

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

ŘÍDICÍ SYSTÉM LABORATORNÍHO STANDU PRO VÝUKOVÉ ÚČELY

CONTROL SYSTEM OF LABORATORY STAND FOR EDUCATIONAL PURPOSE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

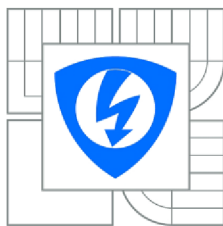
Bc. VLADIMÍR ONDREJČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DALIBOR ČERVINKA, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Ondřejček Vladimír

Ročník: 2

ID: 136567

Akademický rok: 2014/15

NÁZEV TÉMATU:

Řídicí systém laboratorního standu pro výukové účely

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Realizujte brzdou jednotku pro laboratorní stand popsany v rámci SP.
2. Sestavte celé soustrojí laboratorního standu a propojte kabeláž
3. Provedte zatěžovací testy zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PATOCKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [2] Vorel P., Patocka M., Průmyslová elektronika, Vydání 1., skriptum FEKT VUT Brno, 2007
- [3] SKALICKÝ, J. Navrhování elektrických pohonů. Navrhování elektrických pohonů. Brno: VUT FEKT, 2002

Termín zadání: 22.9.2014

Termín odevzdání: 26.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem řídicích obvodů, které budou použity v laboratorním standu. První část práce obsahuje části, které spolupracují s řídicími obvody. Druhá část práce se zabývá samotným návrhem řídicích obvodů, jejich provedení, vhodným výběrem součástek, a zapojení. Třetí část se zabývá sestavením celého zařízení a jeho oživením.

Abstract

This thesis proposes control circuit, that will be used in laboratory stand. The first part contains components that interact with the control circuit. The second part deals with the actual design of the control circuits, their design, appropriate selection of components and wiring. Third part deals with the assembly of the entire device and its commissioning.

Klíčová slova

Řídicí obvod, Traco, budicí obvod, resolver, řídicí deska, laboratorní stand

Keywords

Control circuit, Traco, gate driver, resolver, control board, laboratory stand

Bibliografická citace

ONDREJČEK, V. *Řídicí systém laboratorního standu pro výukové účely*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Dalibor Červinka, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Řídící obvody laboratorního standu pro výukové účely* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

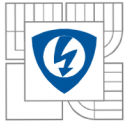
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Daliborovi Červinkovi, Ph.D a Ing. Janovi Knoblochovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

Podpis autora

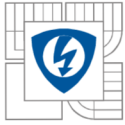


Obsah

| | |
|---|-----------|
| SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 8 |
| SEZNAM TABULEK | 10 |
| ÚVOD..... | 11 |
| 1 SESTAVA LABORATORNÍHO STANDU..... | 12 |
| 2 MECHANICKÉ PROVEDENÍ..... | 13 |
| 3 FUNKČNÍ SOUČÁSTI LABORATORNÍHO STANDU | 14 |
| 3.1 MOTORY POUŽITÉ V LABORATORNÍM PRACOVÍŠTI | 14 |
| 3.2 SNÍMANÍ OTÁČEK A POLOHY | 14 |
| 3.2.1 RESOLVER ER5KC242 | 16 |
| 3.3 CHLAZENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU..... | 17 |
| 3.4 DESKA VÝKONOVÉHO MĚNIČE..... | 17 |
| 3.4.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ | 19 |
| 3.4.2 DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ | 19 |
| 3.4.3 PŘIPOJOVACÍ TABULKA..... | 21 |
| 3.5 DESKA MIKROPROCESORU | 22 |
| 3.5.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ | 23 |
| 3.5.2 DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ | 23 |
| 3.5.3 PŘIPOJOVACÍ TABULKA..... | 23 |
| 3.6 BRZDNÁ JEDNOTKA..... | 25 |
| 3.6.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ | 25 |
| 3.6.2 DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ | 26 |
| 3.6.3 PŘIPOJOVACÍ TABULKA..... | 28 |
| 3.7 BUDICÍ OBVOD TRANZISTORU MĚNIČE..... | 28 |
| 3.7.1 PROVEDENÍ BUDICÍHO OBVODU | 29 |
| 3.7.2 PROBLÉMY S NOVÝM ŘEŠENÍM BUDICÍHO OBVODU | 31 |
| 3.7.3 NÁVRH NOVÉ VARIANTY BUDICÍHO OBVODU | 31 |
| 3.7.4 SCHÉMA ZAPOJENÍ NOVÉ VERZE..... | 32 |
| 3.7.5 DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ | 33 |
| 3.7.6 PŘIPOJOVACÍ TABULKA..... | 33 |
| 3.8 ZÁKLADNÍ DESKA..... | 34 |
| 3.8.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ | 39 |
| 3.8.2 DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ | 42 |
| 3.8.3 PŘIPOJOVACÍ TABULKA..... | 44 |
| 4 REALIZACE JEDNOTLIVÝCH DESEK | 46 |
| 5 SESTAVENÍ CELÉHO SOUSTROJÍ..... | 48 |
| 5.1 MECHANICKÉ SESTAVENÍ..... | 48 |
| 5.2 PROPOJENÍ KABELÁŽE..... | 48 |
| 5.2.1 ZAPOJENÍ RESOLVERU | 49 |
| 5.2.2 PŘIPOJENÍ VENTILÁTORU | 49 |

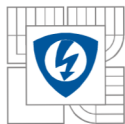


| | |
|--|-----------|
| 5.2.3 PŘIPOJENÍ NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ ZÁKLADNÍCH DESEK | 49 |
| 5.2.4 PROPOJENÍ VÝKONOVÉ A ZÁKLADNÍ DESKY | 50 |
| 5.2.5 PROPOJENÍ SIGNÁLŮ ENKODÉRU, SÉRIOVÉ LINKY | 50 |
| 5.2.6 PROPOJENÍ SILOVÝCH VODIČŮ | 50 |
| 6 PROVOZNÍ ZKOUŠKY | 52 |
| 6.1 ZÁKLADNÍ DESKA..... | 52 |
| 6.2 BUDICÍ OBVOD..... | 52 |
| 6.3 BRZDNÁ JEDNOTKA..... | 53 |
| 6.4 DESKA PROCESORU A VÝKONOVÉHO MĚNIČE | 53 |
| 6.5 ZATĚŽOVACÍ TESTY SOUSTROJÍ..... | 53 |
| ZÁVĚR..... | 55 |
| LITERATURA | 56 |
| PŘÍLOHY | 57 |

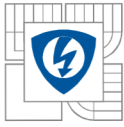


SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| <i>Obrázek 1 Topologie laboratorního standu</i> | 11 |
| <i>Obrázek 2 Sestava laboratorního standu</i> | 12 |
| <i>Obrázek 3 Principiální schéma resolveru [1]</i> | 15 |
| <i>Obrázek 4 Výstupní signály resolveru</i> | 16 |
| <i>Obrázek 5 Resolver ER5KC242 [2]</i> | 16 |
| <i>Obrázek 6 Chlazení asynchronního motoru</i> | 17 |
| <i>Obrázek 7 Modul SK 115 MD 10 a jeho vnitřní zaojení [3]</i> | 18 |
| <i>Obrázek 8 Schéma zapojení desky výkonového měniče [4]</i> | 19 |
| <i>Obrázek 9 Deska měniče –Top [4]</i> | 20 |
| <i>Obrázek 10 Deska měniče – Bottom [4]</i> | 20 |
| <i>Obrázek 11 3D vizualizace desky výkonového měniče [4]</i> | 21 |
| <i>Obrázek 12 3D vizualizace procesorové desky</i> | 22 |
| <i>Obrázek 13 Základní schéma zapojení procesorové desky</i> | 23 |
| <i>Obrázek 14 Návrh plošného spoje procesorové desky</i> | 23 |
| <i>Obrázek 15 Schéma zapojení brzdné jednotky</i> | 25 |
| <i>Obrázek 16 Deska plošného spoje brzdné jednotky</i> | 27 |
| <i>Obrázek 17 3D vizualizace brzdné jednotky</i> | 27 |
| <i>Obrázek 18 Použití budicích obvodů v laboratorním standu</i> | 28 |
| <i>Obrázek 19 Blokové zapojení napájení budiče [5]</i> | 29 |
| <i>Obrázek 20 Původní zapojení napájecí části budiče [5]</i> | 29 |
| <i>Obrázek 21 Fotografie původního provedení [5]</i> | 29 |
| <i>Obrázek 22 Nově navržené zapojení napájecí části</i> | 30 |
| <i>Obrázek 23 Budič ACPL-333J</i> | 31 |
| <i>Obrázek 24 Nové zapojení budícího obvodu</i> | 32 |
| <i>Obrázek 25 Plošný spoj nového návrhu 2:1</i> | 33 |
| <i>Obrázek 26 3D vizualizace budícího obvodu</i> | 33 |
| <i>Obrázek 27 Blokové zapojení napájecích obvodů</i> | 34 |
| <i>Obrázek 28 Typické zapojení s obvodem LM2596</i> | 36 |
| <i>Obrázek 29 Doporučené zapojení AD2S1200 [11]</i> | 36 |
| <i>Obrázek 30 Blokování signálů PWM</i> | 37 |
| <i>Obrázek 31 Vyhodnocení signálu FAULT</i> | 37 |
| <i>Obrázek 32 Přizpůsobení signálu proudového čidla</i> | 37 |



| | |
|---|-----------|
| <i>Obrázek 33 Měření napětí meziobvodu.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Obrázek 34 Zapojení napájecí části.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Obrázek 35 Zapojení analogové části.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Obrázek 36 Připojení budicích obvodů.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Obrázek 37 Zapojení obvodů vyhodnocení polohy (otáček).....</i> | <i>41</i> |
| <i>Obrázek 38 Zapojení obvodů procesoru a hradel.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Obrázek 39 Základní deska – Top.....</i> | <i>42</i> |
| <i>Obrázek 40 Základní deska - Bottom.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Obrázek 41 3D vizualizace základní desky.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Obrázek 42 Osazená deska výkonového měniče.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Obrázek 43 Osazená základní deska.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Obrázek 44 Osazená deska budicího obvodu.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Obrázek 45 Osazená procesorová deska.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Obrázek 46 Osazená brzdná jednotka.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Obrázek 47 Zapojovací schéma laboratorního standu.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Obrázek 48 Pohled na kompletně sestavený laboratorní stand.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Obrázek 49 Ověření funkce napájecího obvodu budiče.....</i> | <i>52</i> |
| <i>Obrázek 50 Ověření funkce budicího obvodu a saturační ochrany.....</i> | <i>53</i> |



SEZNAM TABULEK

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabulka 1 Mechanické komponenty laboratorního standu</i> | <i>13</i> |
| <i>Tabulka 2 Parametry asynchronního motoru</i> | <i>14</i> |
| <i>Tabulka 3 Parametry stejnosměrného motoru</i> | <i>14</i> |
| <i>Tabulka 4 Parametry resolveru ER5KC242</i> | <i>16</i> |
| <i>Tabulka 5 Parametry použitého modulu měniče</i> | <i>18</i> |
| <i>Tabulka 6 Připojovací body desky výkonového měniče</i> | <i>21</i> |
| <i>Tabulka 7 Připojení pinů procesorové desky a jejich využití.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Tabulka 8 Připojovací body brzděné jednotky.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Tabulka 9 Parametry budicího obvodu ACPL-333J [7]</i> | <i>30</i> |
| <i>Tabulka 10 Parametry obvodu SG2525A.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Tabulka 11 Parametry obvodu UC3825</i> | <i>32</i> |
| <i>Tabulka 12 Signály budicího obvodu</i> | <i>33</i> |
| <i>Tabulka 13 Parametry obvodu TRACO TEN8-2412[9].....</i> | <i>35</i> |
| <i>Tabulka 14 Parametry obvodu LM2596 [10]</i> | <i>35</i> |
| <i>Tabulka 15 Připojení obvodů k základní desce</i> | <i>44</i> |
| <i>Tabulka 16 Připojení vodičů resolveru</i> | <i>49</i> |
| <i>Tabulka 17 Seznam propojovacího materiálu.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Tabulka 18 Seznam součástek výkonového měniče</i> | <i>57</i> |
| <i>Tabulka 19 Seznam součástek budicího obvodu</i> | <i>57</i> |
| <i>Tabulka 20 Seznam součástek základní desky.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Tabulka 21 Seznam součástek brzděné jednotky.....</i> | <i>59</i> |

ÚVOD

Cílem práce je navrhnout, realizovat a sestavit veškerá zařízení laboratorního standu s měniči a motory pro výuku v laboratořích elektrických pohonů. Tento stand bude sloužit jako názorná ukázka technického provedení a systému řízení pohonů ve výuce. Pracoviště musí zabezpečovat odolnost proti úrazu elektrickým proudem, neodborné práci a poškození. Laboratorní stand se bude skládat ze dvou motorů, výkonové části a řídicí části.

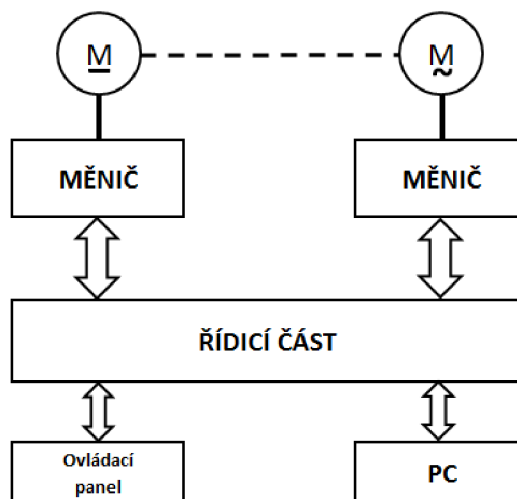
V laboratorním standu jsou použity dva motory, jeden jako třífázový asynchronní stroj a druhý jako stejnosměrný stroj s permanentními magnety. Tyto stroje jsou umístěny na společné hřídeli.

Výkonovou část standu tvoří v rámci unifikace dva totožné měniče, přičemž první měnič je použit jako třífázový střídač a druhý jako čtyřkvadrantový pulsní měnič.

Řídicí část je tvořena signálovými procesory s komunikací s řídicím počítačem, popřípadě ovládanými z ovládacího panelu.

Propojení výkonové části a procesorové desky je zajištěno základní deskou, která zabezpečuje spolupráci všech obvodů a rozvod napájení.

Provedením obvodů, jejich návrhem, realizací, samotnou konstrukcí a montáží celého pracoviště se tato práce zabývá.



Obrázek 1 Topologie laboratorního standu

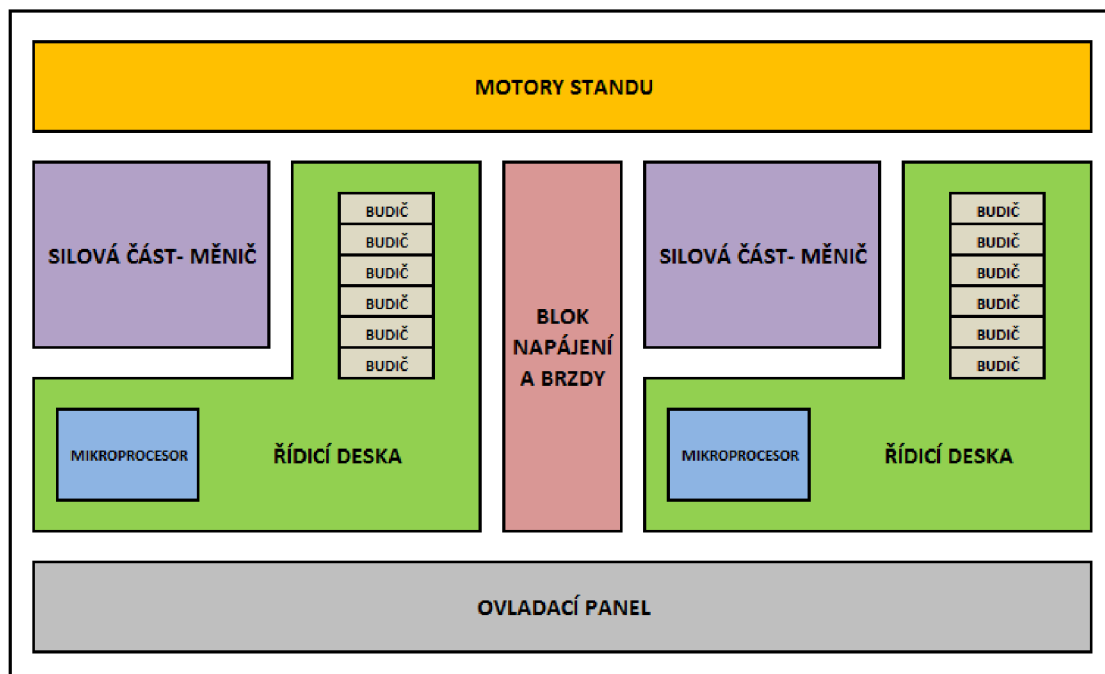
1 SESTAVA LABORATORNÍHO STANDU

Laboratorní stand pro výukové účely obsahuje několik desek s různými obvody, zajišťujících patřičné funkce pro chod laboratorního soustrojí. Tyto desky budou postupně v práci popsány.

K nejdůležitějším částem patří:

- Deska výkonového měniče
- Deska mikroprocesoru
- Budicí obvod tranzistorů měniče
- Brzdná jednotka
- Základní deska

Jak již bylo zmíněno v úvodu této práce, laboratorní stand obsahuje celkem dva stroje – jeden asynchronní trojfázový a druhý stejnosměrný. Vzhledem k unifikaci je pro řízení obou strojů použito stejných typů desek, tudíž celá sestava obsahuje celkem dvě desky výkonové části, dvě mikroprocesorové desky, dvě desky základní a dvě skupiny budičů pro každý výkonový měnič. Brzdná jednotka, která také zajišťuje napájení, je použita pouze jednou a je společná pro celou sestavu laboratorního standu. Rozmístění jednotlivých desek a dalších celků (motory, ovládací panel) celé sestavy je patrné z následujícího obrázku.



Obrázek 2 Sestava laboratorního standu

2 MECHANICKÉ PROVEDENÍ

Laboratorní stand pro výukové účely se skládá z rámu, plechových součástí a dalších prvků, které zajišťují další nezbytné mechanické vazby a upevnění.

Rám celého laboratorního standu je tvořen hliníkovými profily systému FM SYSTEME a doplňujícím spojovacím materiálem. Tento systém umožňuje velmi jednoduchou konstrukci a také snadnou montáž. Profily a spojovací materiál byl zakoupen u firmy Marek Industrial a.s. Na tento rám jsou připevněny veškeré plechové součásti a další doplňky. Hliníkového plechu je použito jako podložky pod motory, která rozvádí tlak obou motorů a také definuje montážní otvory pro jejich uchycení. Pro ovládací panel a základnu veškerých desek s plošnými spoji je rovněž použito hliníkového plechu o tloušťce 2mm.

Desky plošných spojů všech funkčních celků jsou pomocí distančních sloupků uchyceny k hliníkové základně, která kromě mechanického uchycení, slouží pro odvod přebytečného tepla z výkonových měničů a brzdné jednotky.

Tento základní systém (rám, podložka motorů, hliníková základna) je doplněn o ovládací panel a dále o připojovací svorky pro napájení laboratorního pracoviště.

Při montáži a konstrukci jednotlivých celků bylo nutno některé mechanické prvky upravit a také aktualizovat tabulku použitých dílů. Upravené nebo nově vyrobené součásti mají zhotoveny opravené výkresy, jež jsou uvedeny v příloze na konci této práce a nový kompletní seznam použitých mechanických dílů je uveden v následující tabulce.

Tabulka 1 Mechanické komponenty laboratorního standu

| Název dílu | Provedení | Počet kusů | Obj. číslo (poznámka) |
|----------------------------------|-----------|------------|---------------------------------|
| Profil základní | l=450mm | 2 | 05.01041.00 |
| Profil jednostranně zaslepený | l=390mm | 2 | 05.01900.00 |
| Profil zaoblený | l=570mm | 1 | 05.01904.00 |
| Spojení HV | - | 2 | 05.02129.00 |
| Spojení PV | - | 4 | 05.01766.00 |
| T-matice M6 | | 18 | 05.01106.00 |
| Polokruhová matice M6 | - | 4 | 05.01.065.00 |
| Nožka gumová RF1/37.5mm | - | 4 | 606017 |
| Plechová podložka motorů | - | 1 | nový výkres |
| Hliníková základna | - | 1 | nový výkres |
| Ovládací panel | - | 1 | nový výkres |
| Připojovací svorky | - | 1 | nový výkres |
| Šroub imbus válcová hlava | M6x25 | 8 | DIN 912 (uchycení motorů) |
| Šroub imbus válcová hlava | M6x20 | 4 | DIN 912 (příruba ss motoru) |
| Šroub imbus válcová hlava | M6x16 | 2 | DIN 912 (uchycení svorek) |
| Šroub půlkulatá hlava | M6x16 | 10 | ISO 7045 (ovl. panel, základna) |
| Šroub půlkulatá hlava | M4x20 | 3 | ISO 7045 (uchycení měničů) |
| Šroub půlkulatá hlava | M3x5 | 22 | ISO 7045 (uchycení desek PCB) |
| Matice | M4 | 3 | DIN 934 |
| Podložka plochá | 6.4 | 18 | DIN 125A |
| Podložka pérová | 6.1 | 18 | DIN 7980 |
| Podložka plochá | 4.3 | 6 | DIN 125A |
| Podložka pérová | 4.1 | 3 | DIN 7980 |
| Sloupek distanční šroub x matice | M3 x 12 | 22 | DA2M3X12 - GM Electronic |

3 FUNKČNÍ SOUČÁSTI LABORATORNÍHO STANDU

3.1 Motory použité v laboratorním pracovišti

Jak již bylo v úvodu práce zmíněno, laboratorní stand pro výukové účely obsahuje dva motory. Jeden je třífázový asynchronní a druhý je stejnosměrný s permanentními magnety. Asynchronní motor je v patkovém provedení a stejnosměrný motor je v provedení přírubovém. Aby bylo možno tento stejnosměrný motor uchytit k rámu, byl vyroben speciální držák. Oba tyto stroje jsou namontovány přes plechovou podložku, která vymezuje montážní otvory, na rám laboratorního standu. Spojení motorů na společné hřídeli je provedeno pomocí pružné spojky. Výběr motorů a jejich dimenzování je řešeno v jiné práci [1]. Pro úplnost jsou zde pouze uvedeny tabulky s parametry obou zmíněných motorů.

Tabulka 2 Parametry asynchronního motoru

| 1LA7063-4AA10 | |
|----------------------|-----------------------|
| Jmenovitý výkon | 180W |
| Jmenovité otáčky | 1350min ⁻¹ |
| Jmenovitý moment | 1,27Nm |
| Jmenovité napětí | 3x23,4V |
| Jmenovitý proud | 9,45A |
| Počet pólů | 4 |

Tabulka 3 Parametry stejnosměrného motoru

| MP80S/2 | |
|------------------|-----------------------|
| Jmenovitý výkon | 400W |
| Jmenovité otáčky | 2800min ⁻¹ |
| Jmenovité napětí | 24V |
| Jmenovitý proud | 20A |
| Jmenovitý moment | 1,33Nm |

3.2 Snímání otáček a polohy

Informace o skutečné poloze a rychlosti hřídele motoru je nutná pro regulaci pohonů. Úkolem snímače je vytvořit signál, který je úměrný úhlové rychlosti otáčení a polohy hřídele motoru. Pro velmi dobrou regulaci elektrických pohonů je nutné, aby snímač měl velmi dobré vlastnosti a byl kvalitní. Existuje několik způsobů, jak je možno snímat úhlovou rychlost a polohu.

Snímače lze rozdělit do několika skupin:

Čidla s Hallovou sondou

Jedná se o magnetický princip. Na hřídel je umístěn velmi malý permanentní magnet, který se otáčí současně s hřídelí. Hallova sonda pracuje tak, že pokud se v její blízkosti vyskytuje magnetické pole, je na jejím výstupu napětí. Výstupní signál má tvar obdélníkových pulsů, jejichž frekvence je úměrná úhlové rychlosti a jejich počet úhlu natočení hřídele motoru.

