

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Regulovaný 3f zdroj napětí

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan HOŠEK**
Osobní číslo: **E09B0046P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Regulovaný 3f zdroj napětí**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Přehledově zpracujte možnosti řešení 3f regulovaných sinusových zdrojů.
2. Uveďte zapojení boosterů a popište jejich výhody a nevýhody.
3. Navrhněte schéma zapojení konkrétního boosteru.
4. Schéma zapojení realizujte, uveďte do provozu a odzkoušejte.
5. Shrňte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Trinkewitz, Z.: Průmyslové zkoušky velkých elektrických strojů točivých. SNTL Praha 1984**
2. **Bartoš, V., Skala, B. : Měření na elektrických strojích. Skripta ZCU, Plzeň 2002**
3. **Elektronické informační zdroje na ZČU: Compendex, Inspec**

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**



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



Prof. Ing. Vladav Kás, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Tato práce se v úvodu zabývá rozdělením a popisem různých druhů třífázových regulovatelných zdrojů. V druhé části potom praktickým řešením jištění a provozního měření proudu a napětí na třífázovém boosteru.

Klíčová slova

indukční regulátor, booster, měření proudu, Hallova sonda, třífázové regulovatelné zdroje napětí, autotransformátor

Three-phase voltage source

Abstract

This thesis deals in the beginning about various types of controlled three-phase voltage sources. In the second part describes the design of current protection and current measuring by Hall-effect sensor on a particular machine.

Key words

induction voltage regulator, booster, current measuring, Hall-effect transducer, three-phase voltage sources, autotransformer,

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 31. 5. 2012

Jan Hošek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Bohumilu Skalovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a povzbudivá slova, Ing. Karlu Čermákovi za pomoc při návrhu desky plošného spoje a mé rodině za podporu během mého studia.

OBSAH:

OBSAH	8
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	9
ÚVOD.....	10
1 REGULOVANÉ ZDROJE HARMONICKÉHO NAPĚTÍ	11
1.1 Autotransformátory	11
1.1.1 Princip funkce.....	11
1.1.2 Aplikace	13
1.2 Indukční regulátory – boostery	15
1.2.1 Jednoduchý booster	15
1.2.2 Dvojitý booster	16
2 VLASTNÍ PRÁCE	18
2.1 Jištění	19
2.2 Měření napětí	20
2.3 Měření proudu	21
2.3.1 Počáteční úvahy	21
2.3.2 Snímač proudu	22
2.3.3 Návrh zesilovače ke snímači	24
2.3.4 Návrh napájecího zdroje	26
2.4 Cenová kalkulace	29
2.5 Závěr	30
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	31
PŘÍLOHY	
A: Schéma silnoproudých obvodů	32
B: Schéma zesilovače s nap. zdrojem	33
C: Matrice na výrobu DPS	34
D: Použité součástky	35

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Veličiny

C [F]	kapacita
f [Hz]	kmitočet
i [A].....	proud (okamžitá hodnota)
I [A]	proud (efektivní hodnota)
p [-]	převod
ψ [Wb].....	spřažený magnetický tok
R_p [Ω]	odpor předřadníku
R_i [Ω]	odpor voltmetru
S [VA]	zdánlivý výkon
u [V/-].....	napětí (okamžitá/poměrná hodnota)
U [V]	napětí (efektivní hodnota)

Indexy

0.....	naprázdno
1.....	primární
2.....	sekundární
a	autotransformátor
i	indukovaný/vnitřní
k.....	nakrátko
n.....	jmenovitý
t.....	transformátor

Zkratky

DPS	deska plošných spojů
OZ	operační zesilovač
SMD	součástka pro povrchovou montáž (surface mounted device)

Úvod

Při přenosu a distribuci elektrické energie je napětí sítě dáno tvrdostí celé elektrizační soustavy a jeho regulaci řídí operátor přenosové soustavy tak, aby mělo stále konstantní hodnotu. Konečný zákazník však někdy potřebuje velikost napětí měnit, podle jeho potřeb, v ideálním případě plynule a bez deformací jeho průběhu. Mezi provozy, kde je regulace střídavého napětí, ať už ve větších nebo menších mezích požadována, patří například průmyslové závody, kde je vyžadována regulace otáček pohonů, teploty v odporových tavicích pecích nebo pro různé laboratorní zkoušky. V těchto případech je potřebný regulovatelný sinusový zdroj napětí.

