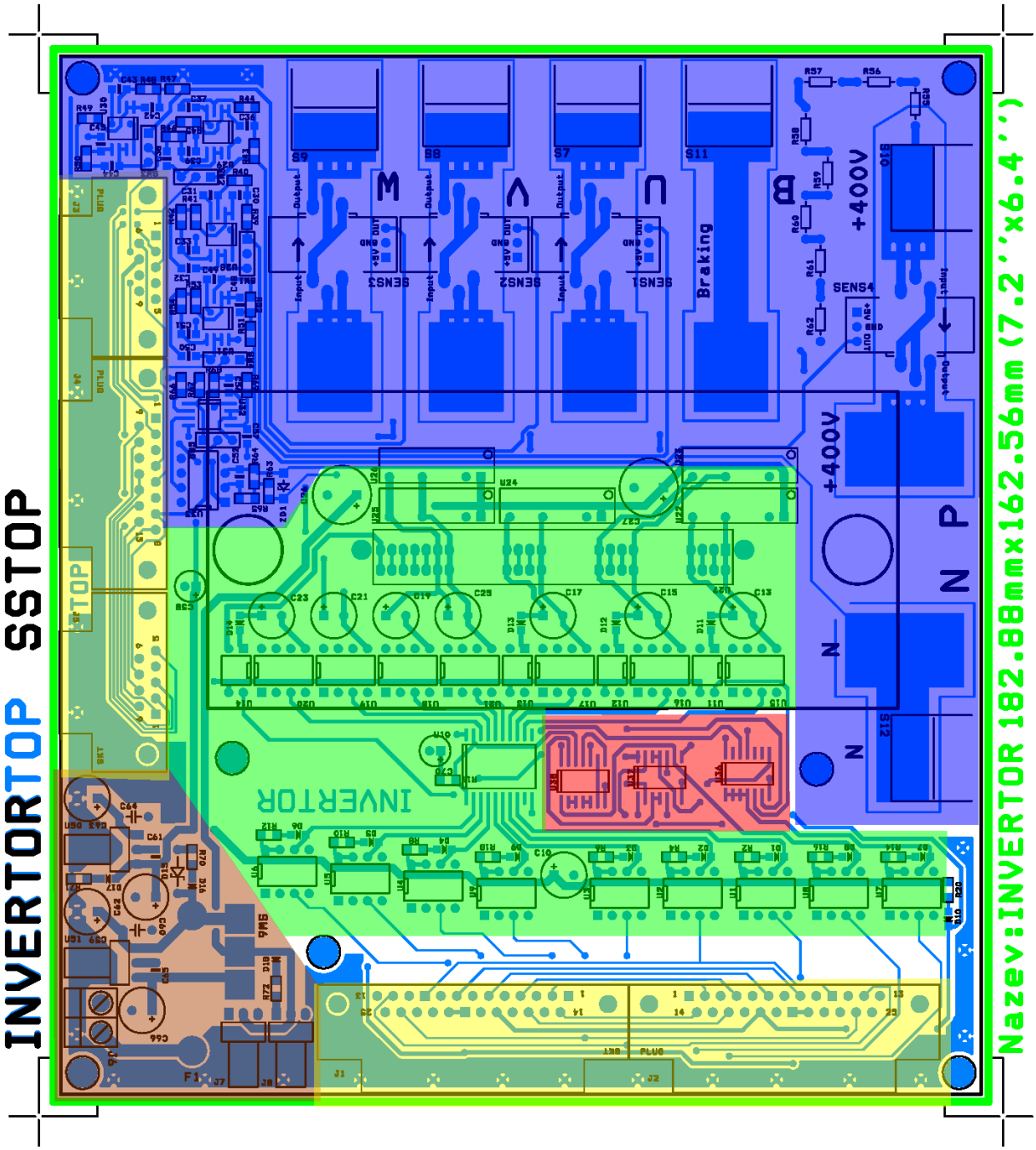
Obsahuje zapojení senzorů a zpracování jejich signálů. Vedle svorek s výkonovým napájením je umístěn napěťový dělič. Odpory, na kterých vzniká velký úbytek napětí, jsou voleny v klasických pouzdrech s dovoleným ztrátovým výkonem $0.6W$, aby se docílilo větší vzdálenosti mezi vývody, navíc by u SMD pouzdra došlo k překročení dovolené výkonové ztráty.

[1] Podrobnější informace v [9, strana 217]

[2] Samotné obvody stabilizátorů jsou ve skutečnosti umístěny na chladiči výkonového modulu a k desce jsou připojeny pomocí molexových konektorů.

3.4 Všeobecná pravidla propojování

- Napájecí napětí není nijak odrušené tlumivkami, proto je kladen důraz na oddělené napájení jednotlivých bloků.
- Po celé oblasti plošného spoje jsou rozmístěné elektrolytické blokovací kondenzátory. Téměř každý integrovaný obvod obsahuje navíc blokovací keramický kondenzátor, který je s napájecími nožičkami spojen minimální vzdáleností.
- Výkonové cesty jsou opatřeny potenciálovými valy, které by měly zvýšit izolační napětí (předpoklad vychází ze závislosti napětí oblouku na vzdálenosti od vodivé části).
- K plátování desky bude použito zesílené měděné vrstvy $70\mu m$.
- Silové spoje jsou vedené zrcadleně v obou vrstvách plošného spoje, aby se zvýšila proudová zatížitelnost vedení.



Obrázek 3.1: Rozmístění navržených bloků na DPS

Kapitola 4

Závěr

Během své práce jsem provedl kompletní návrh zapojení obvodu a desky plošných spojů pro řízení invertoru LCE.

Před návrhem schématu jsem se seznámil se stávajícím řídicím systémem, se způsobem komunikace mezi moduly, s MicroAutoBoxem a jeho interface. Vzhledem k tomu, že deska musí být plně kompatibilní s ostatními moduly LCE, jsem návrh několikrát konzultoval s vedoucím práce. Během návrhu jsem se seznámil s prostředím programu OrCAD firmy Cadence, konktrétně s jeho částmi Capture, Layout, PSpice A/D a GerbTool. V těchto programech jsem provedl kompletní návrh, simulace a kontrolu chyb. Pouze simulace týkající se senzorů jsem provedl v programu Multisim od National Instruments.

Po dokončení návrhu desky plošných spojů byla deska poslána do výroby, následně bude osazena součástkami a „oživena“.

Bakalářská práce byla řešena v rámci projektu lineárního spalovacího motoru. Více o projektu se lze dozvědět na webových stránkách projektu [1].