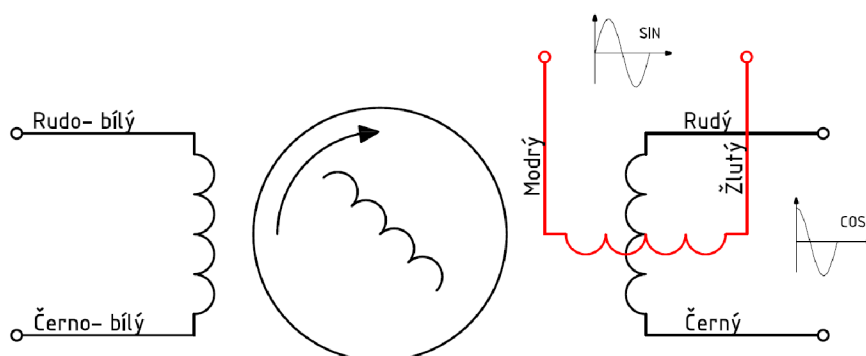
Čidla s optoelektrickým principem – inkrementální čidla

Tento typ čidla je tvořen kotoučem, který má vyřezané otvory. Přes kotouč svítí LED dioda a její paprsek dopadá na fotodiodu, která slouží jako snímač. Otáčením hřídele dochází k přerušování paprsku vysílaného z LED diody. Na výstupu tohoto typu snímače je opět obdélníkový signál, daný tvarem vyřezaných otvorů v kotouči. Frekvence výstupního signálu je opět úměrná úhlové rychlosti a počet pulsů poloze. Tato čidla jsou vybavena několika výstupními signály pro větší přesnost a také určení směru otáčení.

Tachodynamo

Jde o jednoduchý stejnosměrný stroj – dynamo s permanentními magnety. Výstupní signál je v podobě stejnosměrného napětí. Velikost indukovaného (a tím i s ohledem na úbytky výstupního) napětí je přímo úměrná úhlové rychlosti. Nevýhodou tohoto snímače je, že zde není k dispozici signál o poloze hřídele motoru. Tento signál je nutno dodatečně vytvořit v obvodech zpracovávajících informaci o rychlosti – například integrací vstupního napětí získáme informaci o poloze.

Pro regulaci asynchronního motoru je nutné používat takový snímač polohy, který je absolutní. Tento požadavek splňuje resolver. Resolver je polohový transformátor, který se využívá jako absolutní snímač polohy hřídele motoru. Skládá se ze dvou částí – z rotoru a statoru. Využívá změny velikosti vzájemné indukčnosti (vazby) mezi vinutími rotoru a statoru. Velikost této vazby je dána vzájemnou polohou rotoru a statoru – tedy polohou hřídele. Resolver obsahuje dvoufázové vinutí na statoru a jednofázové vinutí na rotoru. Vinutí umístěná na statoru mají vzájemnou polohu natočenu o 90° . Tento typ snímače umožňuje napájení do statoru nebo rotoru. V našem případě je rotor napájen harmonickým napětím. Magnetické pole rotoru indukuje v cívkách statoru složky napětí s amplitudami, jež jsou závislé na úhlu natočení rotoru vůči statoru.

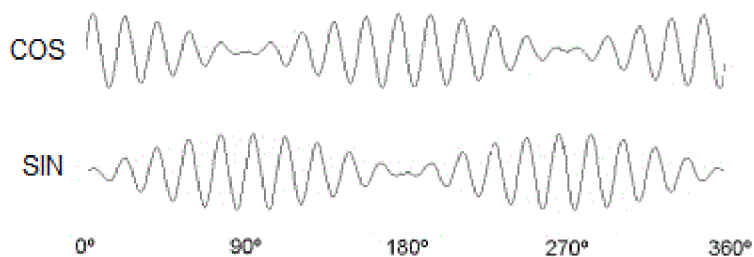


Obrázek 3 Principiální schéma resolveru [1]

Magnetické pole rotoru indukuje ve statorových cívkách složky napětí s amplitudami, které jsou závislé na úhlu natočení rotoru Φ vůči statoru.

$$u_1(t) = KU \sin \Phi \sin \omega t \quad (1)$$

$$u_2(t) = KU \cos \Phi \sin \omega t \quad (2)$$



Obrázek 4 Výstupní signály resolveru

3.2.1 Resolver ER5KC242

Pro naši aplikaci byl vybrán resolver firmy ATAS elektromotory Náchod s.r.o. velikost 15 s označením ER5KC242. Resolver je umístěn pod krytem ventilátoru na hřídeli asynchronního stroje.



Obrázek 5 Resolver ER5KC242 [2]

Tabulka 4 Parametry resolveru ER5KC242

| ER5KC242 | |
|------------|-------|
| Velikost | 15 |
| Napětí | 7V |
| Kmitočet | 10kHz |
| Příkon | 200mW |
| Proud | 50mA |
| Počet pólů | 2 |

3.3 Chlazení asynchronního motoru

Pro umístění resolveru na hřídel asynchronního stroje bylo nutné demontovat původní ventilátor a tento nahradit jiným. Jako vhodné řešení se jeví použití ventilátoru o rozměrech 70x70x10mm typ MB70101VB-G99 z nabídky GM Electronic. Z důvodu stísněných prostorových možností nebylo možno použít výkonnějšího a většího typu ventilátoru (prostor původního ventilátoru je téměř zaplněn již zmíněným resolverem). Ventilátor je uchycen na vnitřní straně krytu ventilátoru asynchronního motoru a mezi něj a kryt je vloženo mezikruží vyrobené z plexiskla o tloušťce 4mm, které zajišťuje přímé sání vzduchu. Uvedený ventilátor na napětí 12V je napájen z desky brzděné jednotky.

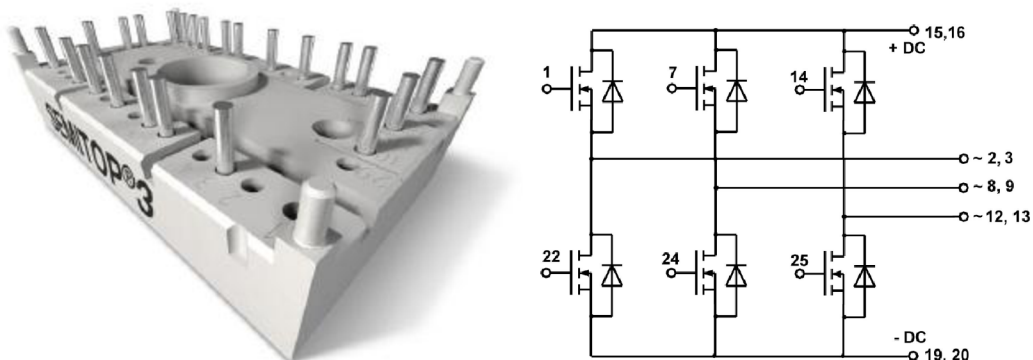


Obrázek 6 Chlazení asynchronního motoru

3.4 Deska výkonového měniče

Výkonová část laboratorního standu se skládá z důvodu unifikace ze dvou totožných třífázových měničů. První měnič je určen pro napájení asynchronního motoru a rekuperaci jeho energie do sítě a je zapojen jako třífázový střídač. Druhý měnič je určený pro napájení a rekuperaci stejnosměrného motoru s permanentními magnety a je zapojen jako čtyřkvadrantový pulsní měnič. Oba měniče jsou konstrukčně stejné, pouze u měniče napájejícího stejnosměrný motor jsou využity pouze dvě fáze – vývody větví A a B, čímž je vytvořen H-můstek. Deska plošných spojů výkonového měniče obsahuje samotný výkonový modul, kondenzátory filtru, transil jako ochranu proti přepětí a přepólování. Pro měření proudu motorem jsou na této desce umístěny dvě čidla proudu LEM LTS 25NP, které jsou zapojeny na výstupy větví A a C třífázového měniče. U desky použité pro stejnosměrný motor s permanentními magnety je instalováno pouze jedno čidlo proudu LEM a to ve větvi A. Přenos řídicích signálů, proudových signálů a napájení proudových čidel je provedeno pomocí 26 pinového konektoru P1 propojeného se základní deskou. Silové přívody a výstupy větví měniče je provedeno pomocí šroubových spojů o velikosti M5. Dimenzování a výběr vhodného modulu výkonového měniče je řešeno v jiné práci [1].

Pro samotnou realizaci měniče je použit modul od firmy SEMIKRON typ SK115 MD 10. Na následujícím obrázku je zobrazen použitý modul a jeho vnitřní zapojení.



Obrázek 7 Modul SK 115 MD 10 a jeho vnitřní zapojení [3]

Zapojení tohoto modulu obsahuje celkem šest tranzistorů s antiparalelně řazenými diodami, zapojených jako třífázový můstek, v případě použití jako stejnosměrný pulsní měnič se využije pouze dvou větví, třetí větev bude nevyužita - nezapojena. Každý tranzistor měniče je řízen vlastním budičem se saturační ochranou.

Z následující tabulky jsou patrné základní údaje o použitém typu modulu.

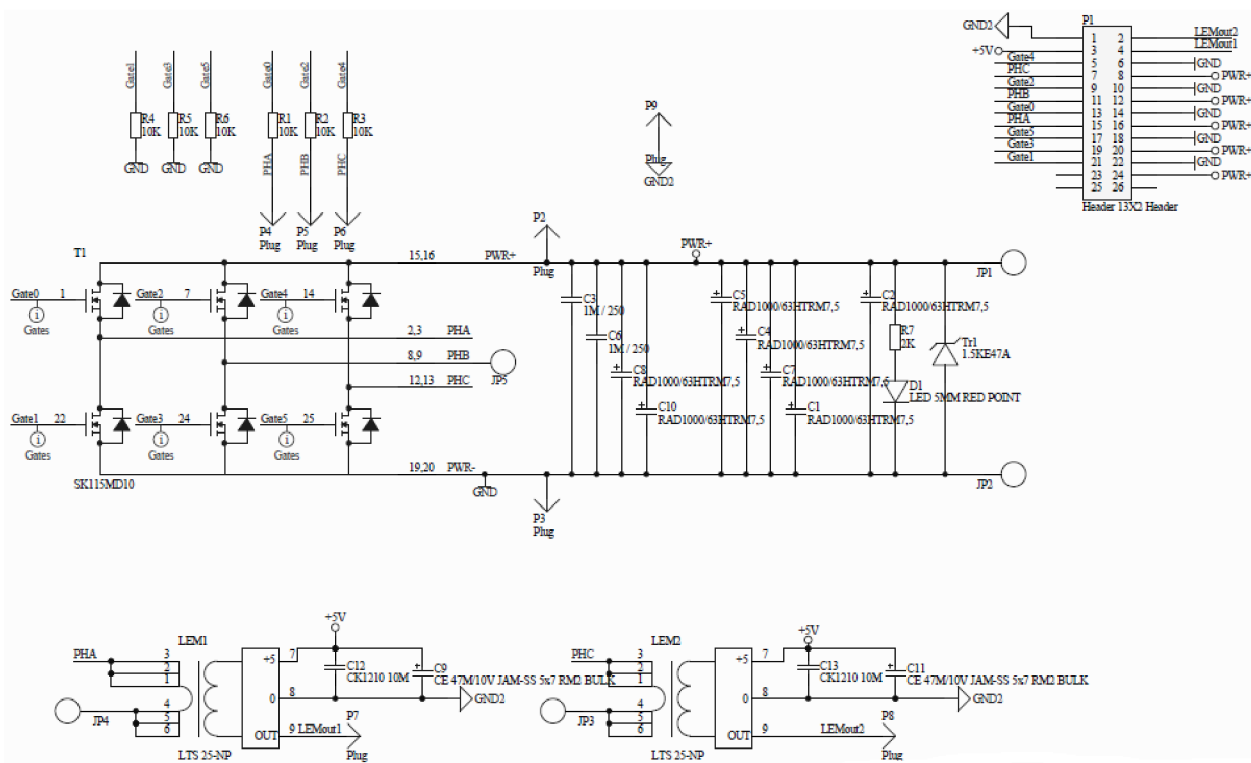
Tabulka 5 Parametry použitého modulu měniče

| MODUL SK 115 MD10 | |
|----------------------------------|-----------|
| Typ tranzistorů měniče | MOS-FET |
| Maximální napětí U_{DSS} | 100V |
| Proud tranzistorem I_D | 80A |
| Max. proud tranzistorem I_{DM} | 120A |
| Řídící napětí U_{GSS} | $\pm 20V$ |
| Zapínací čas t_{on} | 300ns |
| Vypínací čas t_{off} | 1600ns |
| Proud nulovou diodou I_F | 80A |
| Max. proud diodou I_{FM} | 120A |

Návrh schéma zapojení s desky plošných spojů je řešen a popsán v jiné práci [3]. Před zahájením výroby bylo nutné upravit rozmístění a parametry některých součástek, tudíž je návrh mírně odlišný od původního návrhu řešeného v rámci jiné práce. Upravené návrhy jsou uvedeny v této práci.

3.4.1 Schéma zapojení

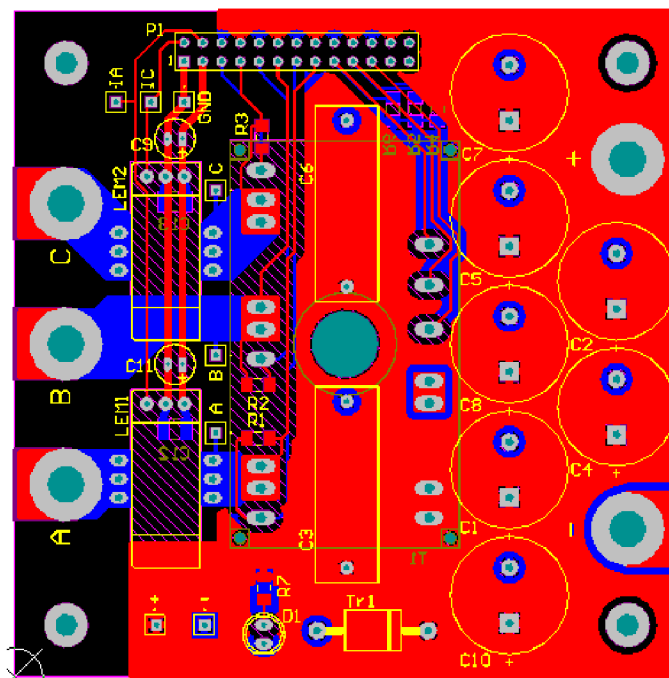
Schéma zapojení desky výkonového měniče obsahuje všechny nutné součástky pro správnou funkci modulu a také součástky, které je nevhodné nebo neúčelné umisťovat samostatně. Jedná se především o proudová čidla LEM, která jsou, jak je patrné ze schématu zapojení, zapojeny do větví A a C. Dále deska obsahuje obvod proti přepětí a přepólování – tranzistor Tr_1 , signalizaci přítomnosti napájecího napětí pomocí LED diody D_1 . Dále deska obsahuje celkem 6 elektrolytických kondenzátorů a 2 svitkové, tvořící meziobvod měniče. Pro zamezení náhodného sepnutí tranzistorů měniče jsou mezi vývody Gate a Source každého tranzistoru zapojeny odpory R_1 - R_6 . Konektor P1 slouží k napájení proudových čidel a přenosu řídicích signálů.



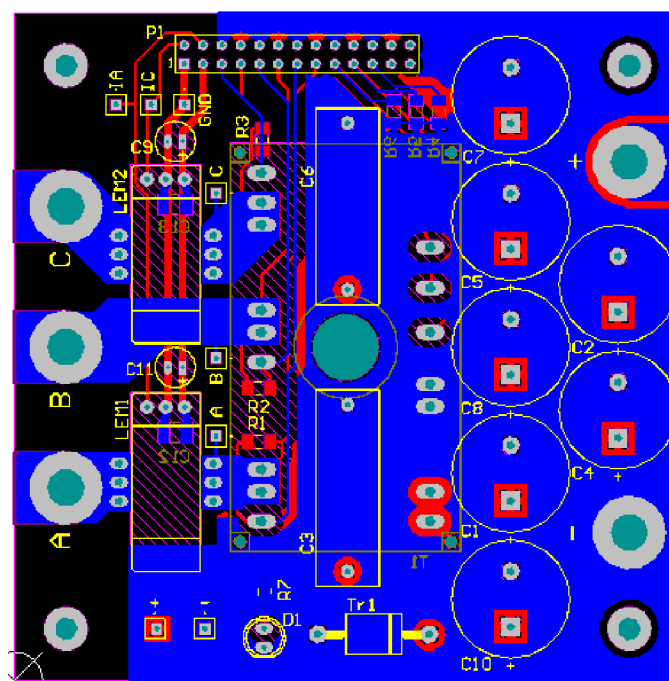
Obrázek 8 Schéma zapojení desky výkonového měniče [4]

3.4.2 Deska plošných spojů

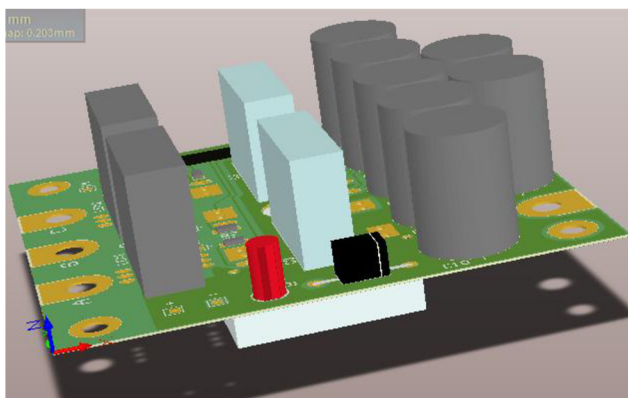
Desky plošných spojů jsou navrženy v sendvičovém provedení o rozměrech 90x90mm. V každém rohu je umístěn otvor pro mechanické uchycení. Rozmístění součástek je voleno s ohledem na pravidla při návrhu výkonových měničů – především o umístění kondenzátorů co nejbližší výkonovému modulu, tak aby indukčnost spojů byla co možná nejmenší.



Obrázek 9 Deska měniče –Top [4]



Obrázek 10 Deska měniče – Bottom [4]



Obrázek 11 3D vizualizace desky výkonového měniče [4]

3.4.3 Připojovací tabulka

Pro správné připojení desky výkonového měniče do celé sestavy laboratorního standu, nebo i při použití v jiné aplikaci je nutno znát označení a vyvedení různých signálů z této desky.

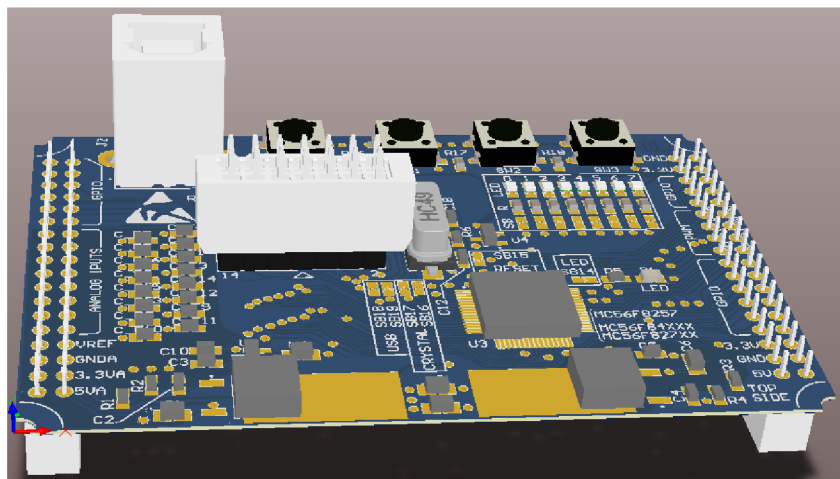
Tabulka 6 Připojovací body desky výkonového měniče

| Č. pinu | Označení vývodu | Poznámka |
|--|-----------------|-------------------------------|
| ŠROUBOVÉ VÝVODY M5 | | |
| JP1 | + | Přívod napájení + |
| JP2 | - | Přívod napájení - |
| JP3 | C | Vývod větve C |
| JP4 | A | Vývod větve A |
| JP5 | B | Vývod větve B |
| KONEKTOR P1 – pro ploché kabely | | |
| 1 | GND2 | Napájení čidel LEM GND |
| 2 | LEMout2 | Proud větve C |
| 3 | +5V | Napájení čidel LEM +5V |
| 4 | LEMout1 | Proud větve A |
| 5 | GATE4 | Gate horní tranzistor větev C |
| 7 | PHC | SOURCE/DRAIN větev C |
| 9 | Gate2 | Gate horní tranzistor větev B |
| 11 | PHB | SOURCE/DRAIN větev B |
| 13 | Gate0 | Gate horní tranzistor větev A |
| 15 | PHA | SOURCE/DRAIN větev A |
| 17 | Gate5 | Gate dolní tranzistor větev C |
| 19 | Gate3 | Gate dolní tranzistor větev B |
| 21 | Gate1 | Gate dolní tranzistor větev A |
| 6, 10, 14, 18, 22 | GND | SOURCE dolních tranzistorů |
| 8, 12, 16, 20, 24 | PWR+ | DRAIN horních tranzistorů |

3.5 Deska mikroprocesoru

Pro řízení celého laboratorního standu je zapotřebí desky, která tuto úlohu zastává. Pro regulaci chodu obou motorů je na základní desce osazena deska mikroprocesoru. Deska mikroprocesoru je propojena se základní deskou dvěma 36 pinovými dvouřadovými konektory. Přes tyto konektory je do mikroprocesorové desky přivedeno napájecí napětí nutné pro správnou funkci všech hlavních i pomocných obvodů umístěných na této desce, analogové vstupy a výstupy, potřebné pro zpracování analogových signálů, jako například proudů, napětí a dalších signálů – například z ovládacího panelu standu. Dále připojovací konektory obsahují logické vstupy a výstupy pro zpracování diskrétních informací (tlačítek, přepínačů instalovaných na ovládacím panelu apod.). Je zde přiveden i signál o poloze (rychlosti) soustrojí z obvodu, který vyhodnocuje signál z resolveru, instalovaného na hřídeli asynchronního motoru. Nejdůležitějším výstupem desky je bezpochyby skupina PWM signálů pro řízení výkonového měniče a tím řízení daného motoru. Mikroprocesor rovněž obsahuje konektor USB pro komunikaci s počítačem a programovací konektor. Procesorová deska je v zásuvném provedení, jež se zasune do příslušných konektorů umístěných na základní desce.