Ačkoli v posledních desetiletích nastal obrovský boom v oblasti výkonové elektroniky, tato zařízení dosáhla vysoké úrovně a polovodičové měniče se tak staly součástí každodenního života, nejedná se ve své podstatě o harmonické měniče napětí – pracují na impulzním spínacím principu a jejich průběhy napětí se sinusoidě pouze přibližují, proto se jimi dále nebudeme zabývat. Další možností jsou motor-generátorové skupiny (například Ward-Leonardovo soustrojí), nebo stroje pracující na základě elektromagnetické indukce. Mezi posledně jmenované patří v zásadě dva typy klasických „měničů“:

autotransformátory a indukční regulátory (boostery) – těmto se bude věnovat následující text.

1. Regulovatelné zdroje harmonického napětí

Klasické regulované zdroje harmonického napětí, jimiž se dále budeme zabývat, pracují na principu elektromagnetické indukce (podle Faradayova indukčního zákona), kde se změnou magnetického toku v čase v cívce indukuje elektrické napětí, podle známého vzorce

$$u_i = \frac{d\psi}{dt} [\text{V, Wb}] \quad (1.1)$$

kde u_i je indukované napětí v cívce a ψ je magnetický tok s ní spřažený.

To prakticky znamená, že na primární stranu přivádíme střídavé, obvykle třífázové napětí, které na sekundární straně indukuje napětí, jímž napájíme zátěž. Protože se jedná o stroje netočivé (ačkoli mohou mít i otáčivou část), neuplatní se zde napětí vzniklé pohybem vodiče v magnetickém poli – pohybové napětí.

Na tomto principu pracuje také klasický transformátor, ovšem ten, až na výjimky v podobě regulačních transformátorů vn/vvn, které mohou přepínat odbočky pod zátěží, má obvykle pevný převod, proto ho nelze řadit mezi regulovatelné zdroje. Mezi typické představitele sinusových regulovatelných zdrojů patří:

- autotransformátory
- indukční regulátory (boostery)

1.1 Autotransformátory

1.1.1 Princip funkce

Autotransformátor je zvláštním druhem transformátoru, který má na rozdíl od klasického transformátoru, pouze jedno vinutí – správně řečeno dvě vinutí, ovšem galvanicky spojená. Tím, že jsou obě vinutí spojena, je část výkonu přenášena formou galvanickou (označme S_g) a část transformací (označme S_t) - jako u klasických transformátorů. Celkový přenesený výkon je tedy

$$\mathbf{S}_p = \mathbf{S}_g + \mathbf{S}_t \text{ [VA]} \quad (1.2)$$

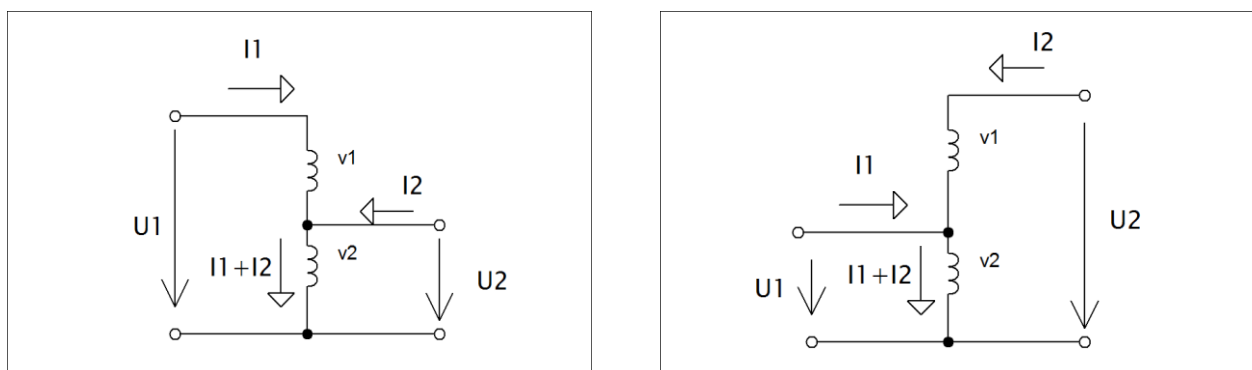
Na obrázku 1.1 vlevo je vidět princip jednofázového snižovacího autotransformátoru. Na primární stranu je přivedeno napětí U_1 , jehož část vybudí magnetický tok ve vinutí V_1 , který indukuje napětí ve vinutí V_2 . Další část výkonu prochází na sekundární stranu galvanickou cestou. Zavádí se takzvaný vnitřní výkon