Literatura

[1] *Webové stránky projektu LCE.* 2009, [online] (http://www.lceproject.org/).

[2] Cadence: *Orcad Layout Footprint Libraries.* 2000.

[3] HAUBERT, T.: *Interface pro spojení vývojového systému D Space MicroBox s lineárním spalovacím motorem LCE 02.* Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, 2008.

[4] MITSUBISHI ELECTRIC: *Dokumentace k modulu PM50RLA120.* 2005, [online] (http://www.mitsubishichips.com/) [CD-ROM] (Datasheet/Invertor_PM50RLA120_Obecne_info.pdf).

[5] MITSUBISHI ELECTRIC: *Aplikační poznámky k L-kové řadě IPM.* 2006, [online] (http://www.mitsubishichips.com/) [CD-ROM] (Datasheet/Invertor_Popis_L_serieModulu.pdf).

[6] SIKORA, W.: *Řídící jednotka pro asynchronní motory pro trakční provoz.* Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze, 2007.

[7] ŠINDELKA, M.: *Lineární spalovací motor.* Dizertační práce, České vysoké učení technické v Praze, 2006.

[8] VYSOKÝ, O.: *Elektronické systémy II.* Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003, ISBN 80-01-02658-2.

[9] ZÁHLAVA, V.: *OrCAD 10.* Praha: Grada Publishing, a.s., 2004, ISBN 80-247-0904-X.

[10] ZÁHLAVA, V.: *Návrh a konstrukce desek plošných spojů.* Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, ISBN 80-01-03351-1.