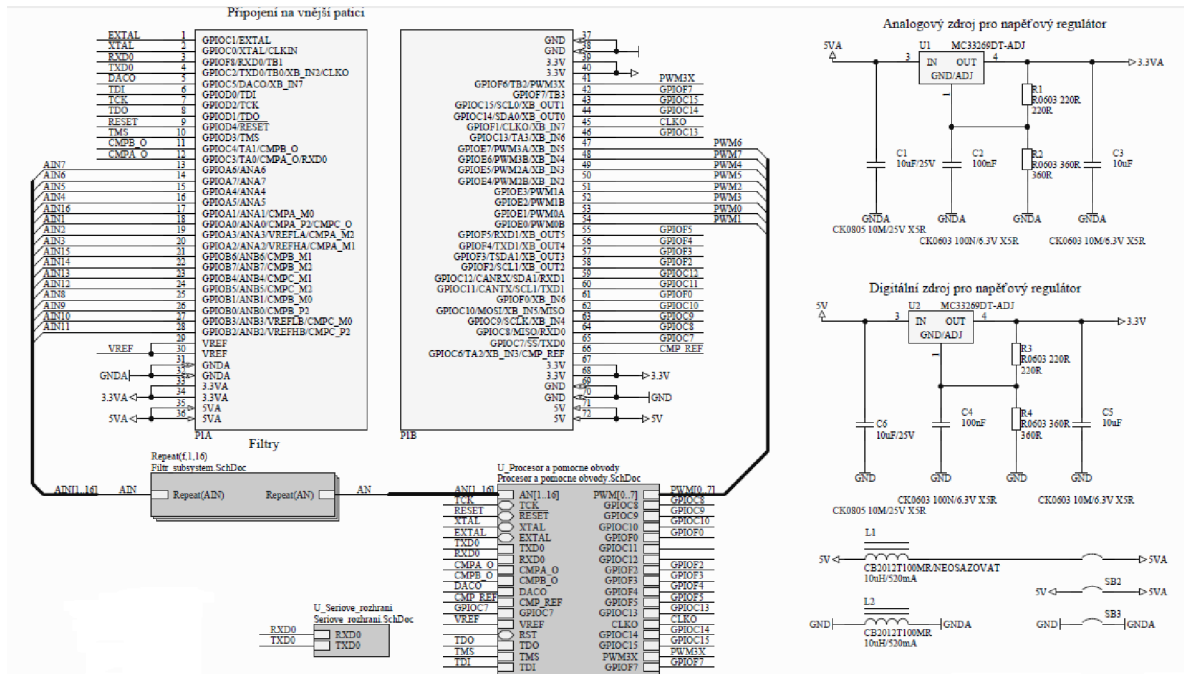
Procesorová deska obsahuje mikroprocesor od Freescale Semiconductor typ MC56F8257VLH/MLH. Jedná se o mikropočítač, který obsahuje veškeré obvody nutné pro jeho činnost, jako jsou digitální vstupy/výstupy včetně výstupů PWM, analogové převodníky, rozhraní pro sériovou komunikaci. Dále je na desce umístěn obvod pro komunikaci přes port USB, filtry analogových signálů. Napájení analogové i digitální části procesorové desky zajišťují dva stabilizátory, které stabilizují vstupní napájecí napětí 5V přivedených ze základní desky, na napětí 3,3V nutných k napájení procesoru. Dále obvody obsahují budič 8 LED diod, které jsou napojeny na výstupy PWM signálu, tudíž je možno opticky sledovat činnost těchto signálů a tím i chod řízení měniče. Pro ovládání základních funkcí jsou na desce umístěny tři mikropřepínače, které je možné využít pro jakoukoliv funkci. Poslední čtvrtý mikropřepínač je určen pro reset obvodu. Návrh schéma zapojení a desky plošných spojů není součástí této práce. Autorem původního návrhu desky je Ing. Josef Kadlec, který také disponuje veškerou dokumentací k této desce. Vzhledem k rozsahu zapojení, je zde pro úplnost a názornost této práce uvedeno pouze základní připojovací schéma této procesorové desky, které je nutné pro návrh a realizaci základní desky a dále je zobrazen návrh desky plošných spojů.



Obrázek 12 3D vizualizace procesorové desky

3.5.1 Schéma zapojení

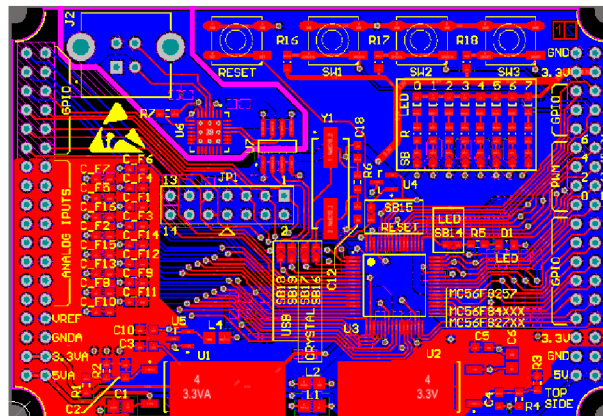
Na základním schématu zapojení jsou zobrazeny oba připojovací konektory, stabilizátory napětí 3,3V – jeden pro analogovou část, druhý pro digitální část. Toto základní schéma je postačující pro tuto práci a pro další návrh základní desky.



Obrázek 13 Základní schéma zapojení procesorové desky

3.5.2 Deska plošných spojů

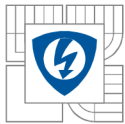
Deska je navržena o rozměrech 80x55mm. Mechanické uchycení k základní desce je zasunutím připojovacích konektorů na základní desku.



Obrázek 14 Návrh plošného spoje procesorové desky

3.5.3 Připojovací tabulka

Pro správné připojení, ale také k programování procesorové desky, přivedení veškerých signálů je nutné znát označení všech signálů a jejich připojení k daným pinům procesoru. Pokud by nebylo známo zapojení signálů, nebylo by možno navrhnout základní desku a v dalších krocích programovat procesorovou desku bez znalosti hardwarového vybavení standu.



V následující tabulce je přehled využitých pinů procesorové desky. Toto rozmístění a význam jednotlivých signálů platí pro základní desku verze 1.0. Tabulka obsahuje pouze výpis použitých signálů.

Tabulka 7 Připojení pinů procesorové desky a jejich využití

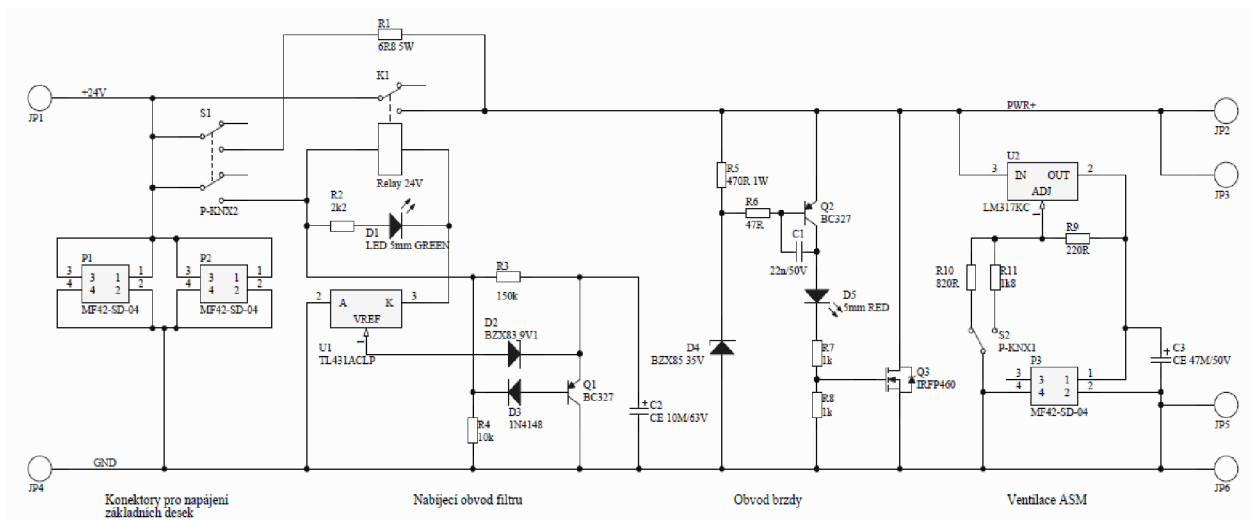
| Pin | Signál | Směr | Typ | Popis |
|--------------------|-----------|--------|---------|-----------------------------------|
| GPIOE1/PWM0A | PWM0 | Výstup | Digital | PWM horní tranzistor větev A |
| GPIOE0/PWM0B | PWM1 | Výstup | Digital | PWM dolní tranzistor větev A |
| GPIOE3/PWM1A | PWM2 | Výstup | Digital | PWM horní tranzistor větev B |
| GPIOE2/PWM1B | PWM3 | Výstup | Digital | PWM dolní tranzistor větev B |
| GPIOE5/PWM2A | PWM4 | Výstup | Digital | PWM horní tranzistor větev C |
| GPIOE4/PWM2B | PWM5 | Výstup | Digital | PWM dolní tranzistor větev C |
| GPIOE6/PWM3B | ERR | Vstup | Digital | Signál fault z budičů |
| GPIOF3/TSDA1 | SDA0 | | Digital | I2C - (LCD displej) |
| GPIOF2/SCL1 | SCL0 | | Digital | I2C - (LCD displej) |
| GPIOC12/CANRX/SDA1 | RXD1 | | Digital | Seriová komunikace |
| GPIOC11/CANTX/SCL1 | TXD1 | | Digital | Seriová komunikace |
| GPIOF0 | RDVEL | Výstup | Digital | Poloha -H/rychlost - L - Resolver |
| GPIOC10/MOSI | SAMPLE | Výstup | Digital | SAMPLE - Resolver |
| GPIOC9/SCLK | SCLK_RES | Výstup | Digital | SERIAL CLOCK INPUT - Resolver |
| GPIOC8/MISO/RXD0 | SO_RES | Vstup | Digital | SERIAL OUTPUT - Resolver |
| GPIOC7/SS/TXD0 | RD_RES | Výstup | Digital | READ - Resolver |
| GPIOC6/TA2/XB_IN3 | ENABLE | Vstup | Digital | ENABLE - blokování budičů |
| GPIOC4/TA1/CMPB_O | ENC_B | Vstup | Digital | Encoder B |
| GPIOC3/TA0/CMPA_O | ENC_A | Vstup | Digital | Encoder A |
| GPIOA7/ANA7 | ENC_INDEX | Vstup | Digital | Encoder Index |
| GPIOA6/ANA6 | U_1 | Vstup | Analog | Napětí meziobvodu |
| GPIOA5/ANA5 | I_2 | Vstup | Analog | Proud měničem větev A |
| GPIOA4/ANA4 | I_1 | Vstup | Analog | Proud měničem větev C |
| GPIOA3/ANA3 | INA3 | Vstup | Analog | Ovladačí panel |
| GPIOA2/ANA2 | INA2 | Vstup | Analog | Ovladačí panel |
| GPIOA1/ANA1 | INA1 | Vstup | Analog | Ovladačí panel |
| GPIOA0/ANA0 | INA0 | Vstup | Analog | Ovladačí panel |
| GPIOB7/ANB7 | IND7 | Vstup | Digital | Ovladačí panel |
| GPIOB6/ANB6 | IND6 | Vstup | Digital | Ovladačí panel |
| GPIOB5/ANB5 | IND5 | Vstup | Digital | Ovladačí panel |
| GPIOB4/ANB4 | IND4 | Vstup | Digital | Ovladačí panel |
| GPIOB3/ANB3 | IND3 | Vstup | Digital | Ovladačí panel |
| GPIOB2/ANB2 | IND2 | Vstup | Digital | Ovladačí panel |
| GPIOB1/ANB1 | IND1 | Vstup | Digital | Ovladačí panel |
| GPIOB0/ANB0 | IND0 | Vstup | Digital | Ovladačí panel |

3.6 Brzdná jednotka

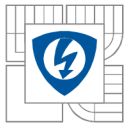
Brzdná jednotka je v laboratorním standu použita pouze jednou a je tedy společná pro oba motory. Tato jednotka obsahuje obvody napájení celého laboratorního standu, brzdný tranzistor a napájecí obvod ventilátoru asynchronního motoru.

Napájecí napětí laboratorního standu je provedeno ze stejnosměrné rozvodné sítě laboratorních stolů napětí o hodnotě 24V. Napájení jedné této sestavy je provedeno přes tuto brzdnou jednotku, která sdružuje funkci napájení a brzdy. Deska slouží k rozvodu napájecího napětí pro řídicí obvody o hodnotě 24V. Dále se přes tuto desku napájejí kondenzátory stejnosměrného meziobvodu umístěné na deskách výkonových měničů. Aby nedocházelo k proudovým rázům při připojení napájecího napětí na kondenzátory výkonových měničů, obsahuje deska nabíjecí obvod pro zapnutí. Povel k zapnutí je realizován páčkovým spínačem umístěným na této desce. Jakmile je sepnut páčkový spínač, přes odpor R1 dojde k nabíjení kondenzátorů meziobvodu. Od sepnutí páčkového přepínače se odvozuje i doba pro přemostění nabíjecího odporu R1 pomocí relé K1. Po uplynutí této doby je meziobvod již napájen přes kontakt relé K1. Tento stav je signalizován pomocí LED diodou zelené barvy. Po rozepnutí páčkového spínače dojde k okamžitému odpadnutí relé a meziobvod je bez napájecího napětí. Dále deska obsahuje napájecí obvod ventilátoru asynchronního motoru. Jelikož je tento ventilátor napájen napětím 12V, je napájení zajištěno pomocí stabilizátoru a páčkového přepínače, kterým je možno měnit velikost otáček. Ventilátor se rozbíhá ihned po přivedení napájecího napětí na kondenzátory meziobvodu. Při vypnutí pomáhá tento obvod vybití meziobvod. Důležitou součástí této desky je obvod brzdy. Tento obvod pracuje nezávisle na měničích a jeho funkcí je, aby nedocházelo k překročení určitého napětí na meziobvodu při rekuperaci kteréhokoliv z motorů. V případě, že napětí překročí danou mez, bude energie při rekuperačním brzdění mařena ve výkonovém tranzistoru MOS FET.

3.6.1 Schéma zapojení



Obrázek 15 Schéma zapojení brzdné jednotky



Napájecí napětí usměrněné sítě 24V je přivedeno na šroubové svorky JP1 a JP4, odtud se přes konektory P1, P2 typu MINIFIT napájí obě základní desky řídicích obvodů napětím 24V. Z uvedeného je tedy patrné, že při zapnutí stejnosměrné sítě je okamžitě přivedeno napájecí napětí pro řídicí obvody. Dále lze schéma rozdělit na tři základní části a to:

- Nabíjecí obvod
- Obvod brzdy
- Obvod ventilace ASM

Nabíjecí obvod je uveden v činnost po zapnutí páčkového spínače S1. Přes jeho kontakty a odpor R1 je nabíjen meziobvod výkonových měničů. Současně je přes odpor R3 nabíjen kondenzátor C2 časovacího obvodu. Napětí na tomto kondenzátoru je přes Zenerovu diodu D2 přivedeno na referenční vstup obvodu TL431. Po dosažení napětí cca 12V na kondenzátoru C2 dojde k sepnutí relé K1, které svým kontaktem přemostí nabíjecí odpor R1. Tranzistor Q1 spolu s diodou D3 a odporem R4 slouží k rychlému vybití kondenzátoru C2 při vypnutí. Tímto způsobem je zaručeno, že při opětovném zapnutí spínače S1 dojde nejprve k nabíjení meziobvodu přes odpor R1.

Obvod brzdy využívá ke své činnosti principu paralelního stabilizátoru. Velikost napětí, při kterém dojde k maření přebytečné energie na teplo, je stanovena pomocí Zenerovy diody D4. Napětí je nastaveno přibližně na 35V zapojením dvou vhodných diod do série. Pokud napětí na meziobvodu překročí nastavenou mez, dojde k otevření tranzistoru Q2 a tím i výkonového tranzistoru MOS-FET Q3, na kterém se maří energie v teplo. Tento stav je signalizován pomocí LED diody D5 červené barvy.

Napájení ventilátoru chlazení asynchronního motoru je zajištěno pomocí regulovatelného stabilizátoru LM317 v typickém zapojení, které je doplněno několika součástkami. Pomocí přepínače S2 a odporů R₁₀, R₁₁ se mění výstupní napětí na hodnotu 12V nebo 6V. Ventilátor je připojen přes konektor P3 typu MINIFIT.

Pro výstupní napětí obvodu LM317 platí:

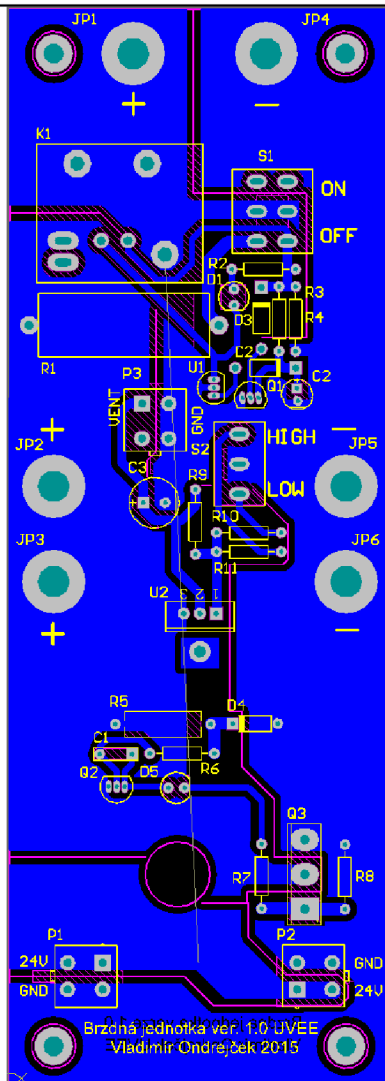
$$U_{out} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_{10(11)}}{R_9}\right) \quad (3)$$

V případě $R_9=220\Omega$, pro napětí $U_{out}=12V$ $R_{10}=1k\Omega$, pro napětí $U_{out}=6V$ $R_{11}=820\Omega$

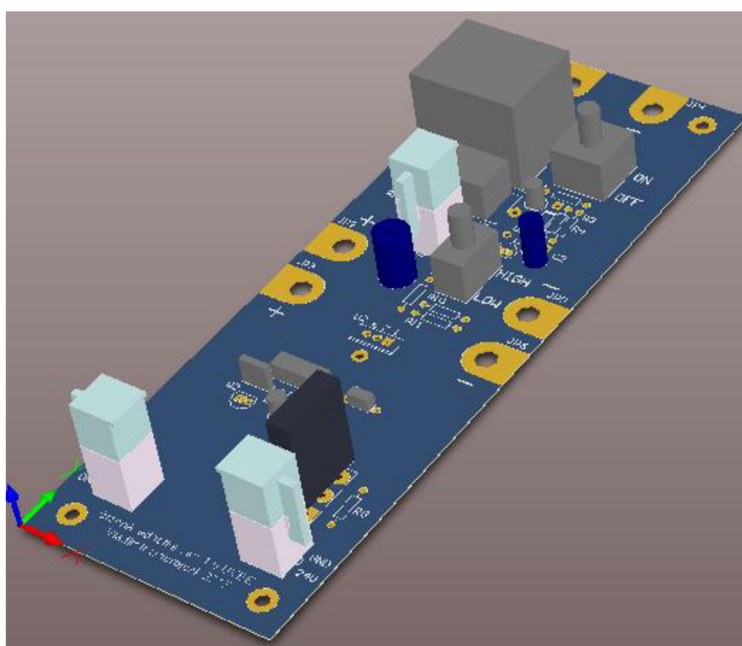
Připojení meziobvodů výkonových měničů je provedeno pomocí šroubových spojů JP2, JP3 a JP5, JP6.

3.6.2 Deska plošných spojů

Deska má rozměry 170x60mm. V každém rohu desky je otvor pro uchycení k základně laboratorního standu pomocí distančního sloupku. Ve spodní části je otvor pro přišroubování výkonového brzdového tranzistoru MOS-FET k hliníkové základně.



Obrázek 16 Deska plošného spoje brzdě jednotky



Obrázek 17 3D vizualizace brzdě jednotky

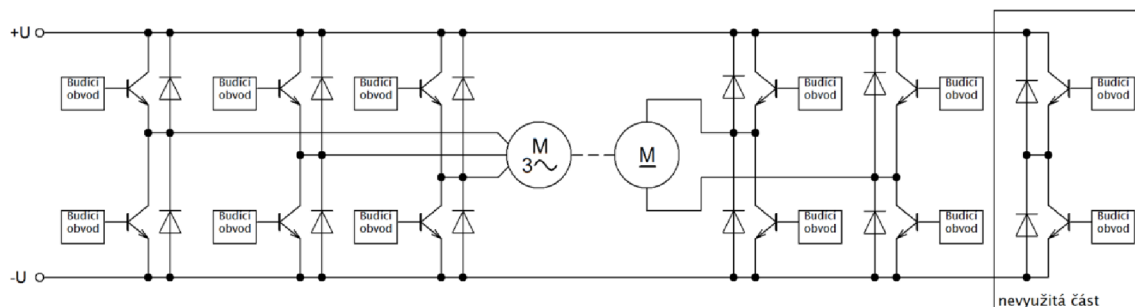
3.6.3 Připojovací tabulka

Tabulka 8 Připojovací body brzděné jednotky

| Č. pinu | Označení vývodu | Poznámka |
|---------------------------------|-----------------|------------------------|
| ŠROUBOVÉ VÝVODY M5 | | |
| JP1 | +U | Přívod napájení + |
| JP4 | -U | Přívod napájení - |
| JP2 | + | Vývod výkon. Měnič + |
| JP3 | + | Vývod výkon. Měnič + |
| JP5 | - | Vývod výkon. Měnič - |
| JP6 | - | Vývod výkon. Měnič - |
| KONEKTORY P1, P2 MINIFIT | | |
| 1,3 | 24V | Řídicí obvody +24V |
| 2,4 | GND | Řídicí obvody GND |
| KONEKTOR P3 MINIFIT | | |
| 1 | VENT | Kladný pól ventilátoru |
| 2,4 | GND | GND ventilátoru |
| 3 | - | Snímaní otáček |

3.7 Budicí obvod tranzistoru měniče

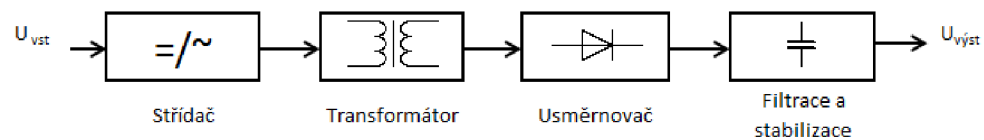
Pro zajištění přenosu řídicích signálů pro tranzistory z řídicí části do výkonové je použito budících obvodů. Laboratorní stand obsahuje celkem dvě totožné desky výkonového měniče. Měnič obsahuje celkem šest tranzistorů. Pro zajištění galvanického oddělení je tedy nutno u každého měniče osadit celkem šest budících obvodů, respektive čtyři při použití měniče jako čtyřkvadrantového stejnosměrného pulsního měniče. Z předchozích informací je tedy patrné, že celkový počet použitých budičů je 10 kusů. Navržený budicí obvod proto musí být spolehlivý, kompaktní a jednoduchý. Tyto budiče budou osazeny přímo na základní desce. V případě potřeby je možné jednotlivé budiče ze základní desky vyjmout a provést případné opravy apod.



Obrázek 18 Použití budících obvodů v laboratorním standu

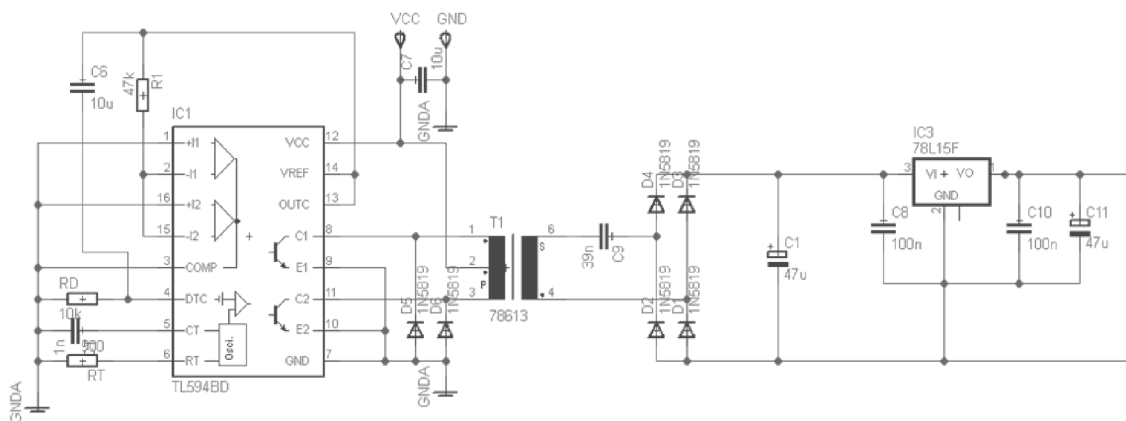
3.7.1 Provedení budicího obvodu

Jak již bylo zmíněno, je nutné, aby budicí obvod zajišťoval galvanické oddělení jak napájecího napětí, tak i řídicího signálu. U napájecího napětí se tohoto efektu dosáhne použitím DC/DC měniče, kdy je vstupní stejnosměrné napětí rozstředáno, přeneseno přes impulsní transformátor, opět usměrněno, filtrováno a popřípadě stabilizováno. Blokové uspořádání napájecího obvodu je zobrazeno na *obrázku 10*.