$$\mathbf{S}_i = (\mathbf{U}_1 - \mathbf{U}_2)\mathbf{I}_1 = \mathbf{U}_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_1) \quad (1.3)$$

který se shoduje s výkonem transformačním, na nějž se musí vinutí V_2 dimenzovat. V případě, že poměr $\frac{U_2}{U_1}$ se blíží 1, je rozdíl proudů $I_2 - I_1$ malé číslo, tedy i vnitřní výkon vychází podstatně menší, než u klasického transformátoru. Z toho plyne, že vinutí V_2 může být navinuto z tenčího vodiče a pro stejný přenesený výkon vychází autotransformátory menší, než klasický transformátor. Tato vlastnost se dá vyjádřit mírou úspory

$$\frac{S_i}{S_N} = \frac{(U_1 - U_2)I_1}{U_1 I_1} = 1 - \frac{U_2}{U_1} \quad (1.4)$$

kde S_i je výkon, na nějž se dimenzuje magnetický obvod a vinutí V_2 (z hlediska Jouleových ztrát) a výkon S_N je celkový přenesený výkon (na nějž by se dimenzoval klasický transformátor). I zde se zavádí převod, definovaný $p = \frac{N_1 - N_2}{N_2}$. Funkce zvyšovacího autotrafo je obdobná (obr. 1.1 vpravo).



Obr. 1.1 Snižovací (vlevo) a zvyšovací (vpravo) jednofázový autotransformátor

Jak vyplývá z předchozího textu, mezi výhodné vlastnosti autotransformátorů patří jejich menší rozměry pro přenos stejných výkonů. Oproti klasickým transformátorům však

mají menší napětí nakrátko dané vztahem

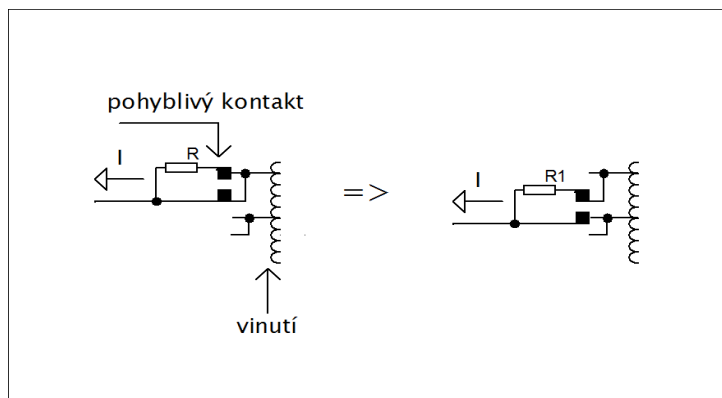
$$u_{ka} = u_{kt} \frac{S_i}{S_n} \quad (1.5)$$

z čehož plynou i větší zkratové proudy. S nimi jsou spojeny nebezpečné dynamické a tepelné účinky, kterým je třeba zabránit. Další nevýhodou je galvanické spojení primární a sekundární strany, což může být v případě poruchy nebezpečné, zejména při přerušení uzemnění uzlu může dojít k přenosu vyššího napětí na stranu nižšího.

Autotransformátory mohou být jak jednofázové tak třífázové, ovšem v případě třífázových se v zásadě jedná o zapojení do hvězdy. Při zapojení do trojúhelníka by se fázový posun napětí vstupní a výstupní strany neměnil v násobcích hodinových čísel a to je z hlediska sítě nežádoucí [2].