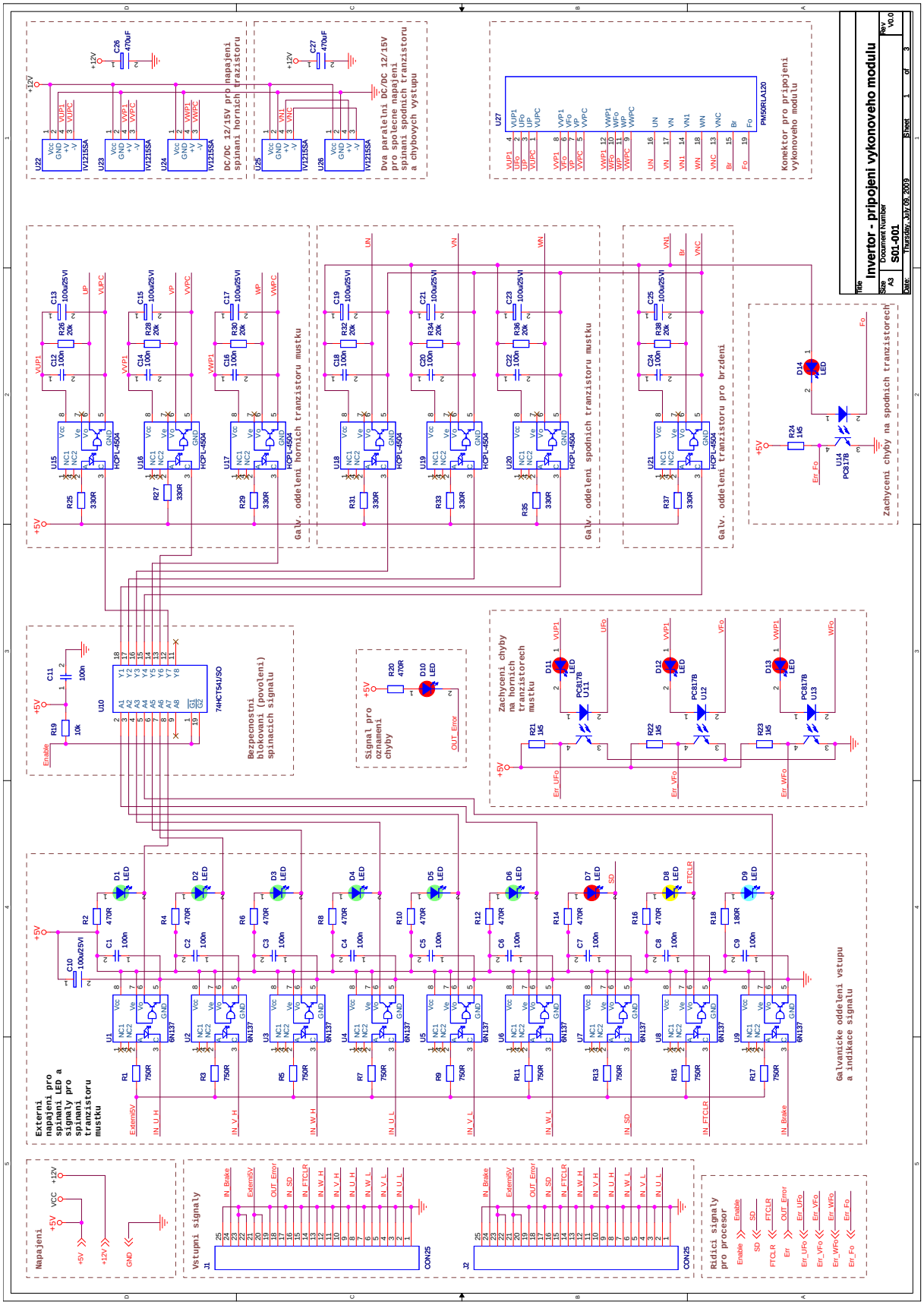
Příloha A

Schémata navrženého zapojení

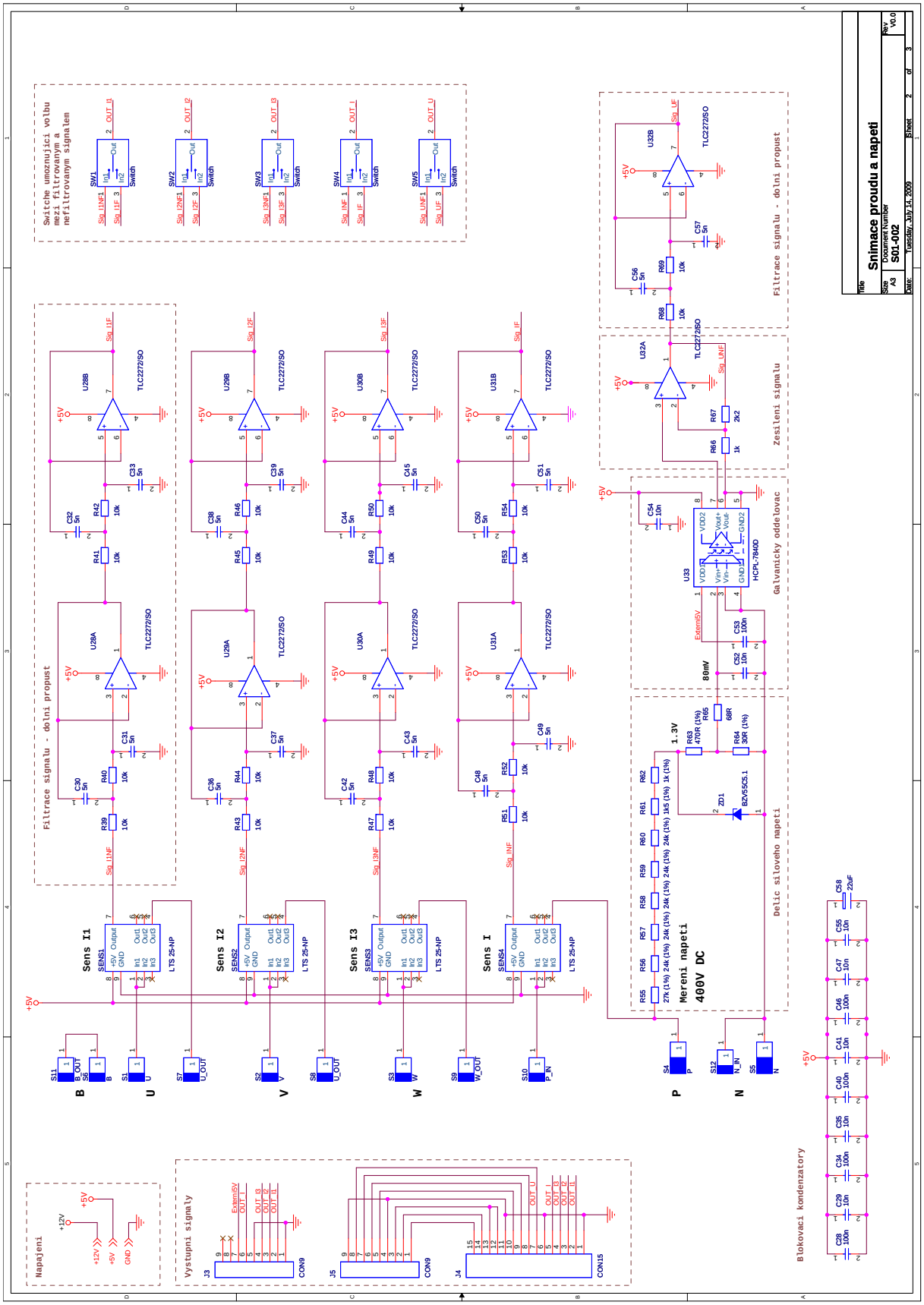
S01-001 – Invertor – připojení výkonového modulu

S01-002 – Snímače proudu a napětí

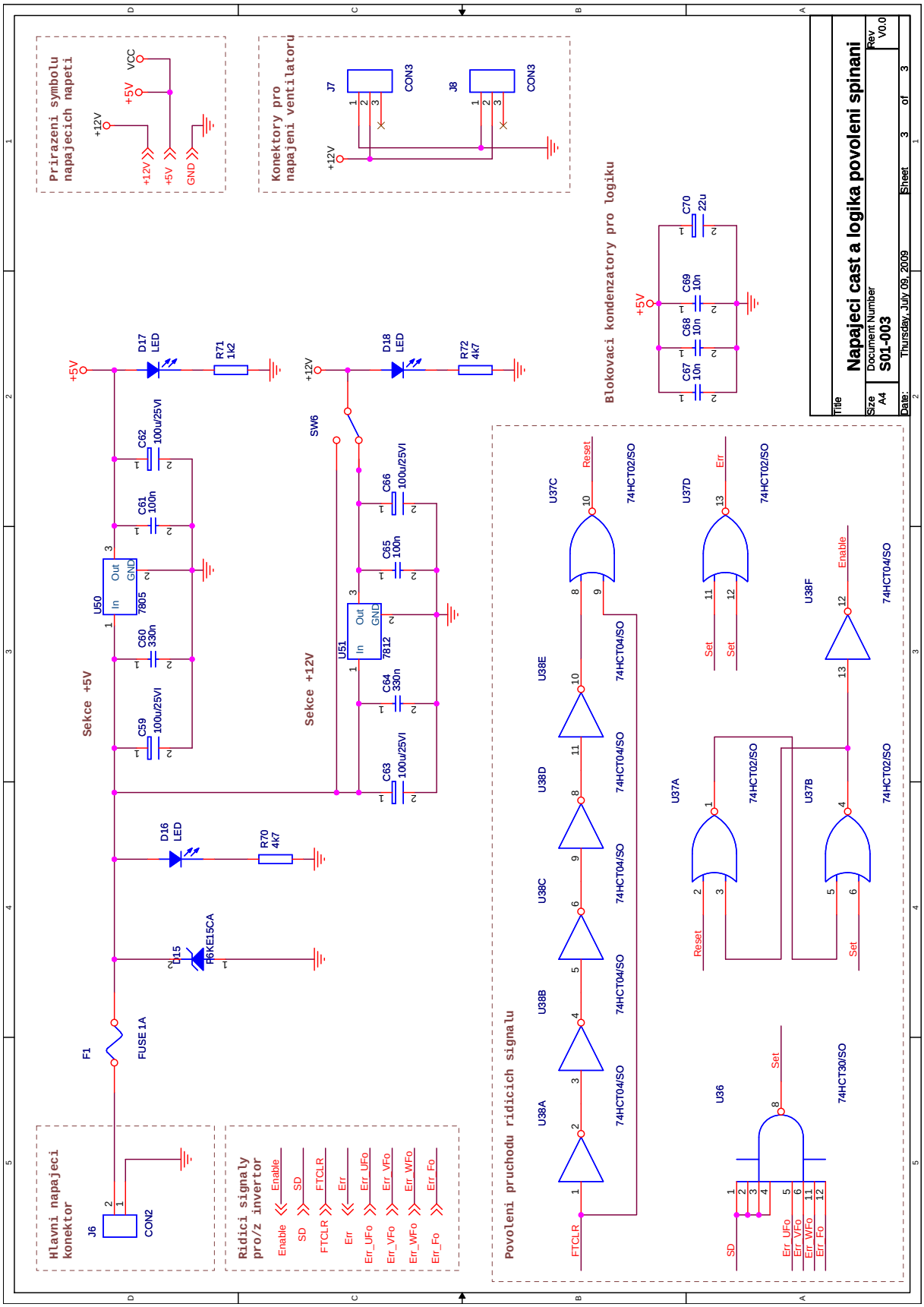
S01-003 – Napájecí část a logika povolení spínání