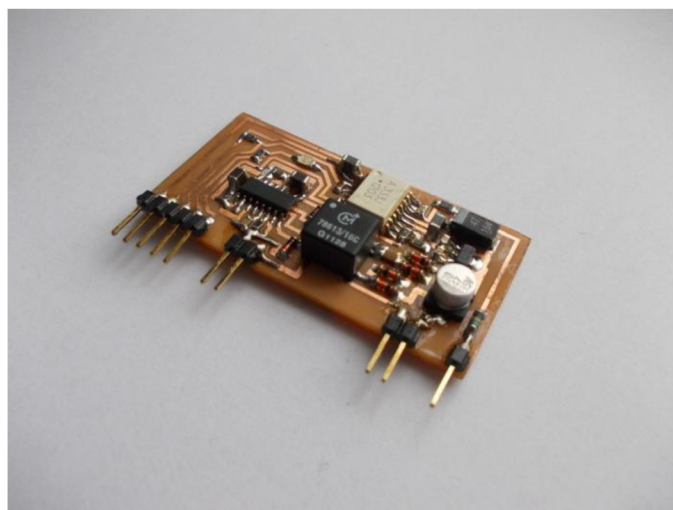


Obrázek 19 Blokové zapojení napájecí budiče [5]

V původní verzi budiče řešeného v rámci bakalářské práce bylo využito obvodu TL594. Tento obvod byl určen pro pulsně-šířkovou modulaci a pracuje v zapojení PUSH-PULL s pevnou frekvencí a střídou. Toto zapojení bylo použito, jelikož nebylo možné pořídit vhodný transformátor pro naše účely. Původní použité zapojení napájecí je na *obrázku 20*

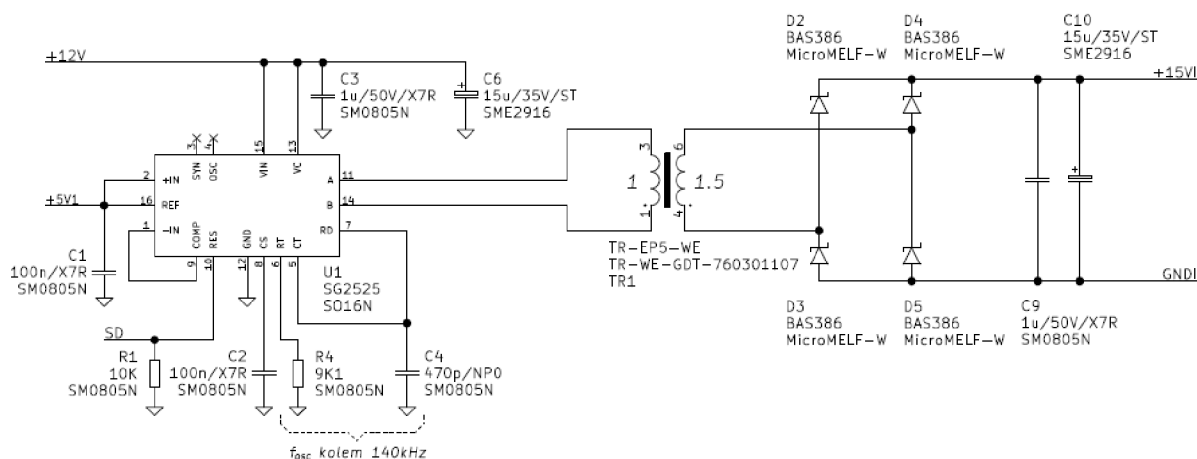


Obrázek 20 Původní zapojení napájecí části budiče [5]



Obrázek 21 Fotografie původního provedení [5]

Po dokončené bakalářské práci byl v dalším období nalezen transformátor určený přímo pro účely budičů tranzistorů MOS-FET od výrobce WÜRTH ELEKTRONIK. Tento typ transformátoru umožnil zjednodušit napájecí obvod budiče a realizovat jej jako dvojitým zapojení. Další výhodou je různý rozsah převodů, čímž je možno ovlivnit velikost výstupní napětí. U předchozí původní verze bylo výstupní napětí transformátoru dvojnásobné vůči vstupnímu, neboť převod byl 1:2, což je pro některé aplikace nevhodné. Na základě těchto poznatků byl sestaven nový návrh napájecí části, která využívá obvod SG2525 a již zmíněný transformátor.



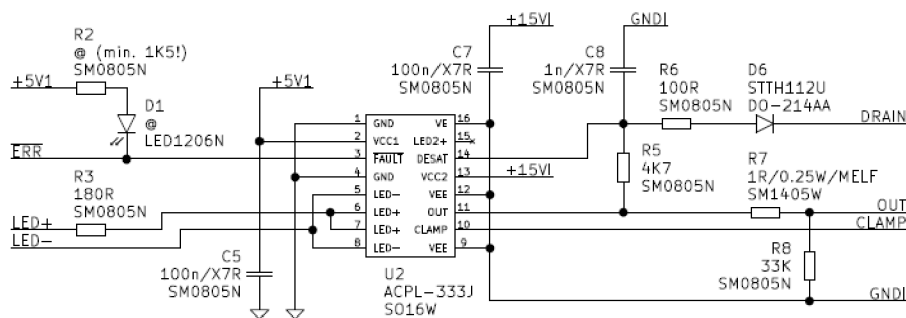
Obrázek 22 Nově navržené zapojení napájecí části

Pro přenos řídicího signálu a jako budič hradla tranzistoru byl vybrán obvod AVAGO ACPL-333J. Tento obvod je určen přímo pro aplikace řízení tranzistoru MOS-FET. Budič má implementovanou elektronickou ochranu podpětí napájecího napětí a saturační ochranu. Vstup a i a výstup chybového signálu je oddělen optočlenem. Katalogové údaje tohoto obvodu jsou uvedeny v tabulce 2

Tabulka 9 Parametry budičeho obvodu ACPL-333J [7]

| AVAGO ACPL-333J | |
|----------------------------------|----------------------|
| Napájecí napětí | 15V |
| Macimální výstupní proud | 2,5A |
| Výstupní napěťová úroveň | 33V / -15V |
| Výkonová zatížitelnost | 0,6W |
| Vstupní napájecí proud naprázdno | 25mA |
| Zpoždění signálu zapnutí | 180ns |
| Zpoždění signálu vypnutí | 180ns |
| Odolnost du/dt | 15kV/µs |
| Izolační pevnost | 3750V _{RMS} |
| Detekce saturačního napětí od | 6V |

Na následujícím obrázku je uvedeno zapojení budiče ACPL-333J



Obrázek 23 Budič ACPL-333J

Z předchozího obrázku jsou patrné možnosti řízení. Obě svorky vstupního optočlenu jsou vyvedeny, tudíž je možno obvod řídit v kladné nebo záporné části vstupního obvodu. Rovněž je zde vyveden signál chyby, který je negovaný a v provedení s otevřeným kolektorem.

3.7.2 Problémy s novým řešením budicího obvodu

Před zahájením návrhu a realizace základní desky řídicích obvodů bylo nutné odzkoušet nové provedení budicího obvodu. Během zkoušek se projevil některé problémy v napájecí části. Použití transformátoru s převodem 1:1,5 dochází k nevhodnému zvýšení napětí na výstupní straně. Tento převod byl zvolen kvůli tomu, že nebylo možné použít obvod SG2525 napájet napětím vyšším než 12V, přitom podle katalogových údajů je možno tento obvod napájet napětím až 35V. Zároveň se však vyskytl problém s pracovní frekvencí tohoto obvodu. Spínací frekvence tohoto obvodu musí být dostatečně velká, aby nedocházelo k přesycování transformátoru, ale při použití jmenovaného napájecího napětí a požadované frekvence docházelo k nadměrnému přehřívání obvodu SG2525. Toto nadměrné zahřívání bylo zaznamenáno i při zvýšení frekvence při konstantním napětí nebo naopak. V následující tabulce jsou uvedeny základní parametry obvodu SG2525A. Z tabulky je patrné, že uvedený obvod by měl pracovat bez problému při uvedeném napájení a frekvenci 140kHz, ale tento obvod parametry zcela nespĺňuje.

Tabulka 10 Parametry obvodu SG2525A

| SG2525A | |
|-------------------------------|--------|
| Maximální vstupní napětí | 35V |
| Výstupní napětí stabilizátoru | 8V |
| Maximální frekvence | 500kHz |
| Minimální frekvence | 100kHz |
| Max. výstupní proud | 500mA |

3.7.3 Návrh nové varianty budicího obvodu

V důsledku předchozích uvedených problémů s napájecí částí budiče bylo nutno nalézt nové řešení. V rámci toho je nutné opět navrhnout nové schéma zapojení a zcela nový návrh desky plošných spojů tohoto budiče.

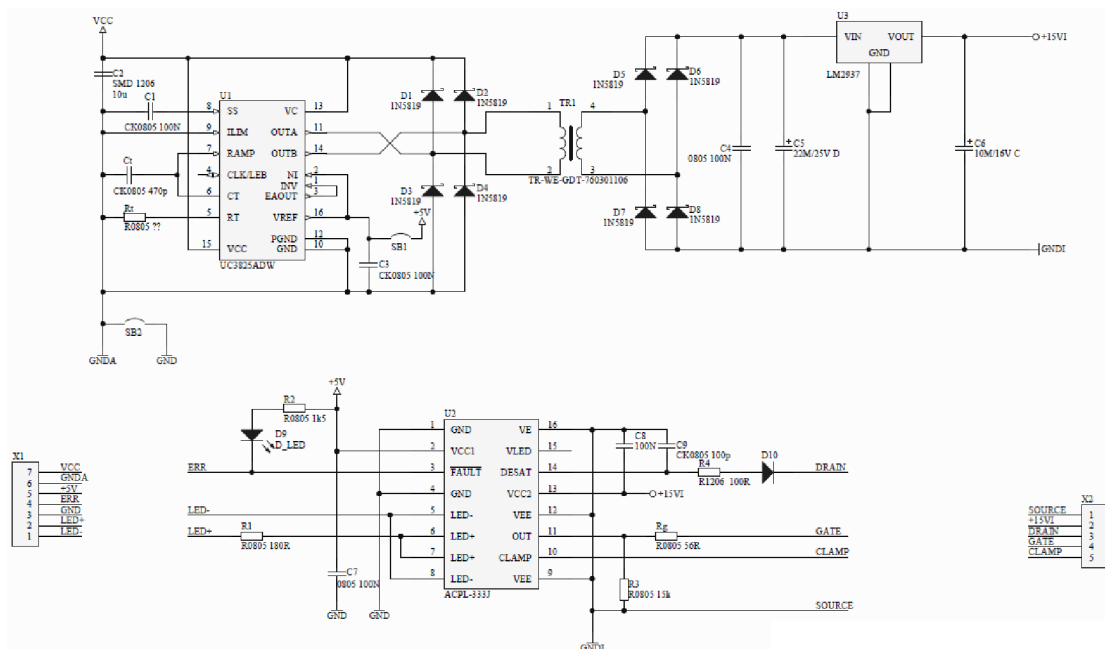
Jako náhrada za obvod SG2525A byl nalezen obvod UC3825. Jedná se o velmi rychlý PWM kontrolér, který je vhodný pro napájecí obvody s použitím velmi vysokých frekvencí. Je možno využít napěťovou nebo proudovou regulaci. V následující tabulce jsou uvedeny technické parametry obvodu UC3825.

Tabulka 11 Parametry obvodu UC3825

| UC3825 | |
|--------------------------|-------|
| Maximální vstupní napětí | 30V |
| Maximální frekvence | 1MHz |
| Jmenovitý výst. proud | 500mA |
| Špičkový výst. proud | 1,5A |

Ještě před začátkem návrhu zapojení a plošného spoje byl tento obvod podroben všem zkouškám v provizorním zapojení a obvod zcela vyhověl. Díky použití tohoto obvodu se rozšířil rozsah napájecích napětí i frekvencí. Nyní je možno osadit transformátory s různým převodem pro použití v daných aplikacích. Obvod se tak stal univerzálnější.

3.7.4 Schéma zapojení nové verze

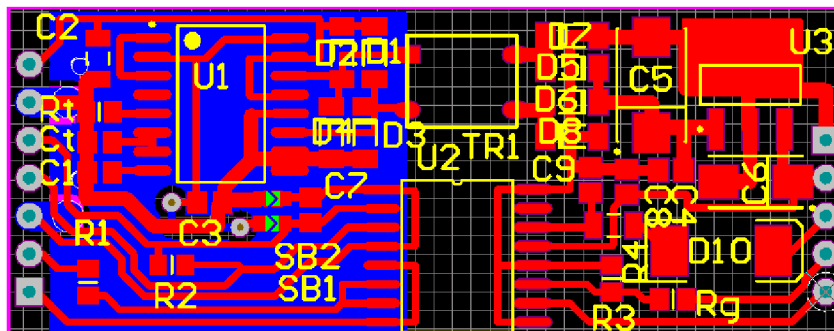


Obrázek 24 Nové zapojení budícího obvodu

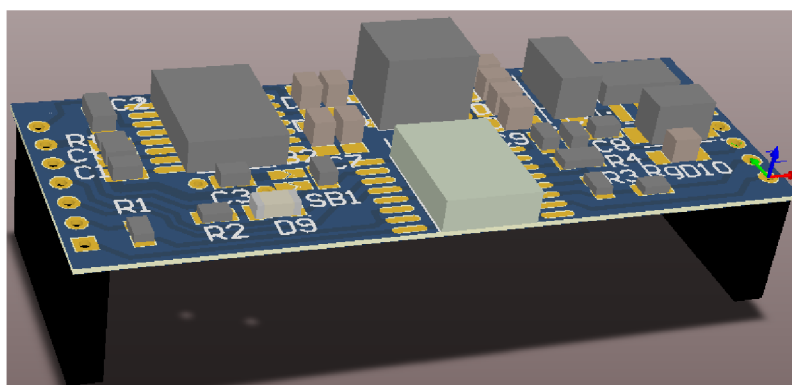
Oproti předchozímu návrhu bylo zapojení doplněno o stabilizátor napětí 15V na výstupní straně a nulové diody na primární straně transformátoru.

3.7.5 Deska plošných spojů

Deska je navržena s rozměry 56x22mm. Provedení je zásuvné, kdy se vyrobený budič zasune do plošných spojů základní desky a zde se jednotlivé piny připájí.



Obrázek 25 Plošný spoj nového návrhu 2:1



Obrázek 26 3D vizualizace budicího obvodu

3.7.6 Připojovací tabulka

V následující tabulce je seznam všech signálů vstupujících a vystupujících z budicího obvodu.

Tabulka 12 Signály budicího obvodu

| Č. pinu | Označení vývodu | Poznámka |
|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| PATICE X1 - rozteč 2,54mm | | |
| 1 | LED- | katoda vstupního optočlenu |
| 2 | LED+ | anoda vstupního optočlenu |
| 3 | GND | GND napájení |
| 4 | ERR | Výstup signálu saturační ochrany |
| 5 | 5VD | Napájecí napětí 5V |
| 6 | GND A | Napájecí napětí budiče |
| 7 | UCC | Napájecí napětí budiče |
| PATICE X2 - rozteč 2,54mm | | |
| 1 | SOURCE | Source spínaného tranzistoru |
| 2 | 15VI | Napětí budiče 15V |
| 3 | DRAIN | Drain spínaného tranzistoru |
| 4 | GATE | Gate spínaného tranzistoru |
| 5 | CLAMP | Clamping |

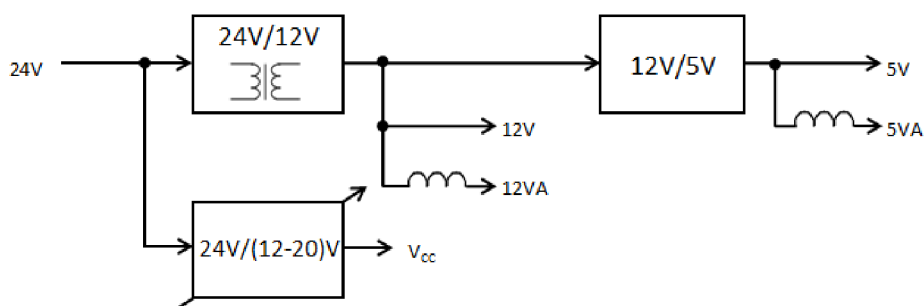
3.8 Základní deska

Základní deska slouží jako hlavní deska pro všechny desky obsažené v laboratorním standu. Zajišťuje svými napájecími obvody napájení veškerých digitálních i analogových obvodů, budících obvodů, procesorové desky apod. Na základní desce je umístěn vyhodnocovací obvod resolveru pro snímání polohy hřídele popřípadě otáček. Tento obvod je osazen převodníkem AD2S1200 od firmy Analog Devices. Deska dále zajišťuje přizpůsobení a měření některých analogových signálů – proudů a napětí. Pro možnosti odladování programů je na desce obvod hradel, který blokuje výstupní signály PWM pro budiče tranzistorů. Doplňkové logické obvody slouží pro vyhodnocení některých signálů a přivedení těchto signálů na vstup procesorové desky. Vstupní a výstupní konektory vyvedené pro vzájemnou komunikaci dvou desek, pro ovládací panel, výstup enkodéru jsou rovněž umístěny na základní desce.

Řídící obvody laboratorního standu je nutno napájet různými velikostmi napájecího napětí. Vytváření a stabilizaci jednotlivých napětí zajišťují obvody napájení. Pro potřeby obvodů umístěných na základní desce jsou nutná tato napětí:

- 12V pro napájení analogových obvodů
- 5V pro napájení digitálních obvodů
- 5V pro napájení analogových obvodů
- Proměnné napájecí napětí pro budící obvody

Všechna výše uvedená napájecí napětí je nutno vytvořit, neboť napájení celého laboratorního standu je zajištěno z rozvodu stejnosměrné sítě o hodnotě napětí 24V. Napájecí napětí o hodnotách 12V a 5V jsou provedena jako galvanicky oddělená od napájecí sítě 24V. Napětí proměnné velikosti určené pro budící obvody není nutno oddělovat, neboť napájecí část budících obvodů již galvanické oddělení zajišťuje.



Obrázek 27 Blokové zapojení napájecích obvodů

Na obrázku 27 je patrné blokové zapojení napájecí části. Snižující měnič z napětí 24V na napětí o hodnotě 12V mimo jiné zajišťuje galvanické oddělení. Ze sběrnice 12V je přes miniaturní tlumivku vyvedeno napájení 12VA určené pro analogové aplikace. Dále je zde připojen další snižující měnič, který vytváří potřebné napětí o hodnotě 5V. Opět je přes miniaturní tlumivku vyvedeno napájecí napětí 5VA určené pro analogové obvody. V poslední řadě je z napětí 24V dalším snižujícím měničem vytvářeno napětí proměnné velikosti určené pro napájení budících obvodů, ovšem již bez galvanického oddělení od sítě 24V.

Pro zajištění galvanicky odděleného napájecího napětí 12V je použito obvodu TRACO. Pro napájecí napětí 5V je využito zapojení s použitím regulátoru LM2596S-5V. Proměnné napájecí napětí v rozsahu 12 až 20V pro budicí obvody je vytvořeno použitím regulátoru LM2596S-ADJ.

Obvod TRACO je DC/DC měnič od společnosti TRACOPOWER v provedení SMD, na který je možno připevnit vnější chladič pro účinné chlazení obvodu. Tento obvod je k dispozici v různém výkonovém provedení v rozsahu od 1W do 200W a s různou velikostí výstupního napětí. Jedná se o obvod, který zajišťuje galvanické oddělení výstupního napětí od napětí vstupního. Rozměry tohoto provedení jsou velmi malé, a proto je vhodný pro různě náročné aplikace.

V aplikaci jako napájecí obvod řídicích obvodů je použito Traca typu TEN8-2412 o výkonu 8W vstupním jmenovitým napětí 24V a jmenovitým výstupním napětí 12V.

Tabulka 13 Parametry obvodu TRACO TEN8-2412[9]

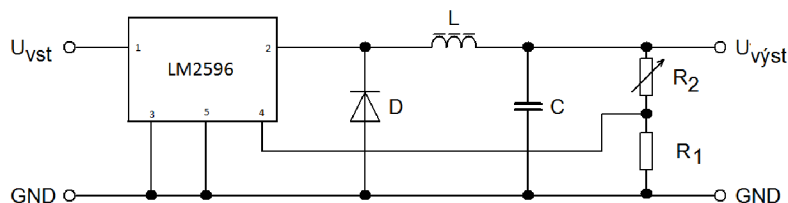
| TEN8-2412 | |
|--------------------------|---------------|
| Jm. vstupní napětí | 24V |
| Rozsah provozního napětí | 18-36V |
| Jm. výstupní napětí | 12V |
| Jm. výstupní proud | 670mA |
| Rozsah provozních teplot | -40°C až 85°C |

Obvod typu LM2596 obsahuje všechny součásti integrovány do své struktury tak, aby s doplněním několika externích součástek bylo možno vytvořit snižující měnič. Dále obvod obsahuje tepelnou ochranu a proudové omezení. Obvod LM2596 je k dispozici v několika provedeních jako pevný regulátor napětí – typicky 5V, 12V, 15V a v provedení jako regulátor s nastavitelným výstupním napětím. Následující tabulka uvádí parametry obvodu LM2596.

Tabulka 14 Parametry obvodu LM2596 [10]

| LM2596 | |
|-----------------------------|-----------------|
| Max. vstupní napětí | 45V |
| Jm. výstupní napětí- pevné | 3,3V 5V 12V 15V |
| Jm. výstupní napětí- regul. | 1,2V - 37V |
| Max. výstupní proud | 3A |

Pro funkci snižujícího měniče je nutno obvod doplnit některými součástkami – zejména je nutno doplnit nulovou diodu, filtrační tlumivku a filtrační kondenzátor. Tlumivka a kondenzátor tvoří LC filtr snižujícího měniče. Při použití regulovatelného měniče je nutno obvod doplnit děličem napětí sestaveného z rezistoru R_1 a proměnného rezistoru (trimru) R_2 . V případě pevného regulátoru napětí je vývod 4 zapojen přímo na výstup (bez děliče napětí).

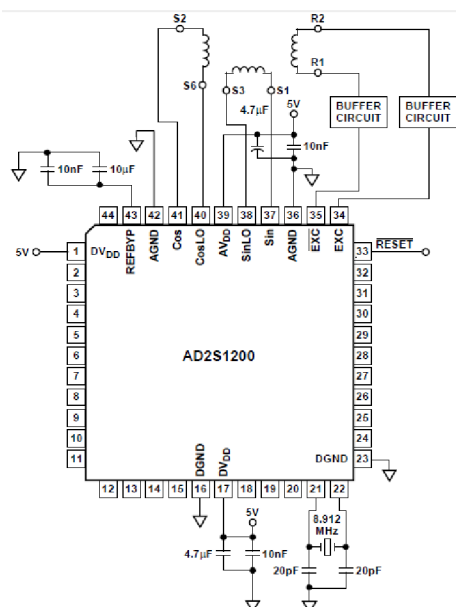


Obrázek 28 Typické zapojení s obvodem LM2596

Pro výstupní napětí snižujícího napětí dle obrázku 18 platí:

$$U_{výst} = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right), \quad U_{REF} = 1,23V \quad (4)$$

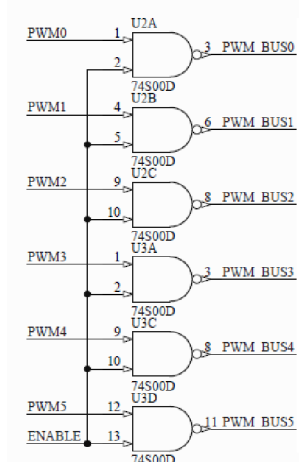
K vyhodnocení výstupního signálu resolveru byl vybrán převodník firmy ANALOG DEVICES s označením AD2S1200. Jedná se o R/D –resolver/digital převodník, který má 12-bitové rozlišení. Obvod v sobě integruje sinusový oscilátor, poskytující buzení pro resolver. Externí 8,192 MHz krystal poskytuje přesné časové údaje. Tyto hodiny jsou vnitřně rozděleny, aby generovaly potřebný kmitočet pro řízení všech periférií. R/D převodník zpracovává vstupní signály v rozsahu 10kHz až 20kHz na vstupech Sin a Cos o hodnotě $3,6V_{p-p} \pm 10\%$, které jsou převáděny do digitální podoby, úhel natočení a rychlost. Maximální rychlost je $1000 s^{-1}$ [11].