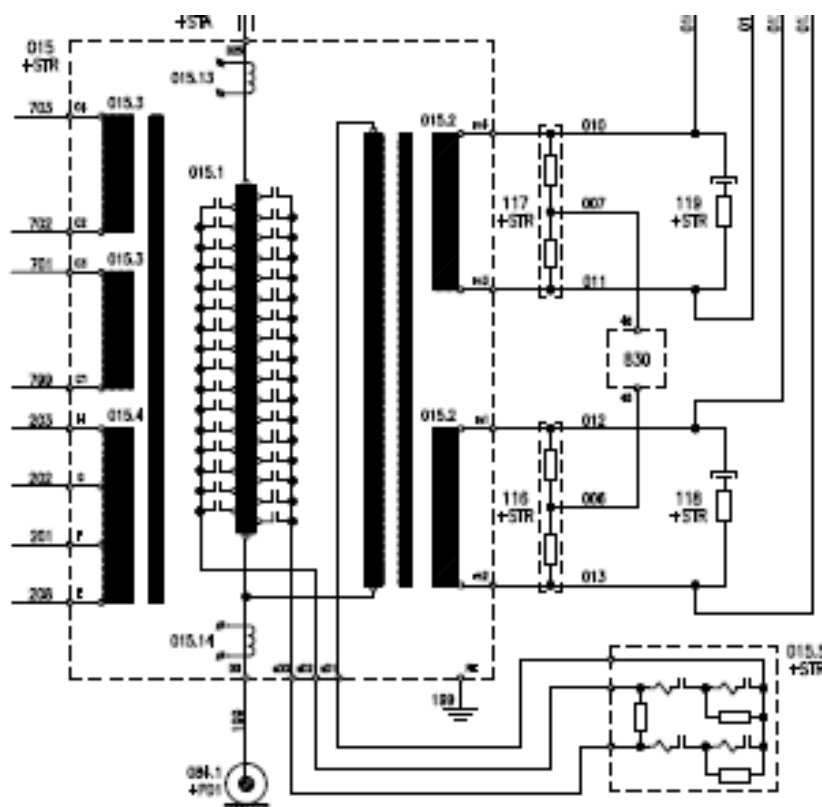
1.1.2 Aplikace

Častou aplikací jsou laboratorní autotransformátory menších výkonů – řádově do 10kW. Tyto stroje mají prstencová vinutí, umístěná na plechovém jádru ve tvaru mezikružít. Na vnitřní straně je pohyblivý otočný kontakt, který klouže po pevných kontaktech jednotlivých odboček. Aby se při přepínání nepřerušil proud v obvodu a zároveň nedošlo ke spojení závitu nakrátko, používá se při přepínání upravený kontakt, jehož princip je vidět na obrázku 1.2. Při nastavení na určitou odbočku jsou oba kontakty na stejném potenciálu, proud prochází větví bez odporu. Při přechodu na následující odbočku se proud nepřeruší, zároveň však odpor omezí proud způsobený rozdílem napětí mezi sousedními odbočkami. Toto zapojení umožňuje plynulé přepínání odboček pod zatížením [3].



Obr. 1.2 Přepínání odboček pod zátěží

Speciálním jednofázovým autotransfornátorem je lokomotivní autotrafo na obrázku 1.3. Tento autotransfornátor je předřazen před transformátory s pevným převodem (to znamená na stranu VN), které napájejí přes usměrňovače ss. motory. Autotransfornátor má 32 odboček, kterými se dá regulovat napětí od nuly do jmenovité hodnoty. Pro přepínání slouží blok stykačů vpravo dole, který před vlastním přepnutím odbočky zařazuje do obvodu odpory, aby se zabránilo proudovým rázům. Zde se uplatní výhoda regulace na straně VN (25kV), kde tečou podstatně menší proudy, než na NN straně. Spínací prvky se mohou dimenzovat na nižší proudové hodnoty, díky čemuž vycházejí jak rozměrově, tak finančně úspornější [5].



Obr. 1.3 Zapojení autotransfornátoru lokomotivy ř.230 (ŠKODA Plzeň)

Autotransfornátory jsou také výhodné pro omezení záběrných proudů při spouštění velkých asynchronních nebo synchronních motorů – je možné je poddimenzovat s ohledem na krátkodobé použití, čímž dochází ke značné úspoře místa i hmotnosti. Používají se i v sítích vvn s uzemněným uzlem, kde nevádí ani malá zkratuvzdornost, protože proudy omezí poměrně velká vlastní indukčnost vedení.