Obrázek A.1: Schéma zapojení obvodu řízení IPM PM50RLA120



Obrázek A.2: Schéma zapojení proudových a napěťových snímačů



Obrázek A.3: Schéma zapojení napájecí části desky a logiky povolení spínání

Příloha B

Jednotlivé vrstvy desky plošných spojů

TOP – plošný spoj – horní vrstva

SSTOP – servisní potisk – horní vrstva

SMTOP – nepájivá maska – horní vrstva

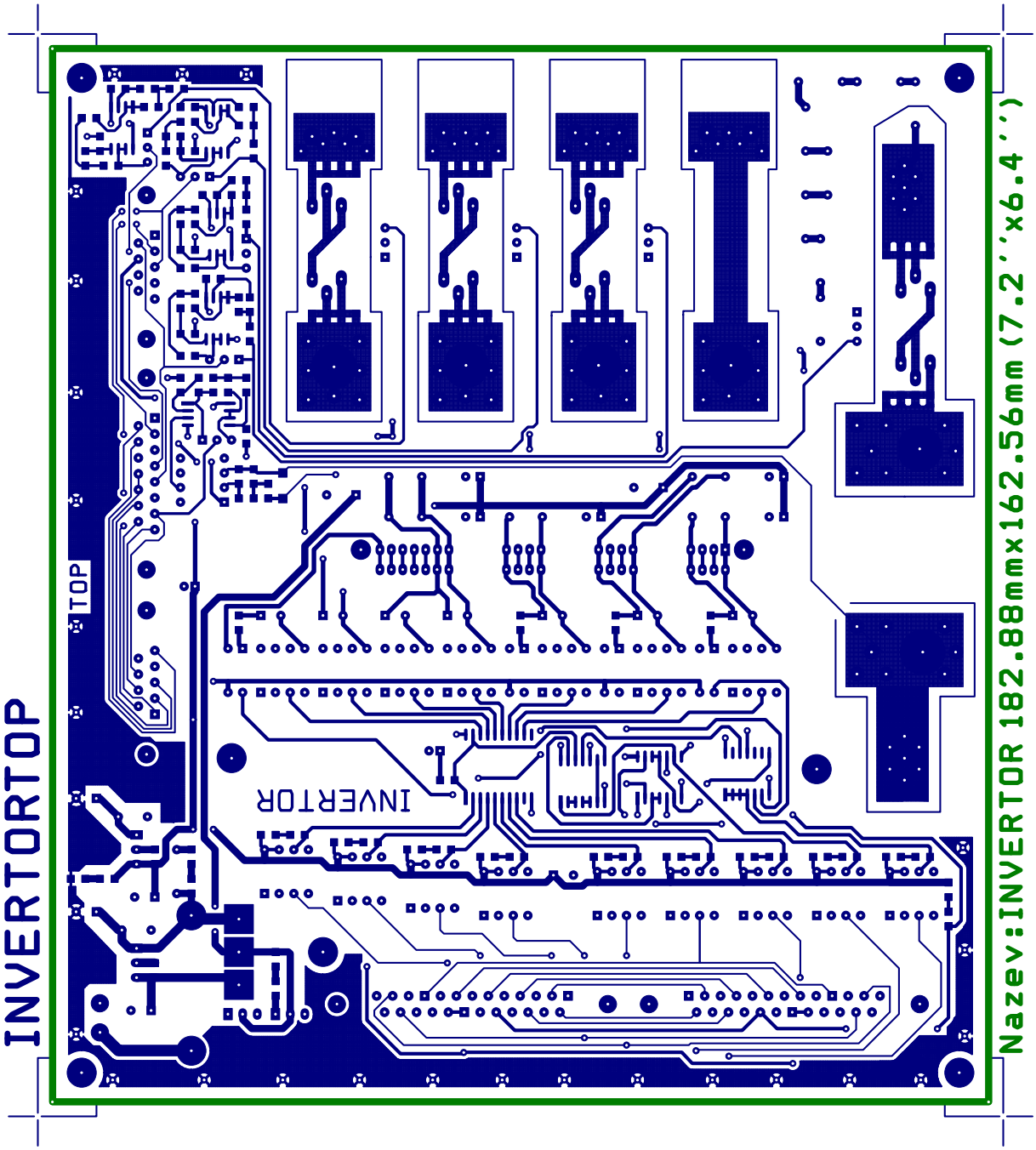
BOT – plošný spoj – spodní vrstva

SSBOT – servisní potisk – spodní vrstva

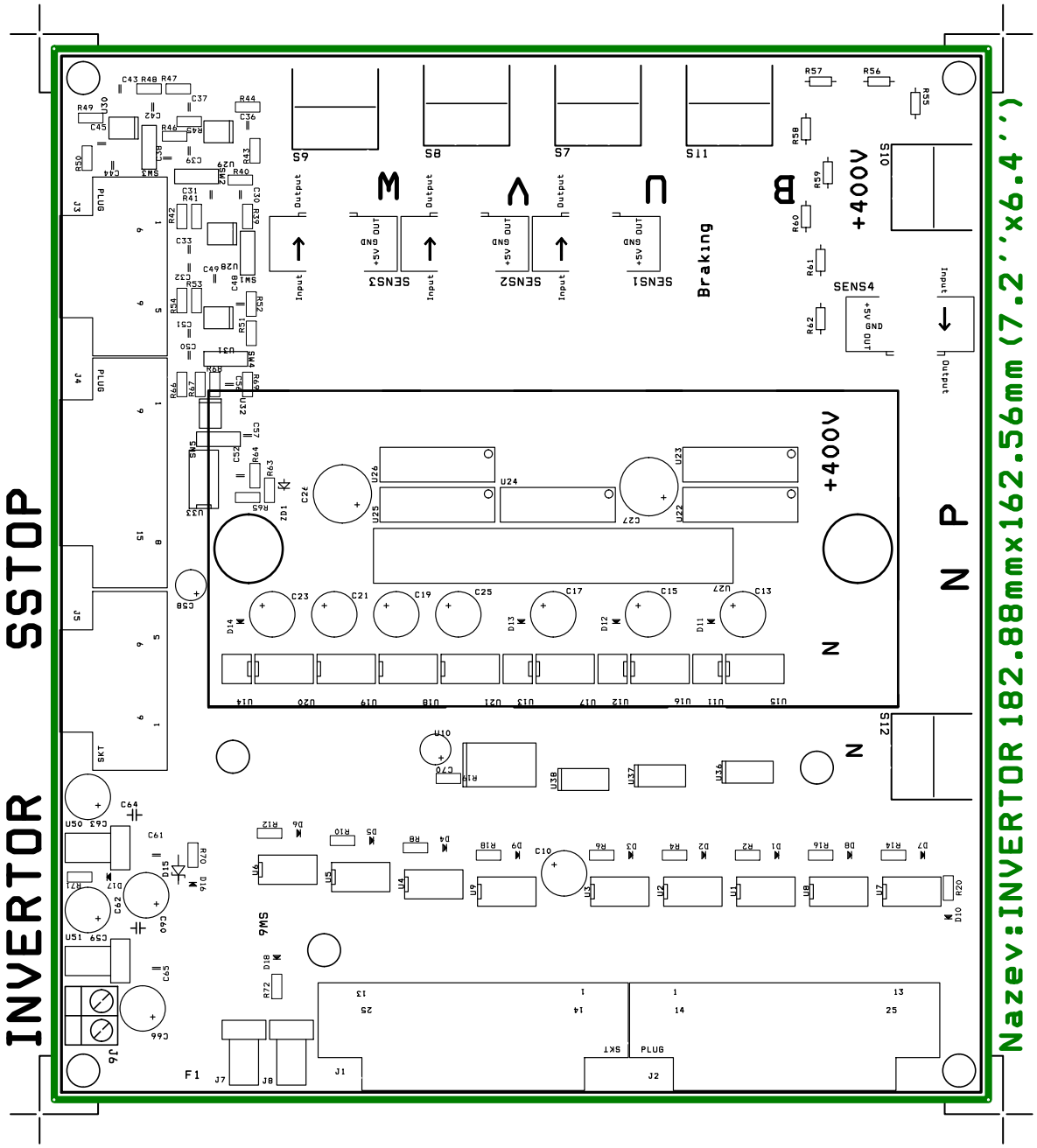
SMBOT – nepájivá maska – spodní vrstva

DRL – vrtací výkres

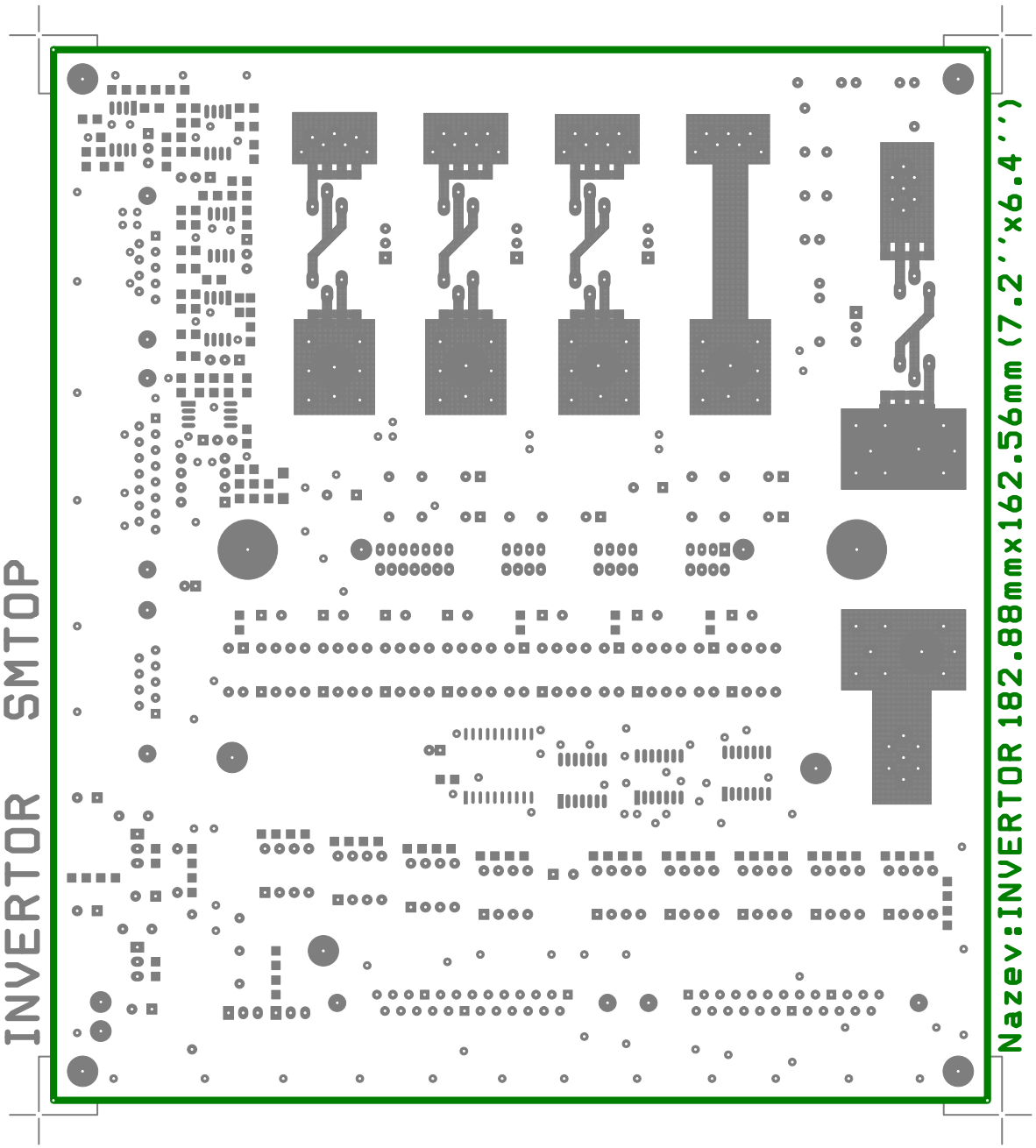
TOP_SSTOP – plošný spoj a servisní potisk – horní vrstva