Obrázek 29 Doporučené zapojení AD2S1200 [11]

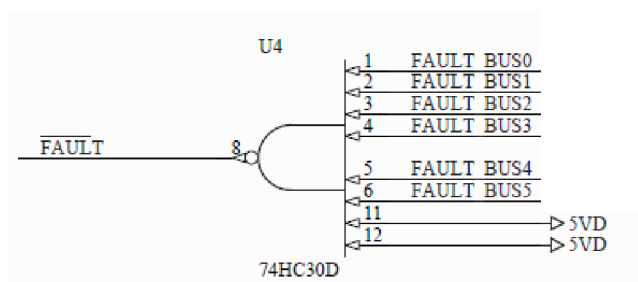
Aby mohly být řídicí signály z mikroprocesorové desky určené pro řízení měničů a následně zpětnovazební signály správně zpracovány a aby byla zajištěna odolnost laboratorního standu, musí být deska řídicích obvodů doplněna logickými hradly. Pro účely laboratorního standu je nutné, aby bylo možno řídicí signály pro budící obvody a tím i měniče blokovat při nestandardních situacích. Díky těmto okolnostem je řídicí deska doplněna hradly blokování signálů PWM. Blokování se provádí pomocí spínače umístěného na řídicí desce a tímto je zaručena vysoká odolnost standu proti neoprávněným a nevhodným zásahům. Tuto funkci je

možno využít i pro měřicí a zkušební účely – například testování mikroprocesorové desky se zablokovanými výstupy pro měnič.



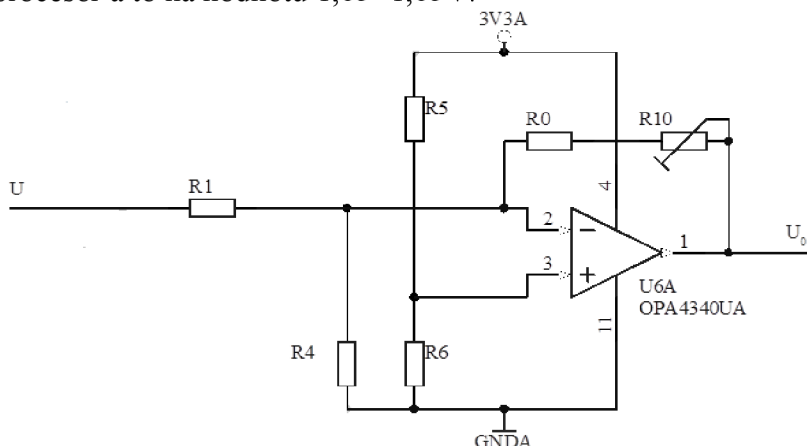
Obrázek 30 Blokování signálů PWM

Dále pro správnou funkci laboratorního standu je nutné vyhodnotit signál poruchy. Budicí obvody pro tranzistory MOS-FET obsahují saturační ochranu, jejíž zapůsobení je signalizováno výstupem FAULT. Tyto jednotlivé výstupy z budících obvodů je nutno vyhodnotit a vytvořit jeden celkový výstupní chybový signál FAULT.



Obrázek 31 Vyhodnocení signálu FAULT

Pro zpracování analogových signálů jsou na desce umístěny operační zesilovače, které přizpůsobují vstupní signály na úroveň pro A/D převodník procesoru. Dva operační zesilovače s totožným zapojením jsou použity pro úpravu signálu proudu a jeden pro měření napětí meziobvodu. Výstupní signál čidel LEM pro měření proudu je $2,5V \pm 2,5V$ a tento je potřeba přizpůsobit pro procesor a to na hodnotu $1,65 \pm 1,65V$.



Obrázek 32 Přizpůsobení signálu proudového čidla

Na neinvertující vstup operačního zesilovače je nutné přivést polovinu napájecího napětí – tudíž napětí o hodnotě 1,65V. Toto napětí je nastaveno pomocí děliče složeného z odporů R_5 a R_6 . A tedy platí:

$$R_5 = R_6 \quad (5)$$

V klidovém stavu je výstupní napětí proudového čidla 2,5V, aby výstupní napětí U_0 bylo 1,65V musí platit:

$$\frac{U - U_0}{U_0} = \frac{R_1}{R_4} \quad (6)$$

Poté pro náš případ:

$$\frac{2,5 - 1,65}{1,65} = \frac{R_1}{R_4} = \underline{0,515} \quad (7)$$

Odpory R_1 a R_4 byly vybrány tak, aby odpovídali tomuto poměru, tudíž $R_1=4k7$ a $R_4=9k1$. Potom pro výstupní napětí bude platit následující rovnice:

$$U_0 = (2,5 - U) \frac{R_0}{R_1} + 1,65 \quad (8)$$

Aby platil převod rozsahu proudové čidla LEM 4,5V \rightarrow 0,3V a 0,5V \rightarrow 3V – invertující zapojení ($0 \pm 80A = 1,65 \pm 1,35V$) musí být hodnota odporu R_0 :

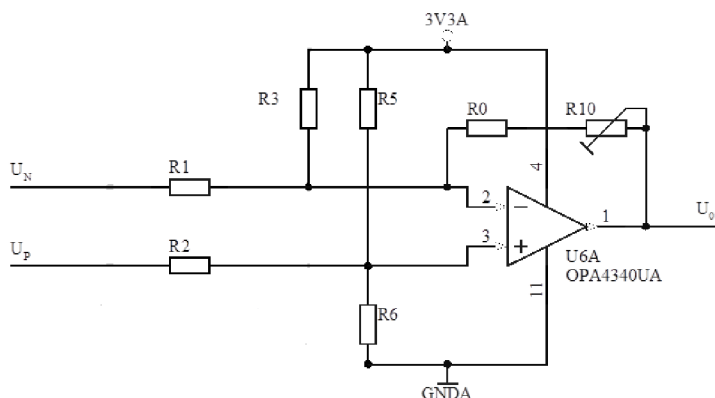
$$R_0 = \frac{(U_0 - 1,65) \cdot R_1}{2,5 - U} \quad (9)$$

Po dosazení všech hodnot je velikost odporu R_0 :

$$R_0 = \frac{(0,3 - 1,65) \cdot 4700}{2,5 - 4,5} = \underline{3172\Omega} \quad (10)$$

Po tomto výpočtu je hodnota $R_0=3172\Omega$ složena ze dvou rezistorů o hodnotě 3k Ω a 180 Ω .

Pro měření napětí meziobvodu je použito diferenciálního zapojení operačního zesilovače. Převod měření napětí je: 0-50V \rightarrow 0-3,3V.



Obrázek 33 Měření napětí meziobvodu

Pro zapojení diferenciální zesilovače platí:

$$R_3 = R_5 = R_6 = R_0 \Rightarrow R_0$$

$$R_2 = R_1 \Rightarrow R_1 \quad (11)$$

Pro zesílení daného zapojení platí:

$$K_U = \frac{R_0}{R_1} \quad (12)$$

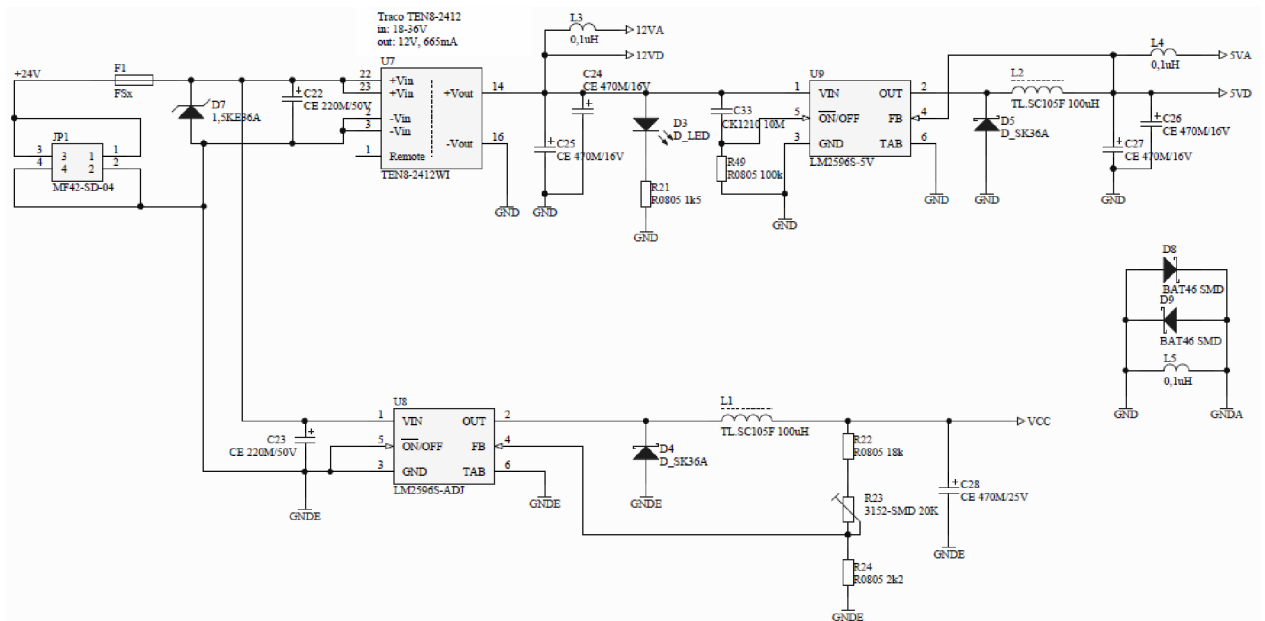
Při zvolené velikosti odporu $R_1=200\text{k}\Omega$ a daný převod platí pro velikost R_0 :

$$R_0 = \frac{U_0}{U} R_1 \quad (13)$$

$$R_0 = \frac{3,3}{50} 200000 = \underline{13200\Omega} \quad (14)$$

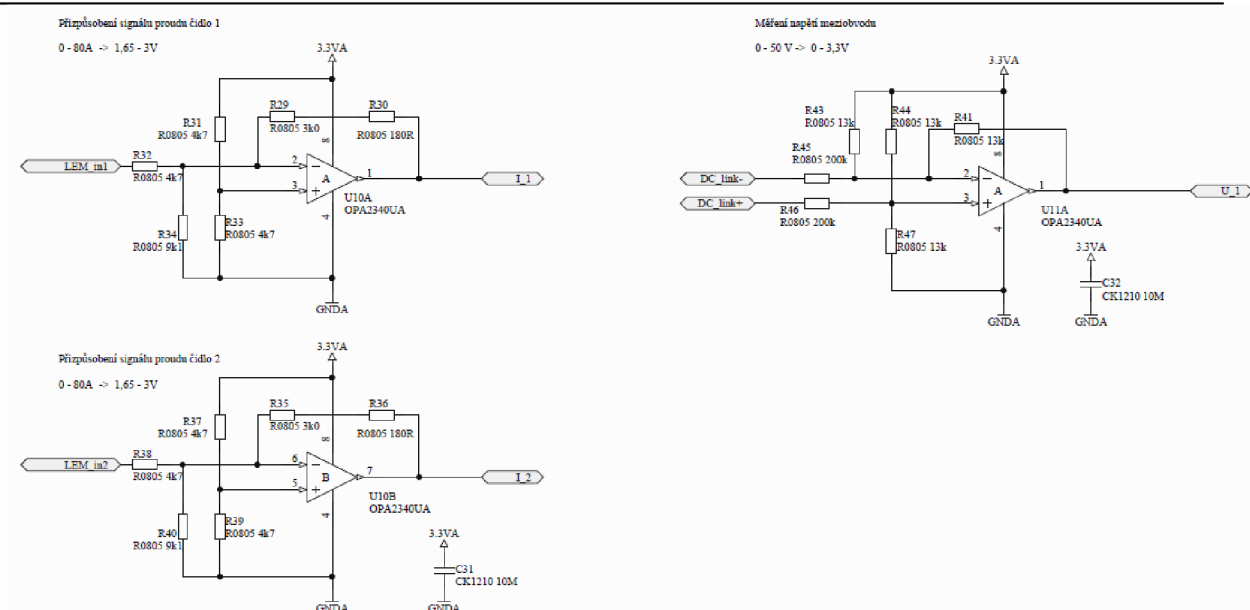
Jelikož se vypočítaná hodnota nenachází v řadě, je velikost $R_0=13\text{k}\Omega$, čímž se dopustíme pouze nepatrné chyby.

3.8.1 Schéma zapojení



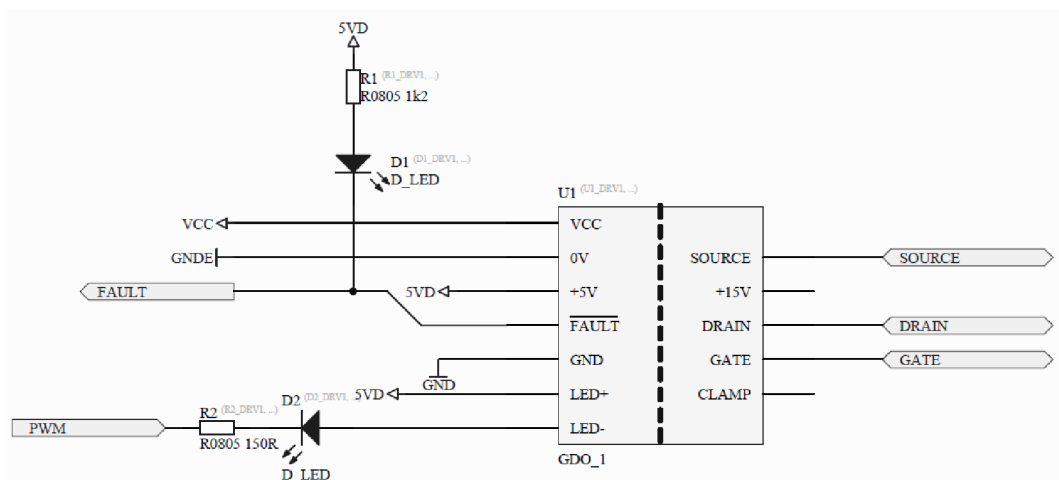
Obrázek 34 Zapojení napájecí části

Na obrázku 34 je patrná vstupní část s předřazenou pojistkou F1, dále následuje již zmiňovaný obvod Traco TEN8-2412, který mění vstupní napětí 24V na výstupní napětí 12V galvanicky oddělené. Přítomnost napětí 12V je signalizována LED diodou D3. Za tímto obvodem následuje rozdělení na napětí pro analogové účely – 12VA a pro digitální účely 12VD. Poté následuje obvod LM2596-5V, který má pevné výstupní napětí o hodnotě 5V, opět za výstupním filtrem LC následuje rozdělení na analogové napájení – 5VA a digitální – 5VD. Ze vstupního napětí 24V je bez galvanického oddělení přímo napájen další obvod LM2596-ADJ, který umožňuje nastavit jakoukoliv velikost výstupního napětí. Obvod je doplněn opět nulovou diodou, LC filtrem a odporovým děličem s proměnným prvkem určeným pro nastavení výstupního napětí.



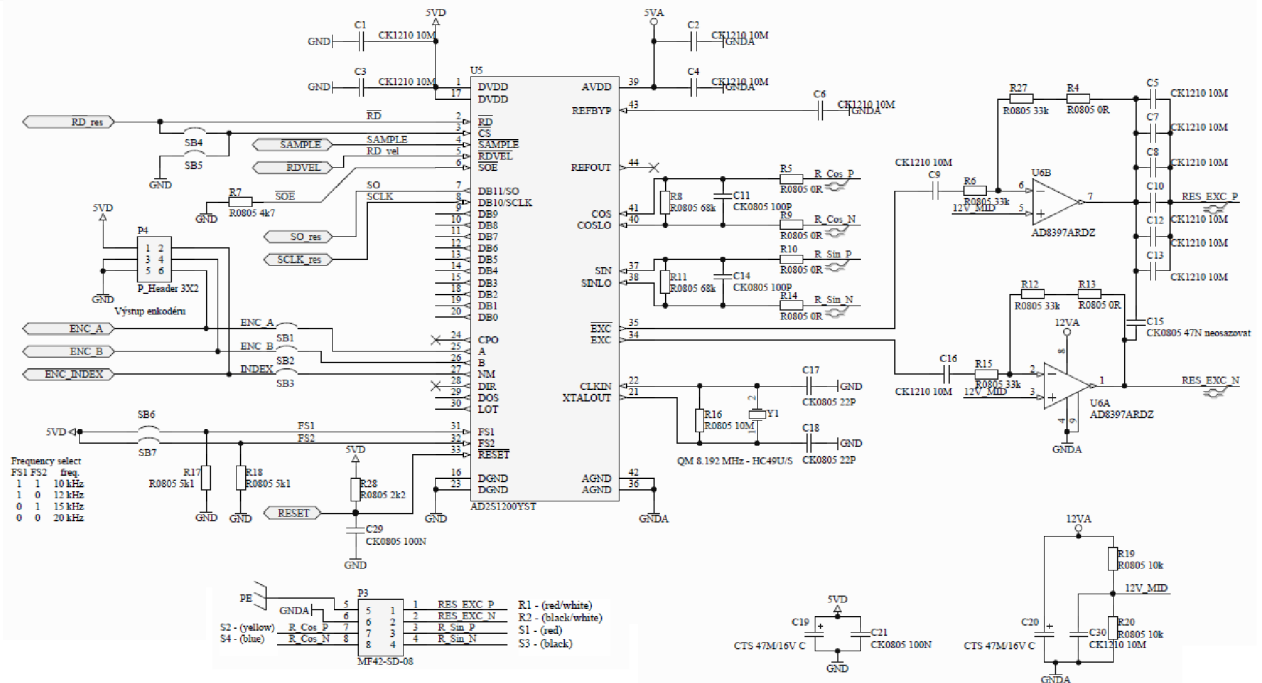
Obrázek 35 Zapojení analogové části

Na obrázku 35 je patrné zapojení analogových obvodů s operačními zesilovači doplněné o vypočítané hodnoty odporů. Zapojení jak již bylo zmíněno slouží k úpravě signálu proudů a měření napětí.



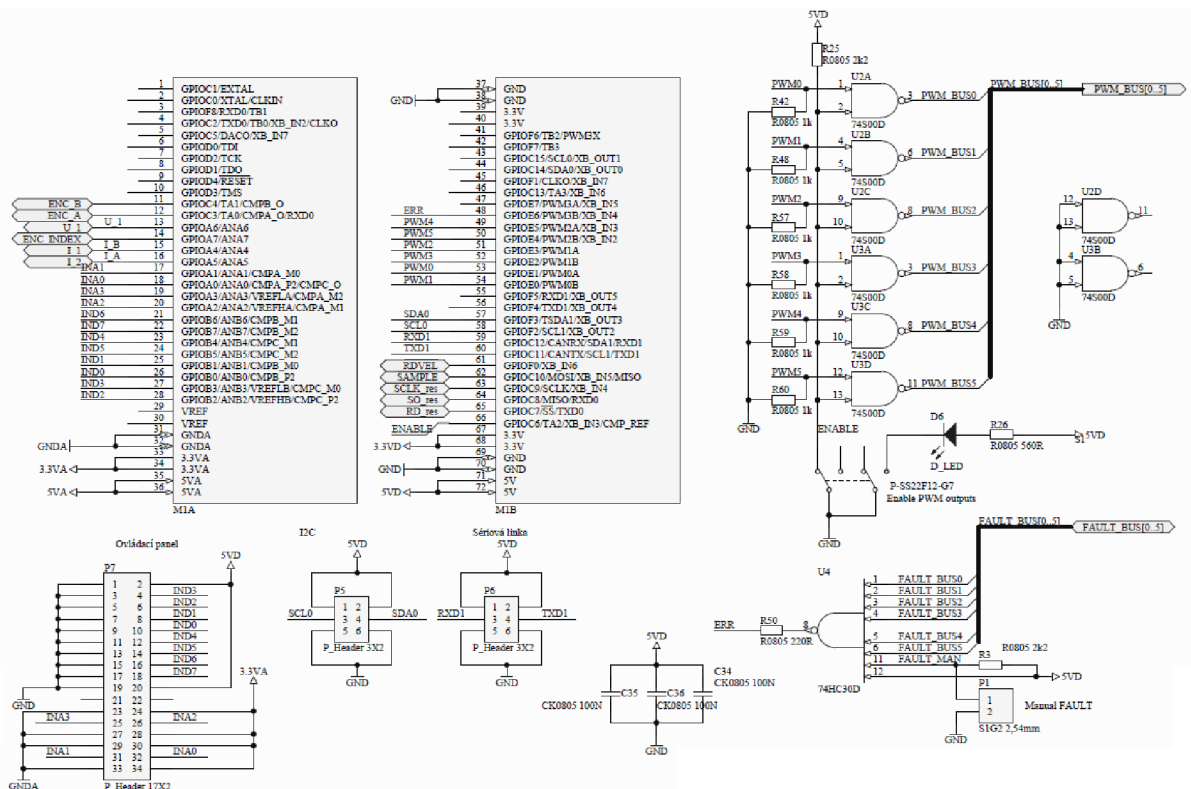
Obrázek 36 Připojení budících obvodů

Připojení budících obvodů je uvedeno na obrázku 36. Toto zapojení se na základní desce opakuje celkem 6x rep. 4x při použití stejnosměrného motoru. Obvod je doplněn LED diodou D2 oranžové barvy pro indikaci vstupního signálu PWM a LED diodou D1 červené barvy pro indikaci zásahu saturační ochrany budiče. Výstup chybového hlášení saturační ochrany je negovaný.



Obrázek 37 Zapojení obvodů vyhodnocení polohy (otáček)

Na obrázku 37 je patrné celkové zapojení R/D převodníku AD2S1200 s několika externími obvody, které doplňují jeho funkce. Jedná se především o výkonový zesilovač budicího signálu pro resolver typ AD8397ARDZ. Vyhodnocovací obvod obsahuje sériovou a paralelní linku pro komunikaci s nadřazeným systémem – mikroprocesorovou deskou. V tomto zapojení je využito sériové komunikace. Obvod je doplněn přepínačem pro volbu pracovní frekvence, krystalem o frekvenci 8,192MHz a dále výstupy signálů enkodéru.