1.2 Indukční regulátory – boostery

Další skupinou regulovatelných zdrojů harmonického napětí jsou indukční regulátory, jinak zvané boostery nebo natáčivé transformátory. Z konstrukčního hlediska se v podstatě jedná o indukční (asynchronní) stroje s vinutou kotvou (kroužkovou): na statoru je po obvodu umístěno třífázové rozložené vinutí, přičemž každá fáze je prostorově posunuta o 120° - z něj energii odebíráme, proto ho nazýváme sekundární stranou. Na rotoru je rovněž umístěno třífázové vinutí s posunem 120° , jež je vyvedeno na kroužky a přes kartáče napájeno z třífázové sítě – nazýváme ho primární stranou. Vzájemnou polohou rotoru vůči statoru lze regulovat napětí, případně fázi sekundáru. Je však nutné rotor mechanicky zabrzdít, jinak by se roztočil jako klasický asynchronní motor.

V praxi se vyskytuje několik základních zapojení, mezi nimiž jsou určité rozdíly:

- jednoduchý booster
- dvojitý booster (sekundár spojený se sítí nebo galvanicky oddělený)
- zapojení Pensabene
- jednofázové zapojení

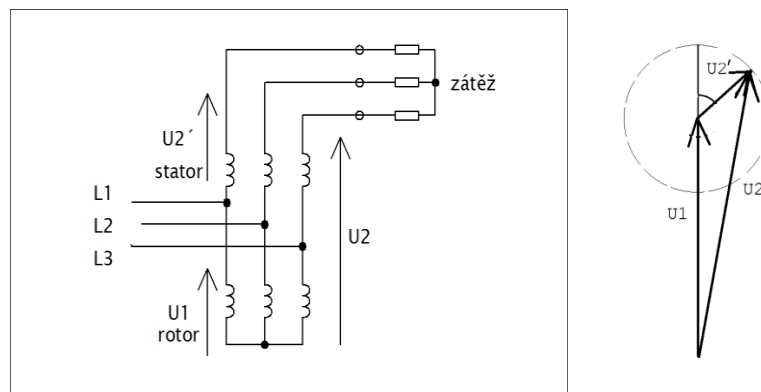
Oproti klasickým transformátorům má nevýhodu vyššího magnetizačního proudu, což je dáno existencí vzduchové mezery mezi státorem a rotorem. Aby nedocházelo ke slepování, drážky se v podélné ose zešikmují. Provedení může být jak horizontální, tak vertikální. Protože se jedná o netočivý stroj, je většinou nutné zajistit cizí chlazení externím ventilátorem, jenž je většinou součástí soustrojí. Natáčení rotoru je zajištěno hřídelkou se šnekovým převodem, na kterou je možné umístit servomotor a regulaci provádět dálkově.

Ačkoli se dnes již běžně vyskytují spíše zdroje na bázi polovodičových měničů, stále se můžeme setkat s indukčními regulátory pro speciální účely například v laboratořích, radiokomunikacích nebo pro napájení odporových tavicích pecí a stále se nachází ve výrobním programu některých firem – u nás je to TES Vsetín. Výhodou je harmonický průběh výstupního napětí a především jejich robustní konstrukce, která zaručuje i při minimální údržbě značnou životnost.

1.2.1 Jednoduchý booster

Jedná se o nejjednodušší zapojení (obr. 1.4), kdy je jak rotor, tak stator připojen na