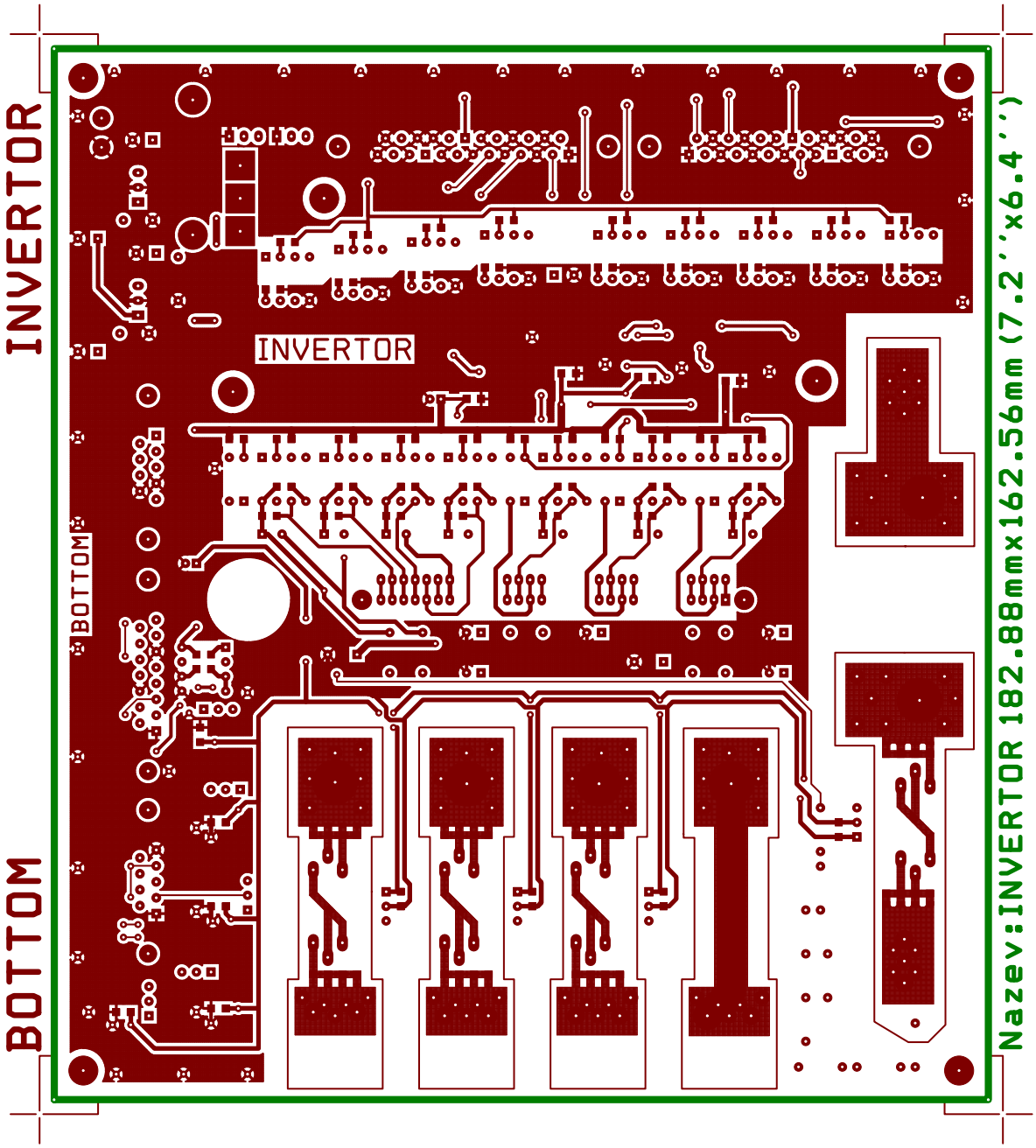
Obrázek B.1: Plošný spoj - horní vrstva spojů (TOP)



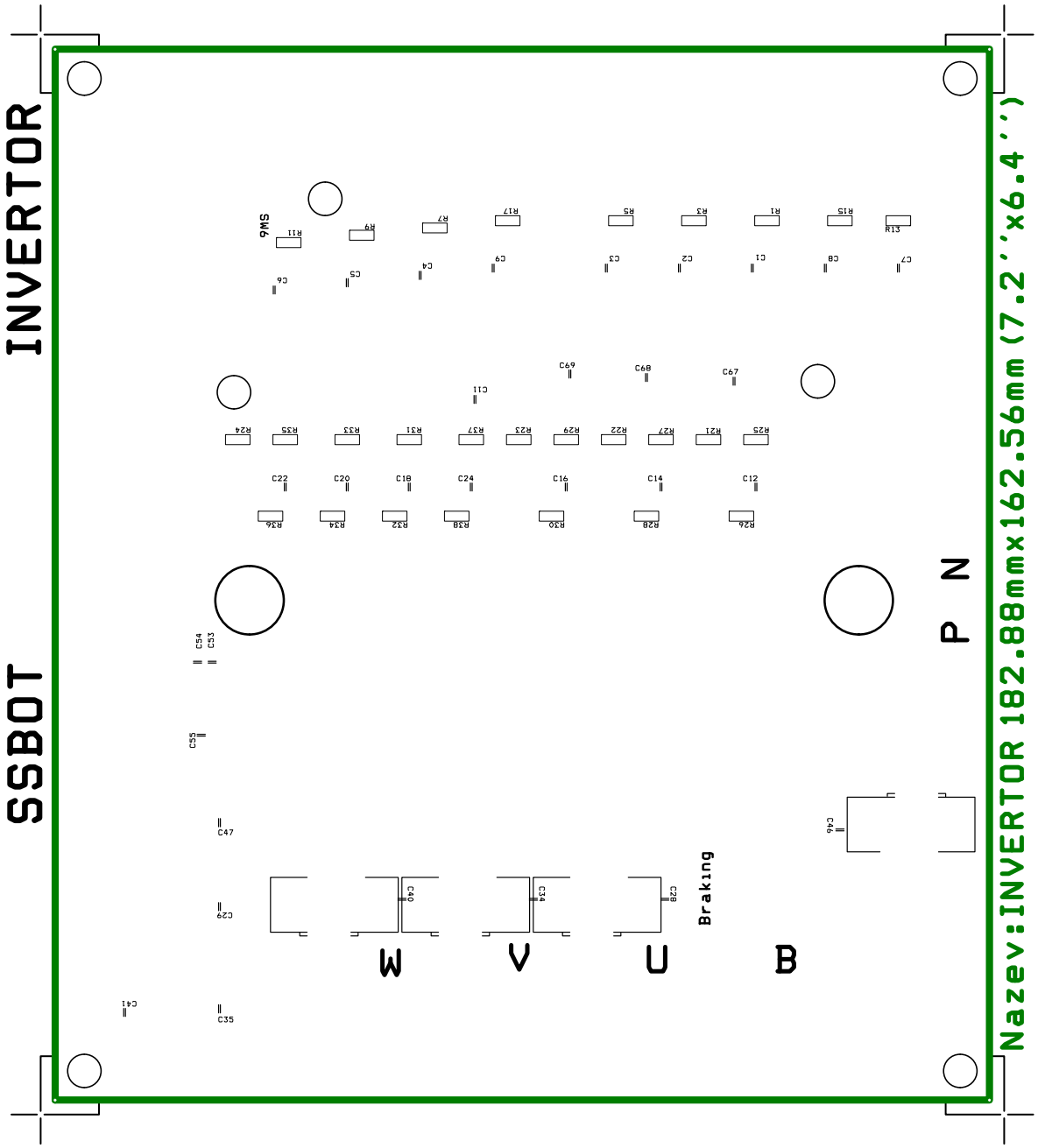
Obrázek B.2: Plošný spoj - horní vrstva servisního potisku (SSTOP)