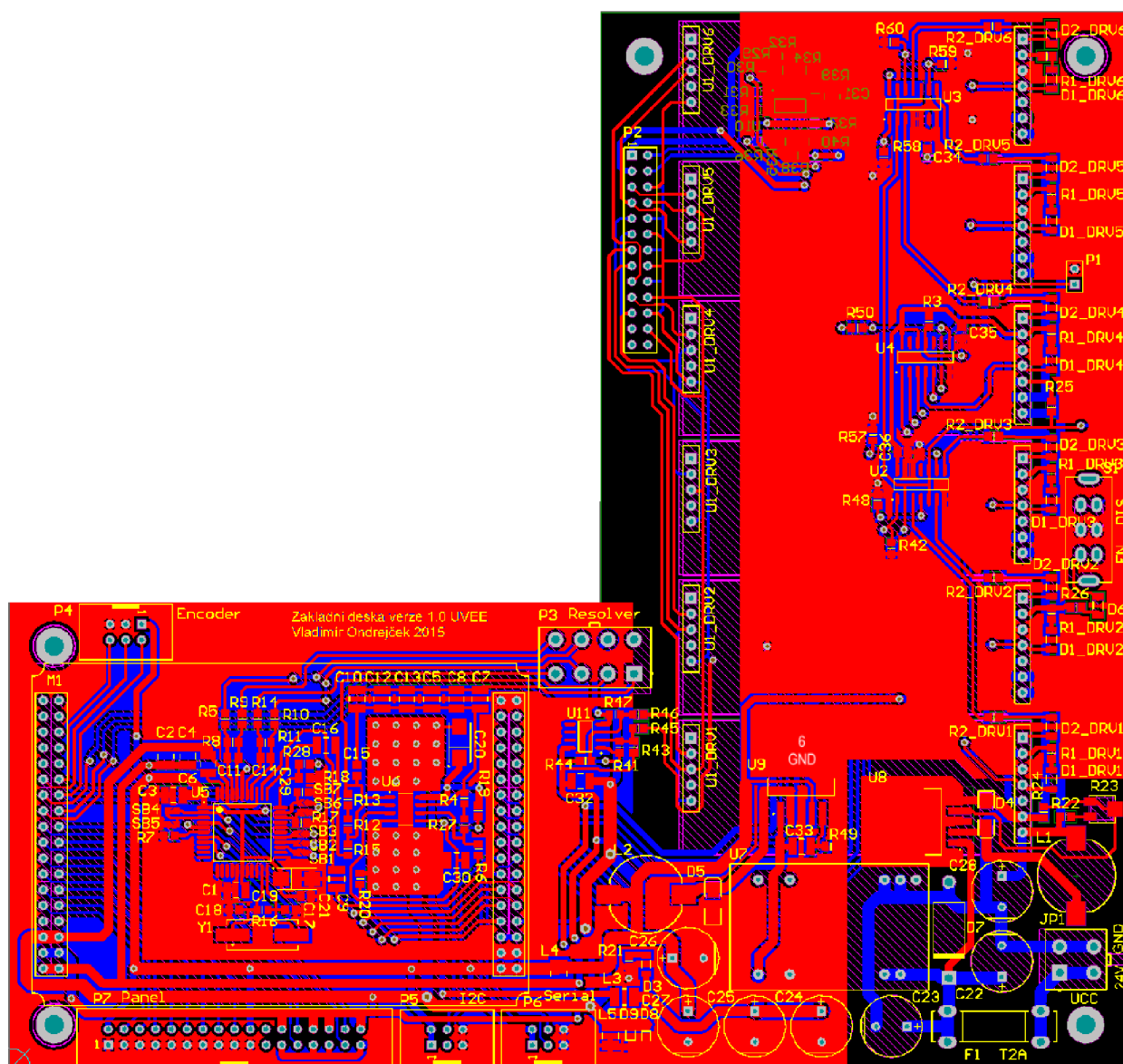


Obrázek 38 Zapojení obvodů procesoru a hradel

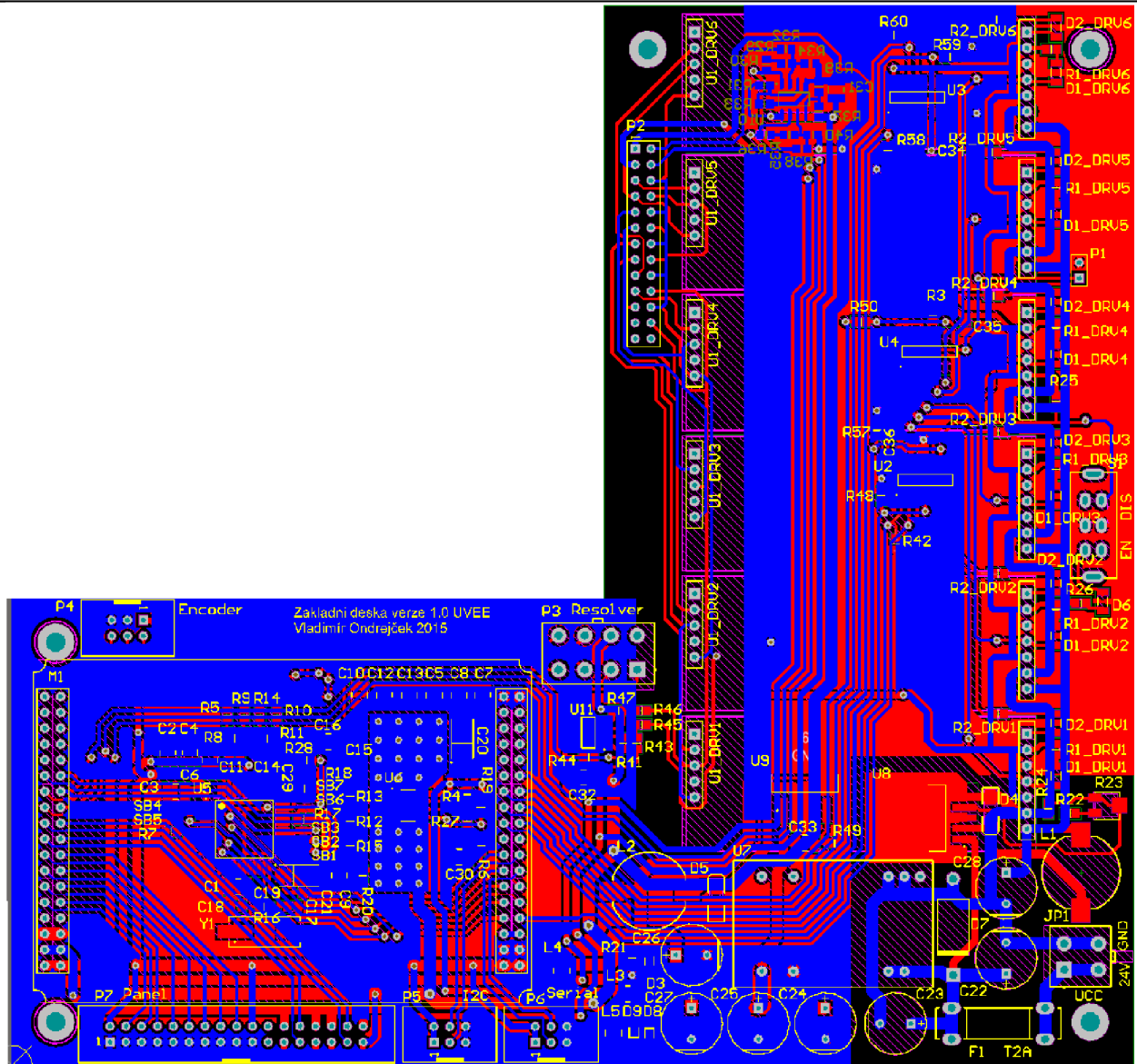
Na *obrázku 38* je patrné připojení procesorové desky, hradel pro vyhodnocení zásahu saturační ochrany – signál ERR a dále hradla pro blokování výstupů PWM. Tyto signály jsou blokovány pomocí spínače P1, umístěného na základní desce. Obvody jsou doplněny konektory pro připojení sériové komunikace s druhou částí laboratorního standu a dále konektory pro přivedení vstupních a výstupních signálů na ovládací panel a pro LCD displej.

3.8.2 Deska plošných spojů

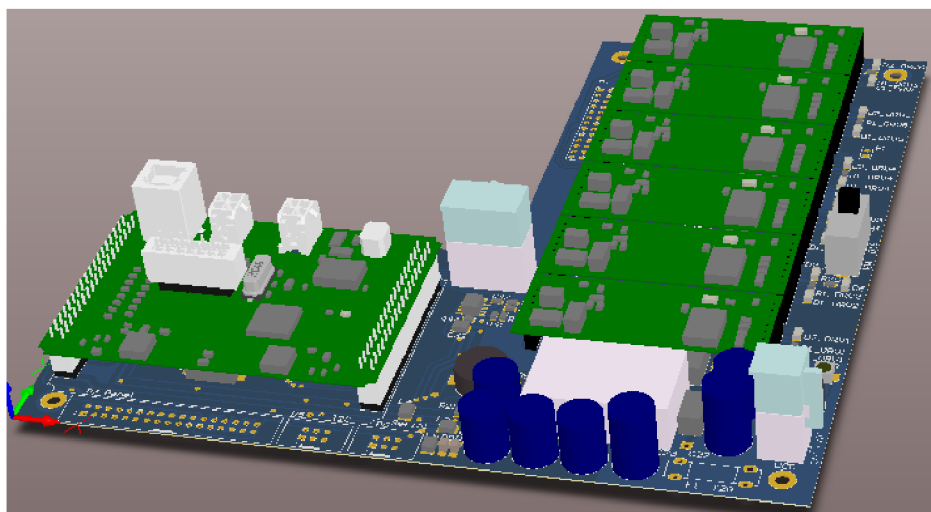
Deska plošných spojů je navržena jako doplněk k desce výkonového měniče tak, aby spolu s tímto modulem tvořila kompletní měnič včetně řídicích obvodů. Základní deska má tvar písmene L s rozměry 180x170mm. V každém rohu této desky je otvor pro mechanické připevnění k hliníkové základně. Deska obsahuje všechny důležité součásti především konektory a patice pro připojení procesorové desky, budičů, výkonového měniče, ovládacího panelu apod.



Obrázek 39 Základní deska – Top



Obrázek 40 Základní deska - Bottom



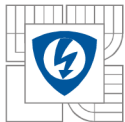
Obrázek 41 3D vizualizace základní desky

3.8.3 Připojovací tabulka

V následující tabulce je seznam všech pinů, které vstupují a vystupují ze základní desky.

Tabulka 15 Připojení obvodů k základní desce

| Č. pinu | Označení vývodu | Poznámka |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------------------|
| KONEKTOR JP1 - MINIFIT | | |
| 1,3 | 24V | Přívod napájení 24V |
| 2,4 | GND | Přívod napájení GND |
| P2 pro ploché kabely | | |
| 1 | GND2 | Napájení čidel LEM GND |
| 2 | LEMout2 | Proud větve C |
| 3 | +5V | Napájení čidel LEM +5V |
| 4 | LEMout1 | Proud větve A |
| 5 | GATE4 | Gate horní tranzistor větev C |
| 7 | PHC | SOURCE/DRAIN větev C |
| 9 | Gate2 | Gate horní tranzistor větev B |
| 11 | PHB | SOURCE/DRAIN větev B |
| 13 | Gate0 | Gate horní tranzistor větev A |
| 15 | PHA | SOURCE/DRAIN větev A |
| 17 | Gate5 | Gate dolní tranzistor větev C |
| 19 | Gate3 | Gate dolní tranzistor větev B |
| 21 | Gate1 | Gate dolní tranzistor větev A |
| 6, 10, 14, 18, 22 | GND | SOURCE dolních tranzistorů |
| 8, 12, 16, 20, 24 | PWR+ | DRAIN horních tranzistorů |
| P3 MINIFIT - RESOLVER | | |
| 1 | RES EXC P | Napájení resolver - černobílý |
| 2 | RES EXC N | Napájení resolver - červenobílý |
| 3 | Sin P | Sinus Resolver - červený |
| 4 | Sin N | Sinus Resolver - černý |
| 5 | PE | Kostra - nevyužito |
| 6 | GNDA | Analogová zem - nevyužito |
| 7 | Cos P | Cosinus Resolver - žlutý |
| 8 | Cos N | Cosinus Resolver - modrý |
| P4 pro ploché kabely - ENCODER | | |
| 1 | 5VD | Napětí 5V |
| 2 | ENC_INDEX | Encoder index |
| 3,5 | GND | GND |
| 4 | ENC_B | Encoder B |
| 6 | ENC_A | Encoder A |



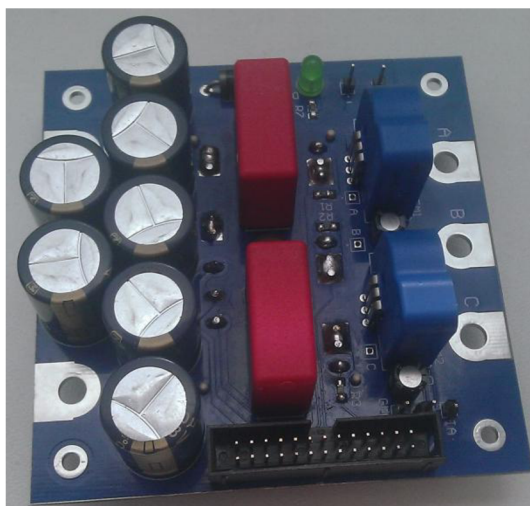
| Č. pinu | Označení vývodu | Poznámka |
|---|-----------------|------------------------|
| P5 pro ploché kabely - I2C (LCD) | | |
| 1,2 | 5VD | Napájení 5V |
| 3 | SCL0 | |
| 4 | SDA0 | |
| 5,6 | GND | GND |
| P6 pro ploché kabely -serial | | |
| 1,2 | 5VD | Napájení 5V |
| 3 | RXD1 | |
| 4 | TXD1 | |
| 5,6 | GND | GND |
| P7 pro ploché kabely - panel | | |
| 2, 20 | 5VD | Napájení 5V |
| 4 | IND3 | Digital vstup/výstup 3 |
| 6 | IND2 | Digital vstup/výstup 2 |
| 8 | IND1 | Digital vstup/výstup 1 |
| 10 | IND0 | Digital vstup/výstup 0 |
| 12 | IND4 | Digital vstup/výstup 4 |
| 14 | IND5 | Digital vstup/výstup 5 |
| 16 | IND6 | Digital vstup/výstup 6 |
| 18 | IND7 | Digital vstup/výstup 7 |
| 1,3,5,7,9 11,13,15,17,19 | GND | Digital GND |
| 23,27,27,33 | GNDA | Analog GND |
| 24,28,30,34 | 3,3VA | Napájení 3,3V Analog |
| 25 | INA3 | Analog vstup/výstup 3 |
| 31 | INA1 | Analog vstup/výstup 1 |
| 26 | INA2 | Analog vstup/výstup 2 |
| 32 | INA0 | Analog vstup/výstup 0 |

4 REALIZACE JEDNOTLIVÝCH DESEK

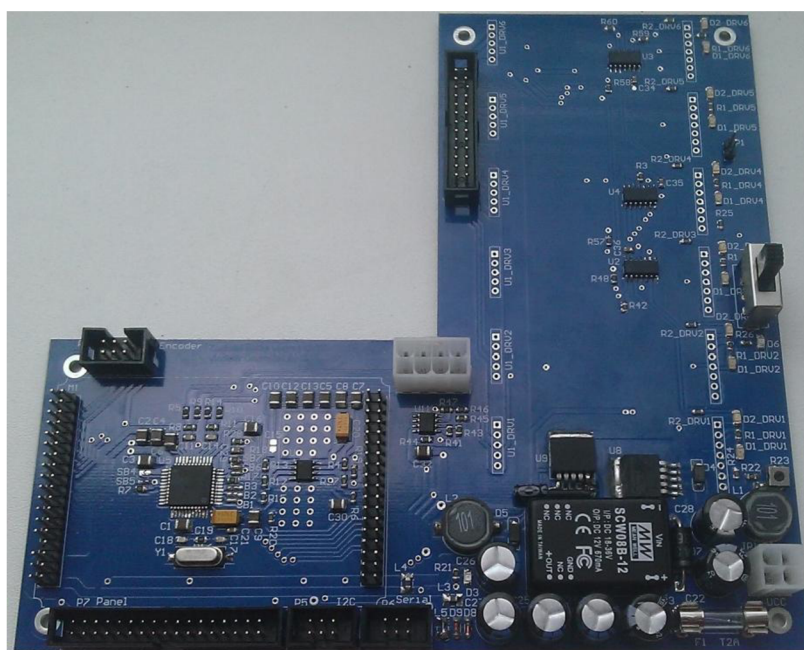
Před samotnou výrobou desek s plošnými spoji bylo nutno tyto zkontrolovat, popřípadě provést drobné úpravy. Šlo především o změnu poloh některých konektorů – na desce výkonového měniče a základní desce. Výroba desek plošných spojů byla zadána do společnosti ČeMeBo s.r.o. Pouze deska pro brzdovou jednotku byla vyrobena ručně pomocí fotocesty – jednalo se o prototyp této jednotky, ve kterém došlo během osazování k mírným změnám.

Všechny desky s plošnými spoji byly osazeny ručně přímo na místě konečné montáže celého laboratorního standu. Během osazování se nevyskytly žádné velké potíže, bylo nutno dát pozor na technologický postup při osazování zejména základní desky a desky výkonového měniče, kdy pro připájení určitých celků (výkonový měnič, budiče) již není přístup k některým vývodům součástek.

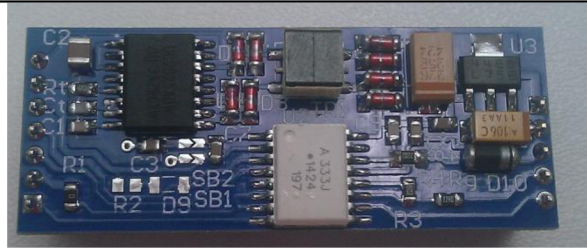
Na následujících obrázcích jsou znázorněny osazené desky nutné pro kompletaci laboratorního standu pro výukové účely.



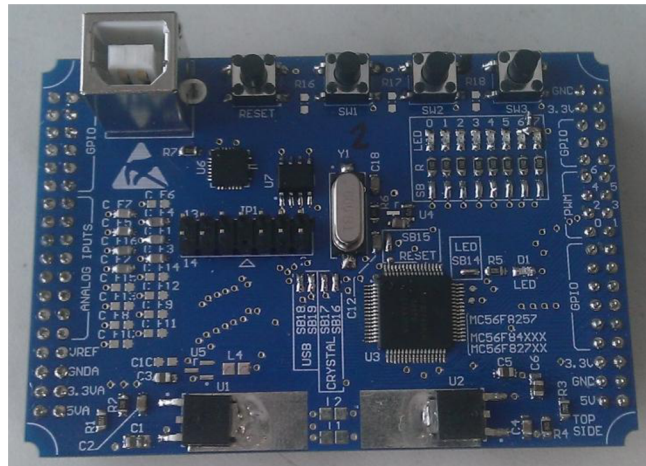
Obrázek 42 Osazená deska výkonového měniče



Obrázek 43 Osazená základní deska



Obrázek 44 Osazená deska budicího obvodu



Obrázek 45 Osazená procesorová deska



Obrázek 46 Osazená brzdná jednotka

5 SESTAVENÍ CELÉHO SOUSTROJÍ

5.1 Mechanické sestavení

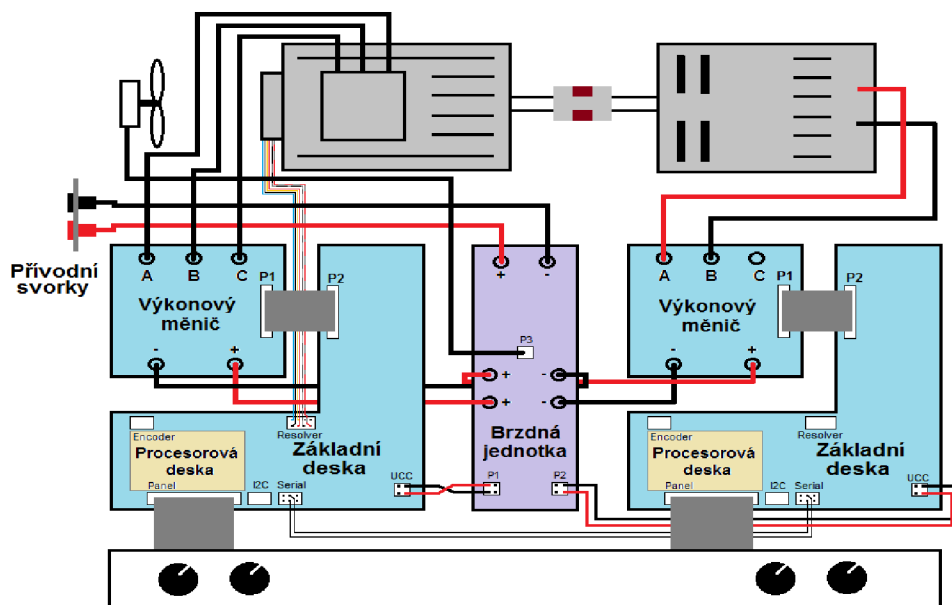
Rám laboratorního pracoviště byl před konečným sestavením již připraven a smontován. Na tento se postupně upevňovaly veškeré součásti laboratorního pracoviště. Nejprve bylo nutno vytvořit cizí ventilaci třífázového asynchronního motoru. Pro tento účel je, jak již bylo dříve v práci popsáno, použit stejnosměrný ventilátor o rozměrech 70x70x10mm, který je přes mezikruží přišroubován ke krytu ventilátoru. Mezikruží provedené z plexiskla bylo nutno vyrobit dle výkresu uvedeného v jiné práci [1]. Při výrobě se vyskytl problém s výběrem vhodného materiálu, který se při opracování roztavoval a zaléval plátek pily, nakonec však byl v zásobách nalezen vhodný materiál a výroba mezikruží se zdařila. Toto vyrobené mezikruží bylo spolu s ventilátorem instalováno do krytu asynchronního motoru. Nyní již bylo možné přikročit k uchycení obou motorů na rám pracoviště. Pro vymezení montážních otvorů a také pro správné osové a výškové vyrovnání je využito hliníkového plechu tloušťky 2mm jako podložky pod motory. Jelikož se však původní vzorek nedochoval, bylo nutné tuto podložku pod motory vyrobit. Při vyměřování montážních otvorů pro oba motory byly zaznamenány rozdíly mezi nově navrženým stavem a původním výkresem. Bylo tedy nutné vypracovat nový výkres, který je uveden v příloze práce. Jakmile byla nová plechová podložka pod motory dokončena, motory byly usazeny na své pozice a přišroubovány. Při provizorním točení celým soustrojím pomocí stejnosměrného motoru napájeného z regulovatelného zdroje se vyskytl problém v podobě nestejného výškového uložení obou motorů. Toto uložení způsobovalo vznik velmi silných vibrací, které se přenášely do celého rámu a všech součástí. Řešení bylo nalezeno v podobě podložení asynchronního motoru dalším plechem o tloušťce 0,4mm. Poté bylo započato s výrobou nových přípojovacích svorek. Svorky jsou umístěné na hliníkovém profilu tvaru L o tloušťce 4mm, jehož výkres je uveden v příloze. Bylo nutné také vyrobit novou hliníkovou základnu pro veškeré desky plošných spojů. Původní hliníková základna byla pro nově navržené desky malá a nová základna se tedy prodloužila o 3cm. Z důvodů zvětšení prostoru pro desky plošných spojů bylo také nutné vyrobit nový menší ovládací panel. Nové výkresy ovládacího panelu a hliníkové základny jsou uvedeny v příloze. Přípojovací svorky a hliníková základna byly přišroubovány k rámu celého soustrojí. Nyní již bylo možné začít mechanicky připevňovat desky s plošnými spoji. Montážní otvory byly vyměřeny a tyto desky plošných spojů jsou k hliníkové základně uchyceny pomocí distančních sloupků o délce 12mm. Výkonové moduly byly natřeny teplovodivou pastou a poté přišroubovány pomocí šroubů M4 k hliníkové základně, která slouží i jako chladič. Rovněž výkonový tranzistor MOS-FET brzdné jednotky byl přišroubován k základně pro jeho chlazení. Veškeré nutné a použité mechanické komponenty jsou uvedeny v *tabulce 1* na začátku této práce.

Po dokončení mechanického sestavení bylo možno přikročit k elektrickému dokončení-propojení všech kabelů.

5.2 Propojení kabeláže

Pro započítí testování a zkoušek celého laboratorního standu bylo nutno dokončit zapojení veškerých obvodů nutných pro správný chod zařízení.

5.2.1 Propojovací schéma



Obrázek 47 Zapojovací schéma laboratorního standu

5.2.2 Zapojení resolveru

Jednotlivé vodiče od resolveru byly skrouceny po dvojicích a navlečeny do černé bužírky průměru 5mm. Tato černá bužírka zvyšuje mechanickou odolnost vodičů. Délka kabelu byla dostačující, tudíž nebylo nutné je prodlužovat. Na konce vodičů byly připájeny piny konektoru MINIFIT 8. Aby nedošlo k ulomení těchto tenkých vodičů, byly fixovány pomocí smršťovací bužírky. Pro úplnost při montáži je uvedena tabulka pro připojení konektoru resolveru.