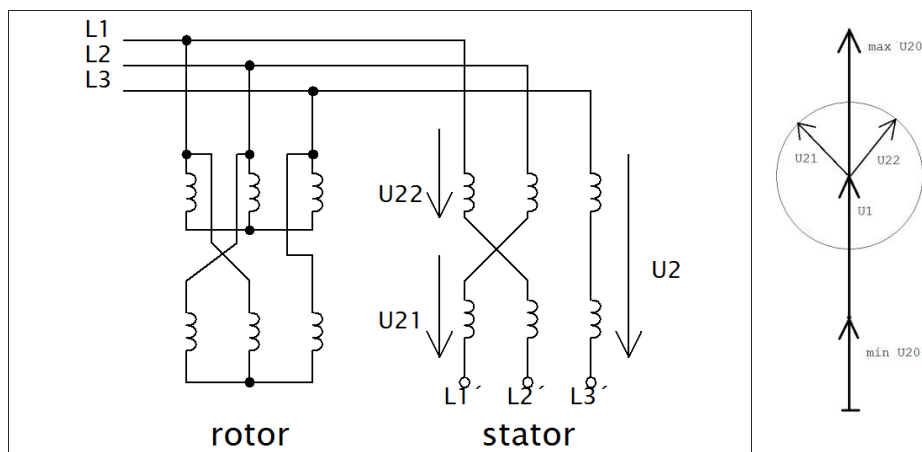
třífázovou napájecí sítí. Výstupní napětí je dáno geometrickým součtem napětí indukovaných v rotoru a statoru. Výsledné napětí tedy mění nejen svou absolutní hodnotu, ale rovněž fázi. Ta je úměrná úhlu natočení rotoru vůči statoru, přičemž maxima dosahuje při úhlu $\alpha = 90^\circ$. Výsledné napětí naprázdno se tedy může pohybovat v mezích od $U_{20\min} = U_1 - U'_{20}$ do $U_{20\max} = U_1 + U'_{20}$.



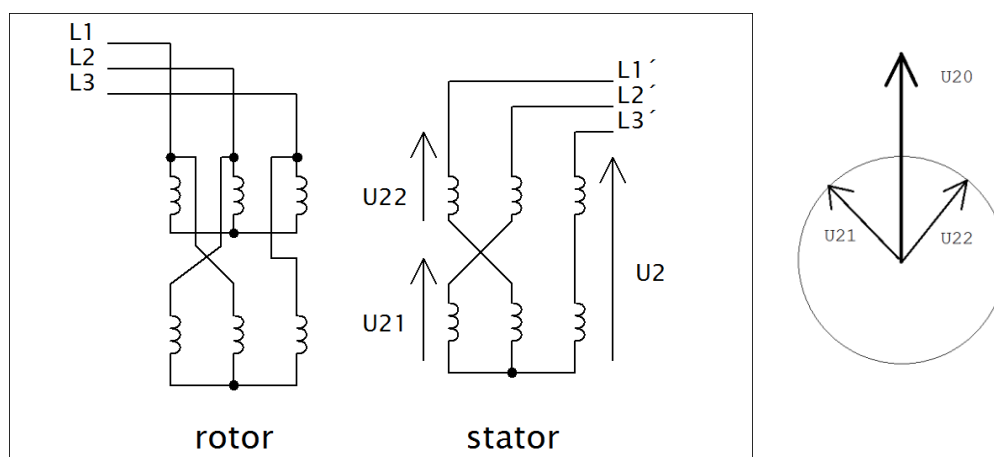
Obr. 1.4 Schéma zapojení a fázorový diagram jednoduchého boosteru

1.2.2 Dvojitý booster

V případech, že je nežádoucí posun fáze napětí sekundárního vinutí vůči primárnímu (např. při napájení 3f derivačních motorů), používají se dvojitě boostery, což je soustrojí složené v podstatě ze dvou jednoduchých boosterů na společné hřídeli. Primární vinutí obou strojů se zapojí paralelně, ovšem tak, že se u nich vzájemně prostrídají dvě fáze, čímž se dosáhne opačného smyslu otáčení magnetického pole. Při natáčení rotoru se tedy obě pole otáčejí proti sobě a vzájemně tak eliminují posun fáze. Existují dva základní druhy zapojení sekundární strany a to s napájeným rotorem i statorem (obr. 1.5) a se samostatně pracujícím statorem (obr. 1.6).



Obr. 1.5 Schéma zapojení a fázorový diagram dvojitého boosteru se sekundárem na síti



Obr. 1.6 Schéma zapojení a fázorový diagram dvojitého boosteru s odděleným sekundárem

Při zapojení podle obrázku 1.5, někdy též nazývané autotransformátorové, se k síťovému napětí přičítá napětí indukované v sekundáru. Je možné regulovat napětí od určité minimální hodnoty, dané rozdílem síťového napětí a fázorového součtu napětí U_{21} a U_{22} (tj. v podstatě dvojnásobku fázového napětí jednoho vinutí sekundáru) až po maximální hodnotu danou naopak jejich součtem. Za výhodu lze považovat, že tato hodnota může být tedy vyšší, než je síťové napětí, aniž by narostly rozměry stroje. Zpravidla však nelze regulovat od nulového napětí. Výstupní napětí je také galvanicky spojeno se vstupním, což může být z hlediska bezpečnosti nežádoucí – z pohledu výstupních svorek se jedná o soustavu TN – s uzemněným středem.