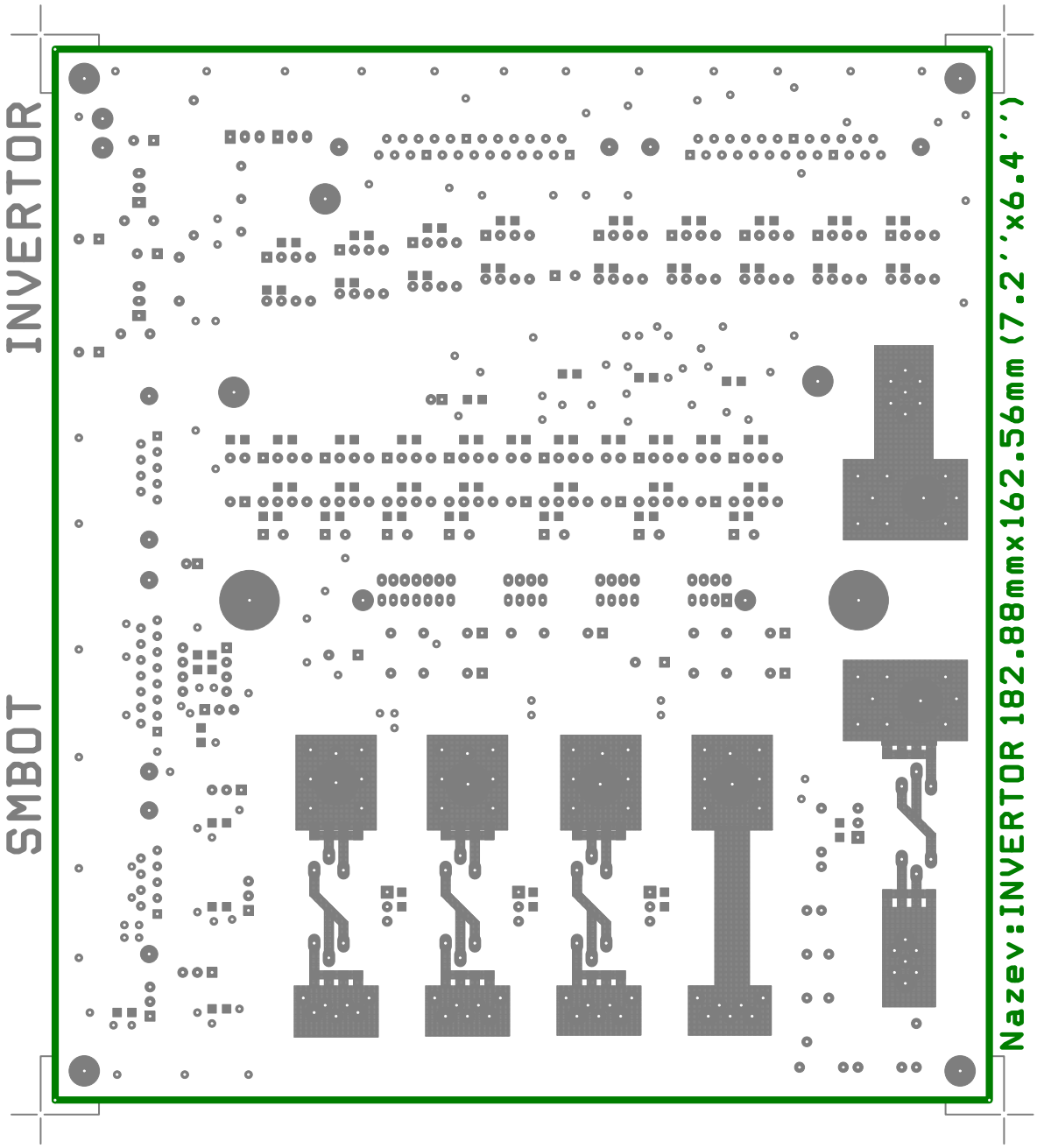
Obrázek B.3: Plošný spoj - horní vrstva nepájivé masky (SMTOP)