Tabulka 16 Připojení vodičů resolveru

| Číslo pinu | označení | Význam | barva vodiče |
|------------|-----------|--------------------|--------------|
| 1 | RES EXC P | Napájení resolveru | černo-bílý |
| 2 | RES EXC N | Napájení resolveru | červeno-bílý |
| 3 | R Sin P | Sinus resolver | červený |
| 4 | R Sin N | Sinus resolver | černý |
| 7 | R Cos P | Cosinus resolver | žlutý |
| 8 | R Cos N | Cosinus resolver | modrý |

5.2.3 Připojení ventilátoru

Z dříve již uvedeného ventilátoru jsou vyvedeny celkem tři vodiče. Po funkci jsou nutné pouze vodiče dva – červený jako kladný pól připojený na pin č.1, dále černý jako záporný pól připojený na pin č.2. Třetí žlutý kabel slouží ke snímání otáček a není využit, je připojen na volný pin konektoru č.3. Použitý typ konektoru je MINIFIT 4. Kabel je navlečen do černé bužírky průměru 5mm.

5.2.4 Připojení napájecího napětí základních desek

Připojení napájecího napětí pro základní desky a tím pro celé řídicí obvody je provedeno pomocí dvoužilového kabelu, který je na koncích osazen konektory typu MINIFIT 4. Červený a černý vodič CYA průřezu $0,5\text{mm}^2$ jsou navlečeny do černé bužírky průměru 5mm. Piny č. 1,3 jsou pro kladný pól a piny č. 2,4 pro záporný pól.

5.2.5 Propojení výkonové a základní desky

Propojení těchto dvou desek je provedeno pomocí 26žilového plochého kabelu, na koncích osazeného konektory pro zasunutí na příslušných pozicích. Propojení kabelu je nekřížené a konektory disponují zámky pro určení správné polohy zapojení.

5.2.6 Propojení signálů enkodéru, sériové linky

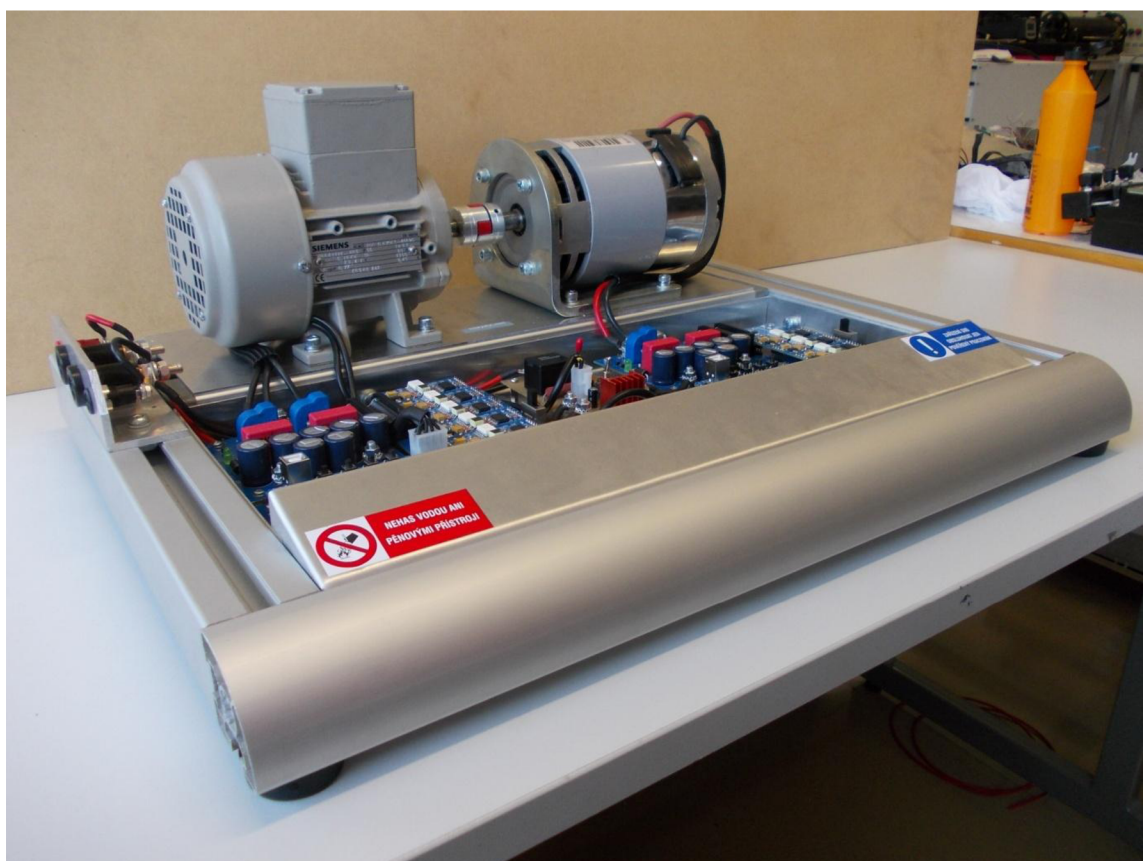
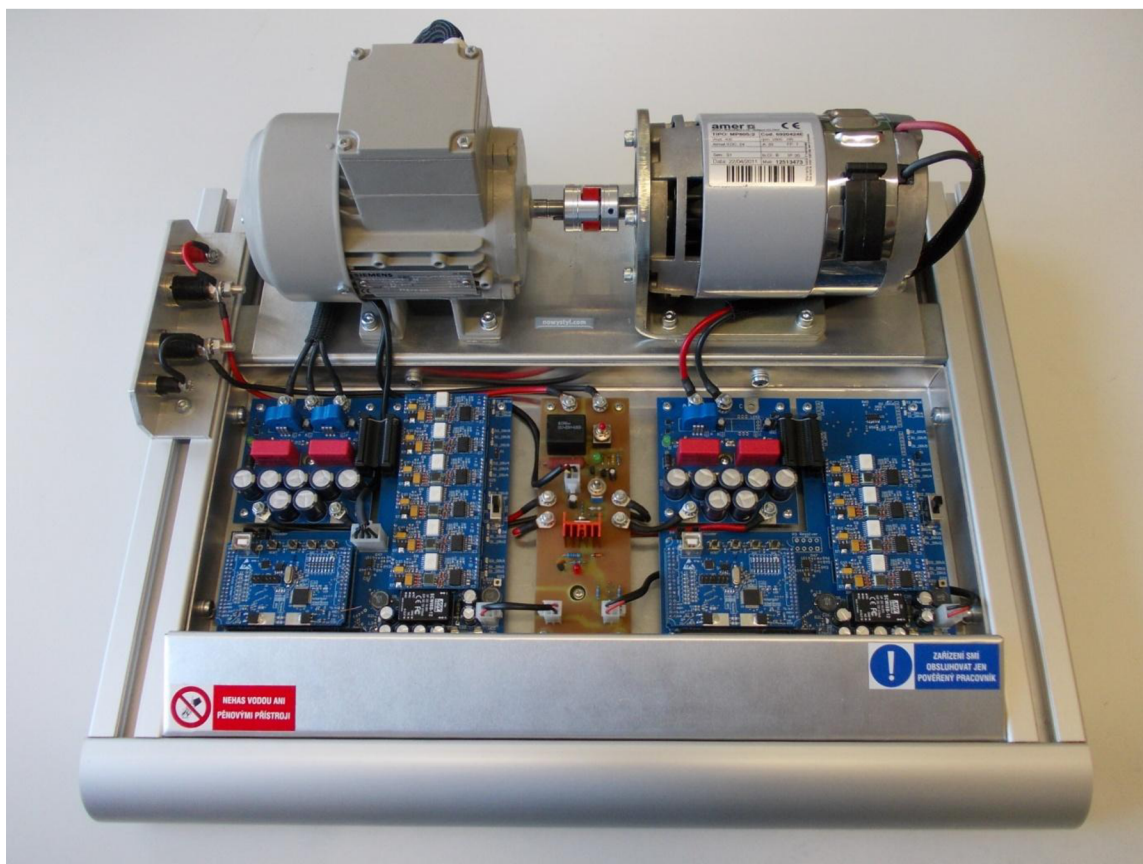
Propojení signálu pro enkodér a sériovou linku je provedeno pomocí plochých kabelů s příslušnými konektory. Rovněž připojení ovládacího panelu a možného LCD displeje je provedeno stejným způsobem. Význam jednotlivých pinů těchto konektorů je uveden v připojovací tabulce základní desky.

5.2.7 Propojení silových vodičů

Pro propojení desek výkonových měničů, brzdě jednotky, připojovacích svorek a jednotlivých motorů je použito kabelu typu CYA a kabelovými oky. Pro kladný pól je použit vodič CYA 4mm² červené barvy, pro připojení záporného pólu a asynchronního motoru je použito vodiče CYA 4mm² černé barvy. K těmto vodičům jsou použita kabelová oka ON 4-M5 popřípadě ON 2,5-M5. Konce kabelových ok jsou zaizolovány pomocí smršťovací bužírky. Připojení stejnosměrného kabelu je provedeno vodiči vyvedenými z tohoto stroje, které jsou bohužel krátké a je nutné je prodloužit. Je použito vodičů CYA o průřezu 6mm² a příslušná kabelová oka ON 6-M5. Na deskách plošných spojů jsou tyto kabely připojeny pomocí šroubů a matic M5.

Tabulka 17 Seznam propojovacího materiálu

| Název | počet kusů (délka) | Poznámka |
|------------------------------------|--------------------|--------------------------|
| Šroub mosaz M5x16 | 16 | Silové spoje |
| Matice mosaz M5 | 32 | |
| Vějířová podložka 5.0 | 32 | |
| Podložka plochá 5.3 | 16 | |
| Okó kabelové ON 6-M5 | 2 | |
| Okó kabelové ON 4-M5 | 14 | |
| Okó kabelové ON 4-M6 | 4 | |
| Okó kabelové ON 4-M4 | 2 | |
| Vodič CYA 4mm ² červený | 1,5m | |
| Vodič CYA 4mm ² černý | 2,5m | |
| Bužírka černá prům. 5mm | 0,8m | |
| Konektor MINIFIT 4 | 5 | |
| Konektor MINIFIT 8 | 1 | Resolver |
| Kabel plochý 26 žil | 0,1m | |
| Konektor PFL26 | 4 | GME - propoj desek |
| Kabel plochý 34 žil | 0,5m | |
| Konektor PFL34 | 2 | GME - ovl panel |
| Konektor PFL06 | 6 | GME - serial, encoder |
| Přístrojová zdířka 25A | 2 | červená + černá pr. 12mm |
| Přístrojová zdířka 50A | 2 | červená + černá pr. 18mm |



Obrázek 48 Pohled na kompletně sestavený laboratorní stand

6 PROVOZNÍ ZKOUŠKY

Po dokončení celé montáže bylo započato s provozními zkouškami celého laboratorního pracoviště.

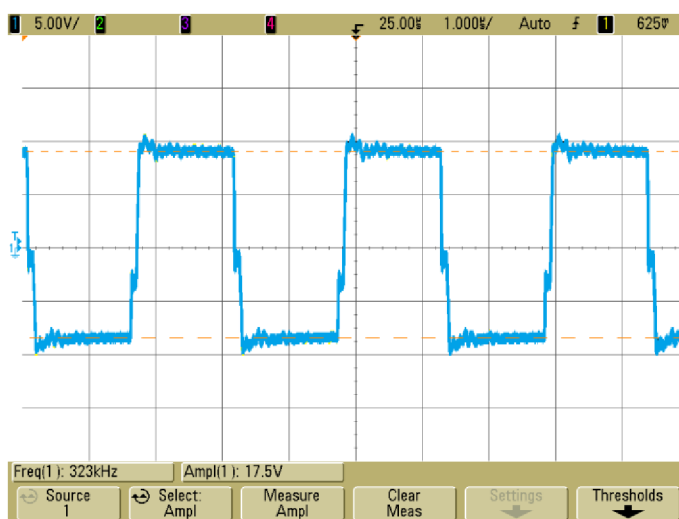
6.1 Základní deska

Na základní desce byla zkontrolována přítomnost všech napájecích napětí. Proměnné napájecí napětí pro budicí obvody bylo nastaveno na hodnotu 19V. Byla ověřena přítomnost napětí 12V a dále napětí 5V. V průběhu testování se vyskytl problém se startem obvodu Traco, byla použita levnější varianta tohoto obvodu od výrobce MEAN WELL. Tento obvod má potíže provést start se zátěží. Řešení bylo nalezeno v podobě doplnění zpoždovacího RC členu k stabilizátoru napětí 5V. Nově tento stabilizátor nabíhá až po cca 2s, čímž je zaručeno, že obvod Traco nespustí pod zátěží. Později bylo zjištěno, že problém se startem se projevuje i při zahřátí obvodu na provozní teplotu. Řešením je použití originálního obvodu Traco od TRACOPOWER u dalších realizovaných standů.

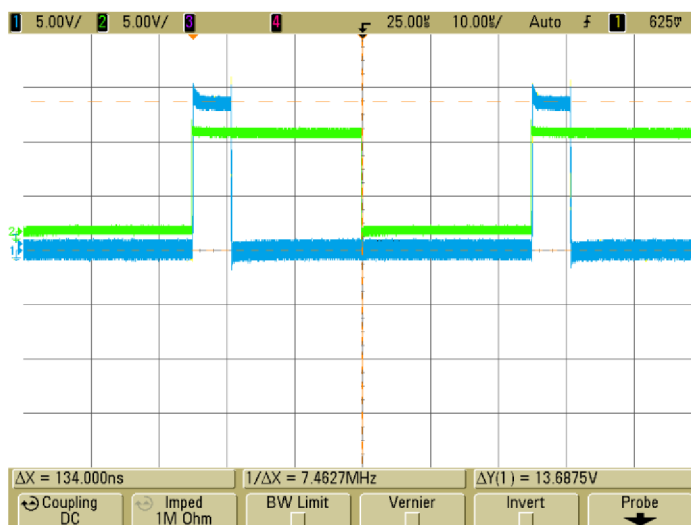
Byla ověřena funkce vyhodnocovacího obvodu resolveru. Na osciloskopu byl zobrazen průběh napájecího napětí pro resolver – průběh byl sinusový o frekvenci 10kHz. Otočením hřídele motorů byla změněna poloha a tato změna byla kontrolována osciloskopem na výstupech enkodéru, neboť testy probíhaly bez procesorové desky.

6.2 Budicí obvod

Všech osazených budicích obvodů bylo testováno. Nejprve byla ověřena přítomnost napájecího napětí a tím chod napájecí části budiče. V další části byla ověřena funkce samotného budiče pomocí osciloskopu. Byla ověřena funkce saturační ochrany, která byla nastavena na hodnotu 1V, což ve výstupních charakteristikách tranzistoru MOS-FET odpovídá proudu 100A. Upravena byla rychlost zásahu této ochrany, neboť prvně byla pomalá. Další nastavení saturační ochrany bylo provedeno v průběhu zatěžovacích testů.



Obrázek 49 Ověření funkce napájecího obvodu budiče



Obrázek 50 Ověření funkce budicího obvodu a saturační ochrany

6.3 Brzdná jednotka

Na brzdné jednotce byla ověřena činnost obvodu pro nabití kondenzátorů meziobvodu. V průběhu ověřování bylo nutné změnit hodnotu odporu R1 pro nabíjení. Po tomto zásahu již obvod spolehlivě pracoval.

Bylo změřeno výstupní napětí stabilizátoru LM317 pro napájení ventilátoru. Napětí odpovídala a byly naměřeny hodnoty 11,9V a 5,63V při obou polohách přepínače.

Funkce brzdné části byla ověřena pomocí externího napájecího zdroje. Tranzistor MOS-FET se otevíral při napětí v meziobvodu 34,5V, což je očekávaná hodnota. Rovněž byl v průběhu programování roztočen stejnosměrný motor a bylo testováno zda se při brzdění energie zmaří v teplo. Provedený test měl pozitivní výsledek.

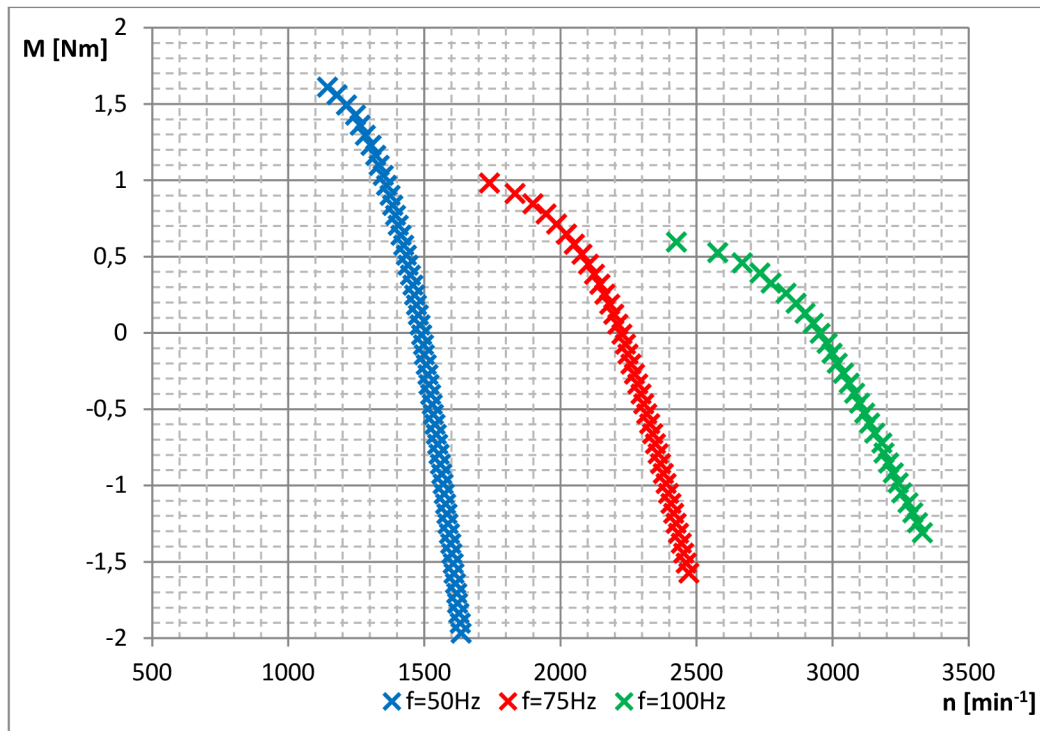
6.4 Deska procesoru a výkonového měniče

Tyto obě desky byly odzkoušeny naprogramováním jednoduchého programu pro změnu střídy a byl vyzkoušen rozběh stejnosměrného motoru. Tímto základním a jednoduchým způsobem byla ověřena funkce procesorové desky i měniče. Byly zkontrolovány převody čidel proudů. Důkladnější testům byly obě desky podrobeny během programování a zkoušení regulace obou instalovaných motorů.

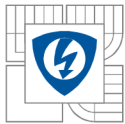
6.5 Zatěžovací testy soustrojí

Byl proveden základní zatěžovací test, kdy asynchronní motor byl řízen podle U/f křivky a stejnosměrným motorem bylo realizováno brzdění. Posléze bylo stejnosměrného motoru použito jako poháněcího stroje a byla ověřena generátorová oblast asynchronního stroje. Byly změřeny tři zatěžovací charakteristiky pro $f=50\text{Hz}$, $f=75\text{Hz}$ a $f=100\text{Hz}$. Tyto poté byly vyneseny do grafu.

Graf 1 Zatěžovací charakteristiky asynchronního stroje



Z grafu jsou patrné zatěžovací charakteristiky asynchronního motoru. Motor byl řízen podle charakteristiky U/f a stejnosměrný motor byl řízen proudovou smyčkou v režimu motoru i v režimu brzdění. Jsou zobrazeny tři charakteristiky. První charakteristika je pro $f=50\text{Hz}$, motor byl plně nabuzen. V grafu je patrné, že při jmenovitých otáčkách asynchronního motoru $n=1350\text{min}^{-1}$ bylo dosaženo momentu $M=1,15\text{Nm}$. Uvedený jmenovitý moment má však být $1,27\text{Nm}$. Tato odchylka mohla vzniknout nepřesností měření. Při tomto jmenovitém bodu byl proud motorem $I_n=9,5\text{A}$, což odpovídá štítkovým hodnotám. Další charakteristiky jsou pro částečně odbuzený a úplně odbuzený asynchronní motor. Z grafu je patrné, že je dříve dosaženo momentu zvratu. Průběhy grafů odpovídají teoretickým předpokladům.



ZÁVĚR

Práce se zabývá návrhem některých desek řídicích obvodů pro řízení všech operací v laboratorním standu pro výukové účely, který je osazen dvěma motory. Z topologie standu je patrné, že deska některé desky vyskytují ve větším počtu. Obě části řídicích obvodů pro stejnosměrný i asynchronní motor jsou shodné, stejně tak jako i ostatní součásti laboratorního standu – jedná se o desky výkonových měničů, mikroprocesorové desky.

První část práce se zabývá popisem a provedením jednotlivých celků laboratorního standu, které spolu spolupracují a jsou propojeny.

V práci je také zmíněný problém s navrženým a provedeným řešením budicího obvodu. Napájecí část vykazovala některé problémy, mezi které patří zejména přehřívání obvodu SG2525 použitého v návrhu. Vzhledem k technickým parametrům obvodu je možno usoudit, že obvod sice potřebné parametry dosahuje, ale realita je poněkud odlišná, což se projevilo revizí a odzkoušením tohoto provedení. Jelikož již autor nejaktuálnějšího návrhu budicího obvodu nebyl schopen učinit změny nebo jakékoliv úpravy navrženého stavu, je součástí této práce i návržení nové varianty budicího obvodu, která byla podrobena všem potřebným provozním zkouškám. Nově navržený obvod vyhověl. V důsledku tohoto bylo nutné vypracovat nový návrh desky plošných spojů, který vychází z již ověřeného a konečného řešení.

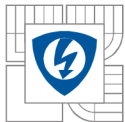
V další části zpracován návrh základní desky řídicích obvodů. Kapitola obsahuje návrhy schémat zapojení pro jednotlivé funkční celky umístěné na základní desce. Nejprve je rozebrán princip napájení použitého v laboratorním standu s použitím obvodů, které jsou doplněny jen malým množstvím součástek, nutným pro správný chod napájecí části. Rovněž je zde uvedeno použití obvodu Traco, který disponuje galvanickým oddělením, jež je nutné, neboť laboratorní stand bude napájen ze sítě 24V pro výkonové měniče a i motory. Dále je zpracován návrh a provedení snímání úhlové rychlosti a polohy hřídele motoru včetně definování použitého typu resolveru a vyhodnocovacího obvodu typu AD2S1200. Závěr části je věnován použití logických a analogových obvodů, které jsou nutné pro zpracování určitých signálů.

Další částí návrhu je návrh brzdné jednotky, společné pro celý laboratorní stand, na této desce jsou rovněž umístěny napájecí obvody.

Pro všechny navržené části byly sestaveny schémata zapojení, která jsou uvedeny v jednotlivých částech práce.

Po dokončení všech návrhů byla provedena výroba všech desek plošných spojů a jejich osazení. Dokončené desky byly s ostatními součástmi namontovány do laboratorního standu a bylo přikročeno k oživení.

Celkové provozní zkoušky a oživení proběhly v pořádku. Dá se konstatovat, že tento dlouhodobější projekt byl dokončen realizací a zprovozněním tohoto prototypového kusu.