Naproti tomu zapojení z obrázku 1.6 je galvanicky oddělené. Výstupní napětí dané fázorovým součtem

$$U_{20} = U_{21} + U_{22} \quad (1.6)$$

Lze regulovat od 0 do $|U_{21}|+|U_{22}|$ resp. lze dosáhnout protifáze – $(|U_{21}|+|U_{22}|)$, nedosahuje však ani hodnoty vstupního napětí. Tento druh boosteru se může vyskytovat jak ve spojení do hvězdy (viz obr. 1.6), tak do trojúhelníka, nebo je možné sekundární vinutí zapojit paralelně a napájet šestifázový spotřebič. Z pohledu výstupních svorek se jedná o soustavu IT – s izolovaným středem.

Mezi neobvyklé zapojení patří takzvané „Pensabene“, kdy je vzájemně se střídající vinutí statoru a rotoru zapojeno do trojúhelníka, přičemž tento druh kombinuje výhody obou předchozích, tedy nenatáčí fázi a je možné regulovat napětí od nuly do maxima, které může být vyšší než napájecí síťové napětí. Existuje jak pro jednofázový, tak pro třífázový výstup. I tady je však galvanická vazba primární a sekundární strany.

2. Vlastní práce

Předmětem vlastní práce bylo navrhnout a vyrobit soupravu pro jištění a měření třífázového boosteru instalovanou v jednom přístrojovém boxu, určenou pro stroje umístěné v laboratořích FEL.

Štítkové hodnoty strojů:

A. Výrobce: MEZ Mohelnice

typ: JRF 55N-2

r. v. 1962

$S_n = 2,3 \text{ kVA}$

$U_{\text{prim}} = 380\text{V (Y)}$

$U_{\text{sek}} = 380\text{V (Y)}$

$I_{\text{prim}} = 4,5\text{A}$

$I_{\text{sek}} = 3,5\text{A}$

$f = 50 \text{ Hz}$

B. Výrobce: MEZ Vsetín

typ: 2 IR 22A-2

r. v. 1959

$S_n = 6,7 \text{ kVA}$

$U_{\text{prim}} = 380\text{V}$

$U_{\text{sek}} = 0-500\text{V}$

$I_{\text{prim}} = 11\text{A}$

$I_{\text{sek}} = 7,7\text{A}$

$f = 50 \text{ Hz}$



Obr. 2.1 Jednoduchý booster



Obr. 2.2 Dvojitý booster

Jedná se o stroje umístěné v laboratořích FEL, které jsou využívány k výuce. V případě menšího stroje - označen A (obr. 2.1) se jedná o jednoduchý booster zapojený do hvězdy s propojením primární a sekundární strany. Větší stroj - označen B (obr. 2.2) je dvojitý booster.

2.1 Jištění

Jelikož jsou dané boostery připojeny na svorky laboratorního pultu, které jsou jištěny na 16A, bylo nutné navrhnout selektivní jištění proti zkratu, zajišťující v případě poruchy automatické odpojení od zdroje. S ohledem na možnost autonomního provozu a rozdílné hodnoty jmenovitých proudů je každý stroj jištěn samostatně.

Při návrhu jištění se vycházelo ze štítkových hodnot daných boosterů, konkrétně ze jmenovitých proudů na primární straně. V případě jednoduchého boosteru je jmenovitý proud $I_n = 4,5A$. V případě dvojitého boosteru je proud $I_n = 11A$, navíc je připojen externí ventilátor s proudem 0,26A, který však celkový proud významně neovlivní. S ohledem na to, že zapínací proud je kvůli vzduchové mezeře mezi statorem a rotorem velký, bylo třeba volit jističe s charakteristikou C resp. D, které mají zkratovou spoušť nastavenou na 10tinásobek

(resp. 20tinásobek) jmenovitého proudu. Nepříjemnou záležitostí je, že jističe charakteristiky D mohou být více než dvojnásobně drahé oproti charakteristice B se stejnou proudovou hodnotou, proto v případě menšího boosteru padla volba na charakteristiku C.