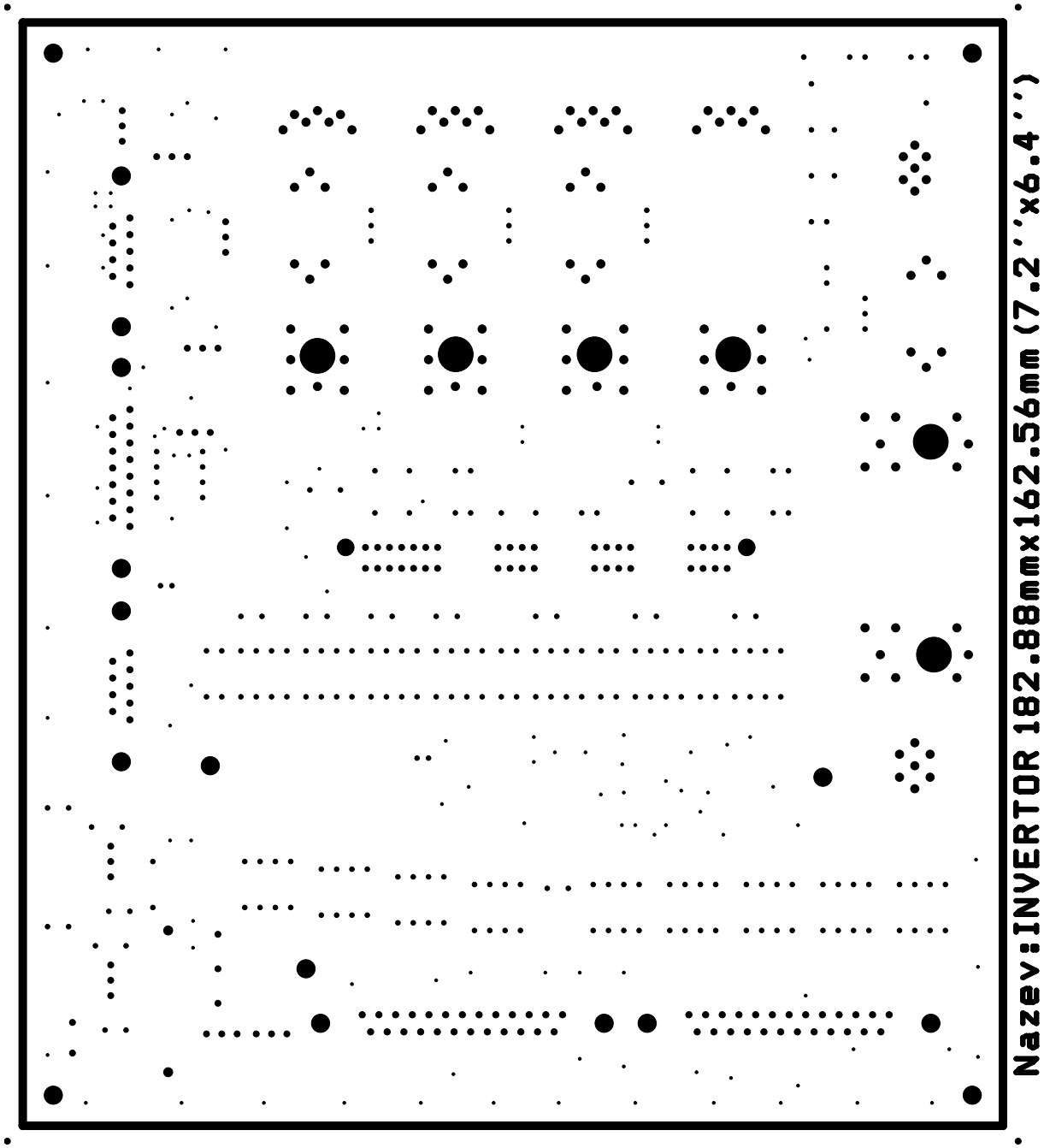
Obrázek B.4: Plošný spoj - spodní vrstva spojů (BOT)



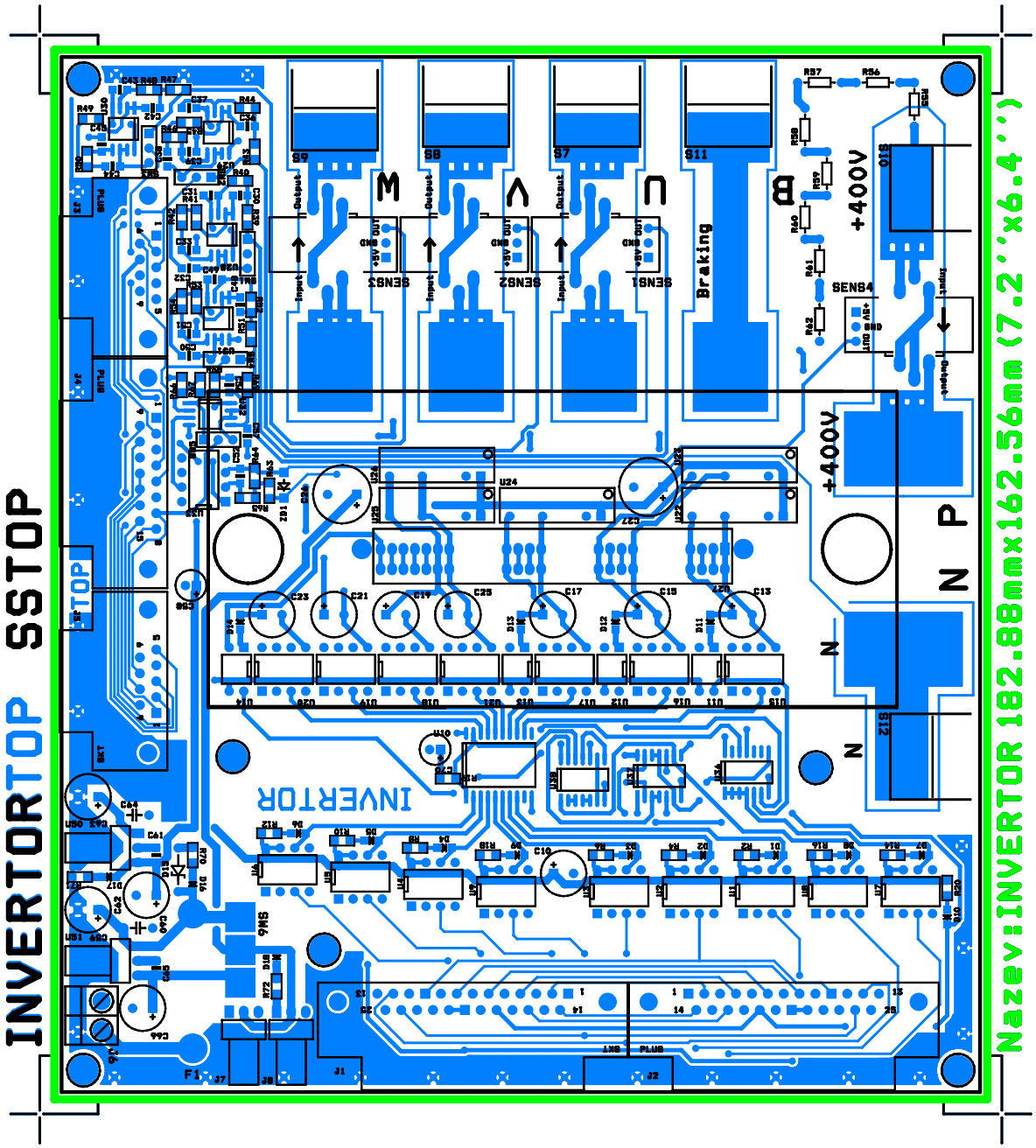
Obrázek B.5: Plošný spoj - spodní vrstva servisního potisku (SSBOT)



Obrázek B.6: Plošný spoj - spodní vrstva nepájivé masky (SMBOT)



Obrázek B.7: Plošný spoj - vrtací výkres (DRL)



Obrázek B.8: Plošný spoj - kombinace horní vrstvy spojů a servisního potisku

Příloha C

Obsah CD

Na přiloženém CD naleznete:

- **Bakalářská práce** – ve formátu PDF
- **Datasheet** – datasheety k použitým součástkám
- **OrCAD** – soubory se schématem, deskou plošných spojů a knihovnami pro návrhový program OrCAD
- **Ostatni** – další použité materiály