LITERATURA

- [1] Hudák, O. *Laboratorního soustrojí s asynchronním a stejnosměrným motorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 59s.
- [2] Atas elektromotory Náchod a.s. [online]. 2011 [cit. 2014-11-25]. Resolver , Dostupné z WWW: <http://www.atas.cz/products.php?sekce=2&menuid=34&lng=cz>
- [3] Alldatasheet [online]. 2006 [cit. 2014-10-17]. SK115MD10 datasheet. Dostupné z WWW: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/206508/SEMIKRON/SK115MD10.html>
- [4] PICMAUS, Michal. *Realizace malého střídavého měničeřízeného mikropočítačem*. VUT Brno 2012. Bakalářská práce
- [5] ONDREJČEK, V. *Laboratorní výukový stand s měniči a motory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 40 s.
- [6] VOREL P., PATOČKA M.: *Budiče výkonových tranzistorů MOSFET a IGBT*. Časopis pro elektrotechniku Elektrevue, [cit. 2014-10-11] <http://www.elektrevue.cz>, Brno 2004, ISSN 1213-1539.
- [7] Avagotech [online]. 2011 [cit. 2014-11-13]. ACPL-333Jdatasheet. Dostupné z WWW: <http://www.avagotech.com/docs/AV02-1087EN>
- [8] Alldatasheet [online]. 2008[cit. 2014-11-08]. TEN8-2412 datasheet. Dostupné z WWW: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/32577/TRACOPOWER/TEN8-2412.html>
- [9] Alldatasheet [online]. 2001[cit. 2014-11-08]. LM2596 datasheet. Dostupné z WWW: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/524001/TI/LM2596.html>
- [10] Analog devices [online]. 2011 [cit. 2014-11-25]. AD2S1200. Dostupné z WWW: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD2S1200.pdf
- [11] Vorel P., Patočka M., *Průmyslová elektronika*, Vydání 1., skriptum FEKT VUT Brno, 2007

PŘÍLOHY

Seznam příloh:

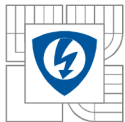
1. Seznam součástek výkonového měniče
2. Seznam součástek budicího obvodu
3. Seznam součástek základní desky
4. Seznam součástek brzděné jednotky
5. Výkres podložky pod motory
6. Výkres hliníkové základny
7. Výkres připojovacích svorek
8. Výkres ovládacího panelu

Tabulka 18 Seznam součástek výkonového měniče

| Označení | Typ | Footprint | Počet ks | Dodávka |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|----------|-----------|
| C1, C2, C4, C5, C7, C8, C10 | RAD1000/63HTRM7,5 | CAPPR7.5-16x20 | 7 | - |
| C3, C6 | 2M2 / 250 RM 22,5 | MKP10-300N/400V | 2 | TME |
| C9, C11 | CE 47M/10V JAM-SS 5x7 RM2 BULK | CAP_ELYT_5x7 | 2 | GME |
| C12, C13 | CK1210 10M | CAPC3225M | 2 | TME |
| D1 | LED 5MM GREEN | DIODA 5mm | 1 | GME |
| JP1, JP2, JP3, JP4, JP5 | pin | pin | 5 | - |
| LEM1, LEM2 | LTS 25-NP | LTS 25-NP | 2 | - |
| P1 | MLW26G | HDR2X13 | 1 | GME |
| P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9 | Plug | PIN1 | 8 | - |
| R1, R2, R3, R4, R5, R6 | 10K | RESC3216M | 6 | - |
| R7 | 2K | RESC3216M | 1 | - |
| T1 | SK115MD10 | SK115MD10 | 1 | - |
| Tr1 | 1.5KE47A | 1.5KE47A | 1 | TME (GME) |

Tabulka 19 Seznam součástek budicího obvodu

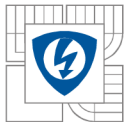
| Označení | Typ | Footprint | Počet ks | Dodávka |
|--------------------------------|---------------------|-----------------|----------|---------|
| C1, C3 | CK0805 100N | CAPC2012N | 2 | - |
| C2 | SMD 1206 | C1206 | 1 | - |
| C4, C7 | 0805 100N | CAPC2012N | 2 | - |
| C5 | 22M/25V D | TC7343-2917 | 1 | TME |
| C6 | 10M/16V C | TC6032-2412 | 1 | TME |
| C8 | 100N | CAPC2012N | 1 | - |
| C9 | CK0805 15p | CAPC2012N | 1 | - |
| Ct | CK0805 470p | CAPC2012N | 1 | - |
| D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8 | BAT42fkm | MELF-D3513-1405 | 8 | - |
| D10 | | SMC | 1 | - |
| R1 | R0805 180R | RESC2012N | 1 | - |
| R2 | R0805 2k2 | RESC2012N | 1 | - |
| R3 | R0805 15k | RESC2012N | 1 | - |
| R4 | R1206 20k | RES1206 | 1 | - |
| Rg | R0805 56R | RESC2012N | 1 | - |
| Rt | R0805 cca 4k7 - 5k1 | RESC2012N | 1 | - |



| | | | | |
|-----|---------------------|--------|---|--------------------|
| TR1 | TR-WE-GDT-760301106 | TR-GDT | 1 | WURTH (Farnell) |
| U1 | UC3825ADW | DW16_M | 1 | TME (Farnell) |
| U2 | ACPL-333J | SOP16 | 1 | Farnell |
| U3 | LM2937IMPX-15 | SOT223 | 1 | Farnell |

Tabulka 20 Seznam součástek základní desky

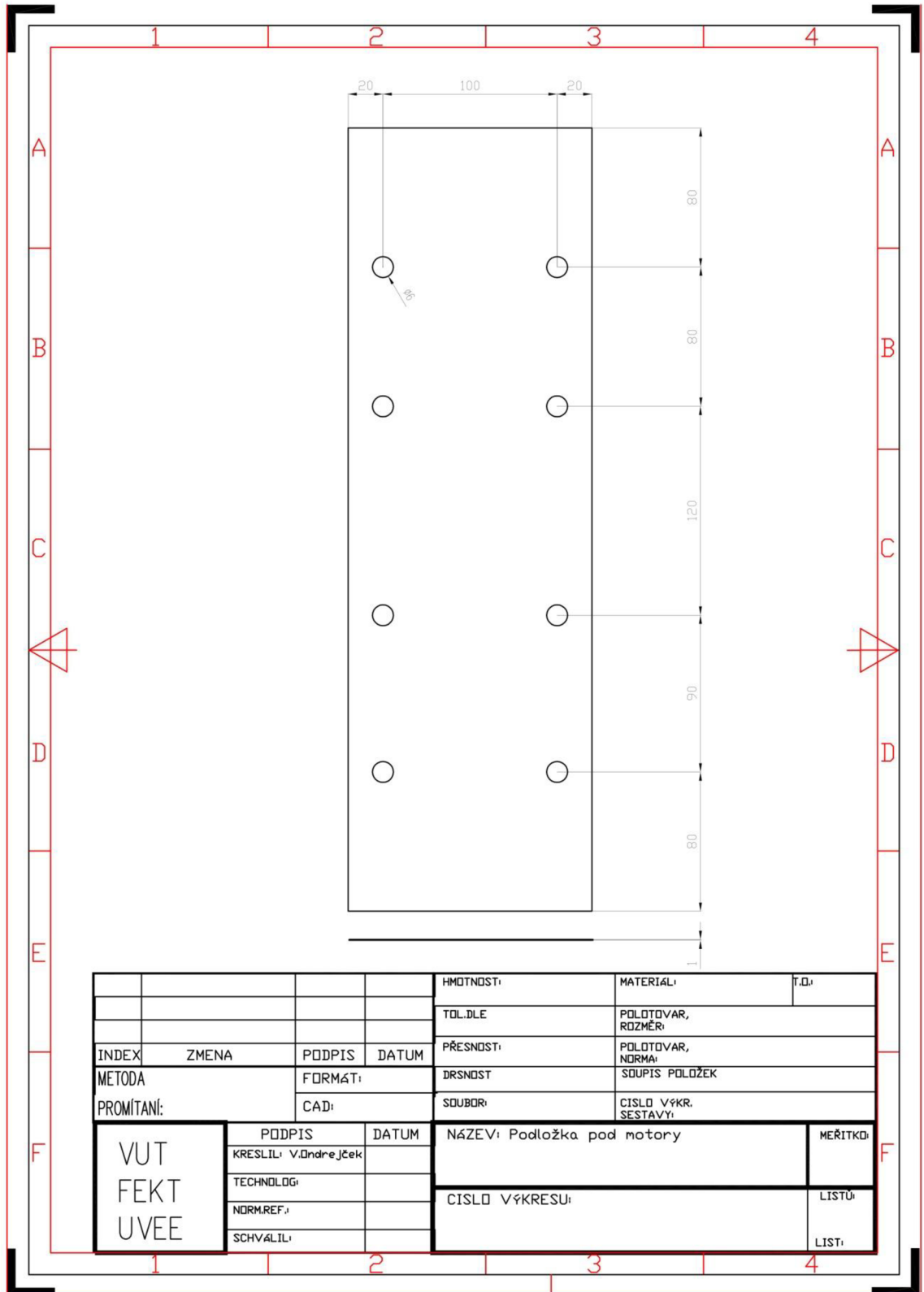
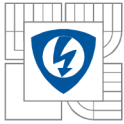
| Označení | Typ | Footprint | Počet ks | Dodávka |
|---|-----------------------|-----------------|----------|------------------|
| C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C12, C13, C16, C30,c C31, C32, C33 | CK1210 10M | CAPC3225N | 17 | TME |
| C11, C14 | CK0805 100P | CAPC2012N | 2 | - |
| C15 | CK0805 47N neosazovat | CAPC2012N | 1 | - |
| C17, C18 | CK0805 22P | CAPC2012N | 2 | - |
| C19, C20 | CTS 47M/16V C | TC6032-2412 | 2 | TME |
| C21, C29, C34, C35, C36 | CK0805 100N | CAPC2012N | 5 | - |
| C22, C23 | CE 220M/50V | CAPPR5-10x16 | 2 | TME (GME) |
| C24, C25, C26, C27 | CE 470M/16V | CAPPR5-10x12.5 | 4 | TME (GME) |
| C28 | CE 470M/25V | CAPPR5-10x12.5 | 1 | TME (GME) |
| D1_DRV | D_LED RED 5mA | DIODE3218-1206 | 6 | TME |
| D2_DRV | D_LED YELLOW | DIODE3218-1206 | 7 | TME |
| D4, D5 | D_SK36A | SMA | 2 | TME (GME) |
| D7 | 1,5KE36A | 1,5KE36A | 1 | TME (GME) |
| D8, D9 | BAT46 SMD | MELF-D3513-1405 | 2 | TME (GME) |
| F1 | FSx | FUSE_SHH1A | 1 | - |
| JP1 | MF42-SD-04 | hdr-42-4 | 1 | - |
| L1, L2 | TL.SC105F 100uH | IND12x12 | 2 | Farnell |
| L3, L4, L5 | 0,1uH | INDC3225M | 3 | Farnell |
| P2 | MLW26G | HDR2X13 | 1 | GME |
| P3 | MF42-SD-08 | hdr-42-8 | 1 | |
| P4, P5, P6 | MLW06G | HDR3x2_ksand | 3 | GME |
| P7 | MLW34G | HDR2x17_ksand | 1 | GME |
| R1_DRV | R0805 1k2 | RESC2012N | 6 | |
| R2_DRV | R0805 150R | RESC2012N | 6 | |
| R3, R24, R25, R28 | R0805 2k2 | RESC2012N | 4 | |
| R4, R5, R9, R10, R13, R14 | R0805 0R | RESC2012N | 6 | |
| R6, R12, R15, R27 | R0805 33k | RESC2012N | 4 | |
| R7, R31, R32, R33, R37, R38, R39 | R0805 4k7 | RESC2012N | 7 | |
| R8, R11 | R0805 68k | RESC2012N | 2 | |
| R16 | R0805 10M | RESC2012N | 1 | |
| R17, R18 | R0805 5k1 | RESC2012N | 2 | |
| R19, R20 | R0805 10k | RESC2012N | 2 | |
| R21 | R0805 1k5 | RESC2012N | 1 | |
| R22 | R0805 18k | RESC2012N | 1 | |
| R23 | 3152-SMD 20K | R_POT3314 | 1 | TME (Farnell) |
| R26 | R0805 560R | RESC2012N | 1 | |
| R29, R35 | R0805 3k0 | RESC2012N | 2 | |
| R30, R36 | R0805 180R | RESC2012N | 2 | |
| R34, R40 | R0805 9k1 | RESC2012N | 2 | |
| R41, R43, R44, R47 | R0805 13k | RESC2012N | 4 | |

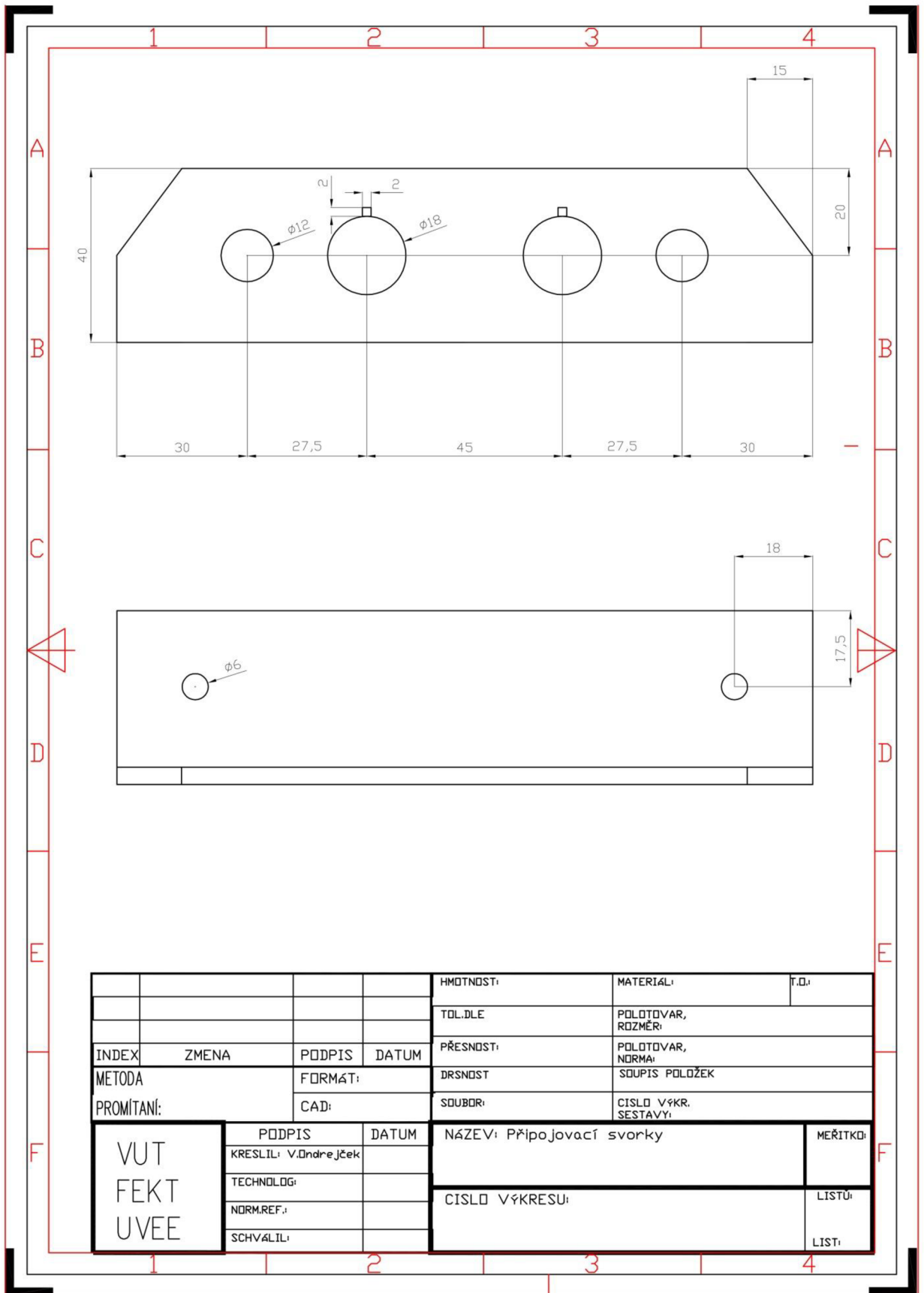
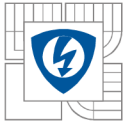


| | | | | |
|------------------------------|------------------------|---------------------|---|------------------|
| R42, R48, R57, R58, R59, R60 | R0805 1k | RESC2012N | 6 | |
| R45, R46 | R0805 200k | RESC2012N | 2 | |
| R49 | R0805 100k | RESC2012N | 1 | |
| R50 | R0805 220R | RESC2012N | 1 | |
| S1 | SPDT | SW_P-SS22F12-G7 | 1 | GES |
| U2, U3 | 74S00D | SOIC127P600-14N | 2 | TME |
| U4 | 74HC30D | SOIC127P600-14N | 1 | TME |
| U5 | AD2S1200YST | QFP80P1320X1320-44M | 1 | TME (Farnell) |
| U6 | AD8397ARDZ | SOIC127P600-8DN | 1 | Farnell |
| U7 | TEN8-2412WI | PWR_TEN8wi | 1 | Farnell Amtek |
| U8 | LM2596S-ADJ | TO170P1520-6N | 1 | TME (Farnell) |
| U9 | LM2596S-5V | TO170P1520-6N | 1 | TME (Farnell) |
| U10, U11 | OPA2340UA | SOIC127P600-8AN | 2 | Farnell (TME) |
| Y1 | QM 8.192 MHz - HC49U/S | X_HC49/4H_SMX | 1 | TME |

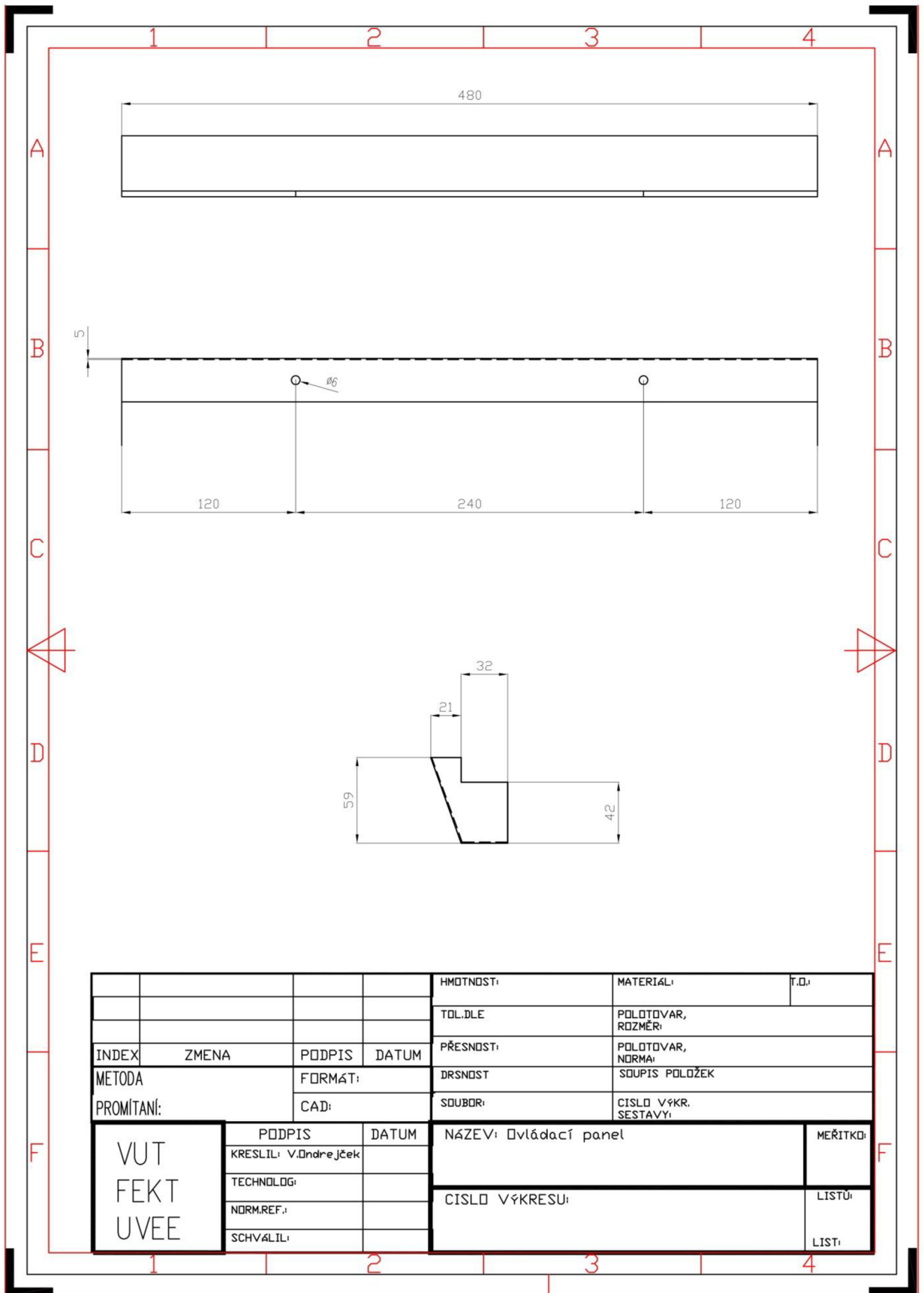
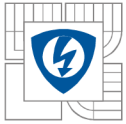
Tabulka 21 Seznam součástek brzděné jednotky

| Označení | Typ | Footprint | Počet ks | Dodávka |
|--------------------------------------|---------------|---------------|----------|---------------|
| C1 | 22n/50V | C_keram RM5 | 1 | GME |
| C2 | CE 10M/63V | CAPPR2-5x11 | 1 | GME |
| C3 | CE 47M/50V | CAPPR3.5-8x12 | 1 | GME |
| D1 | LED 5mm GREEN | LED 5mm | 1 | GME |
| D2 | BZX83 9V1 | D_1N4007 | 1 | GME |
| D3 | 1N4148 | D_1N4007 | 1 | GME |
| D4 | BZX85 30V | Zener_1,3W | 1 | GME |
| D5 | 5mm RED | LED 5mm | 1 | GME |
| K1 | Relay 24V 45A | RELAY 24V 45A | 1 | Farnell |
| P1, P2, P3 | MF42-SD-04 | hdr-42-4 | 3 | TME (Farnell) |
| Q1, Q2 | BC327 | 29-04 | 2 | GME |
| Q3 | IRFP460 | TO-247AC | 1 | - |
| R1 | 6R8 5W | Res 5W | 1 | GME |
| R2, R3, R4, R6, R7, R8, R9, R10, R11 | Res2 | AXIAL-0.4 | 9 | GME |
| R5 | 470R 1W | Res 2W | 1 | - |
| S1 | P-KNX2 | SW_DPDT_2P | 1 | GES (GME) |
| S2 | P-KNX1 | SW_SPDT 3P | 1 | GES (GME) |
| U1 | TL431ACL | LP03 | 1 | GME |
| U2 | LM317KC | KC03 | 1 | GME |





| | | | | | | |
|---------------------|-----------------------|---------|---------------------------|-----------|-------------------------|----------|
| | | | | HMOTNOST: | MATERIÁL: | T.D.: |
| | | | | TOL.DLE | POLOTOVAR, ROZMÉR: | |
| INDEX | ZMENA | PODPIS | DATUM | PŘESNOST: | POLOTOVAR, NORMA: | |
| METODA | | FORMÁT: | | DRSNOST | SOUPIS POLOŽEK | |
| PROMÍTANÍ: | | CAD: | | SOUBOR: | CISLO VÝKR. SESTAVY: | |
| VUT FEKT UVEE | PODPIS | DATUM | NÁZEV: Připojovací svorky | | | MEŘITKO: |
| | KRESLIL: V. Ondřejček | | CISLO VÝKRESU: | | | LISTŮ: |
| | TECHNOLOG: | | | | | LIST: |
| | NORM.REF.: | | | | | |
| SCHVÁLIL: | | | | | | |



| | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------|---------|-----------------------|-----------|-------------------------|----------|
| | | | | HMOTNOST: | MATERIÁL: | T.D.: |
| | | | | TOL.DLE | POLOTOVAR, ROZMÉR: | |
| INDEX | ZMENA | PODPIS | DATUM | PŘESNOST: | POLOTOVAR, NORMA: | |
| METODA | | FORMÁT: | | DRSNOST | SOUPIS POLOŽEK | |
| PROMÍTANÍ: | | CAD: | | SOUBOR: | CISLO VÝKR. SESTAVY: | |
| VUT FEKT UVEE | PODPIS | DATUM | NÁZEV: Ovládací panel | | | MEŘITKO: |
| | KRESLIL: V. Ondřejček | | CISLO VÝKRESU: | | | LISTŮ: |
| | TECHNOLOG: | | | | | LIST: |
| | NORM.REF.: | | | | | |
| SCHVÁLIL: | | | | | | |