S ohledem na bezpečnost a bezporuchovost zařízení přicházely v úvahu pouze jističe ověřených značek. Pro menší booster byl zvolen třífázový jistič od firmy OEZ Letohrad, řady LPN, s vypínací charakteristikou C a jmenovitým proudem 4A. Pro větší booster pak třífázový jistič Moeller (dnes Eaton), typ PL7, charakteristiky D na 10A. Oba jističe mají zkratovou odolnost 10kA. Zapojení jističů je zřejmé ze schématu silového obvodu v příloze A.

Použité jističe:

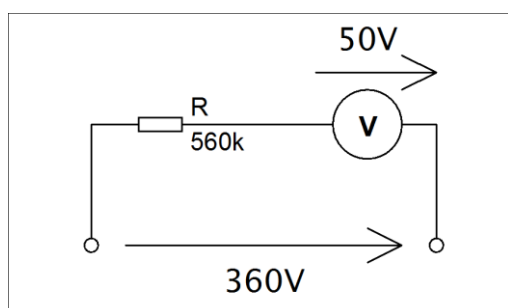
A: OEZ LPN, C4/3, $I_k=10\text{kA}$

B: Moeller PL7, D10/3/, $I_k=10\text{kA}$

2.2 Měření napětí

Pro měření sdruženého napětí na výstupu boosterů přicházely v úvahu panelové měřicí přístroje s feromagnetickým ústrojím nebo magnetoelektrickým ústrojím s usměřovačem. Takovéto přístroje nevyrobí mnoho výrobců, mezi renomované firmy patří Weigel nebo Metra Blansko. Po nahlédnutí do firemních katalogů našim požadavkům vyhovovali přístroje Weigel EQ48K (feromagnetické ústrojí) za 870Kč nebo Metra MuP220 (magnetoelektrické s usměřovačem) za 1100Kč. Tyto ceny ovšem byly nad rámec vymezeného rozpočtu, proto padla volba na střídavý voltmetr Faithful FB460 třídy přesnosti 2,5 s měřicím rozsahem 100V, doplněný předřadníkem, tak aby byl použitelný na sdružené napětí 400V (resp. 500V). Ten byl v nabídce firmy GES za cenu o řád nižší, než jsou nabízeny výše uvedené přístroje.

Pro určení předřadného odporu je nutné znát vnitřní odpor voltmetru, ten však výrobce neudával, proto bylo třeba ho změřit. Srovnávací metodou se známým rezistorem (viz obr. 2.3) vyšla hodnota vnitřního odporu voltmetru $R_i = 90,3\text{k}\Omega$.



$$I = \frac{360 - 50}{560 \cdot 10^3} = 553,65 \mu\text{A} \quad (2.1)$$

$$R_i = \frac{50}{553,6 \cdot 10^{-6}} = 90,3 \text{k}\Omega \quad (2.2)$$

Obr. 2.3 Měření vnitřního odporu voltmetru

Hodnota předřadného odporu se určila pomocí známého vzorce:

$$R_p = R_i \cdot \left(\frac{U}{U_V} - 1 \right) = 90,3 \cdot \left(\frac{400}{100} - 1 \right) = 271 \text{ k}\Omega \quad (2.3)$$

Dále bylo nutné vypočítat Jouleovy ztráty rezistoru, aby nedošlo překročením jejich dovolené hodnoty k přehřátí a poškození součástky.

$$I = \frac{U}{R_p + R_i} = \frac{500}{271 + 90,3} = 1,39 \text{ mA} \quad (2.4)$$

$$P_j = R_p \cdot I^2 = 270 \cdot 10^3 \cdot 0,00139^2 = 0,52 \text{ W} \quad (2.5)$$

Aby nedošlo ke zničení rezistoru, byl zvolen rezistor pro ztrátový výkon 1W. Tato řada ovšem neobsahuje dostatek hodnot odporů, proto bylo nutné potřebný odpor 271kΩ vytvořit sériovým spojením rezistorů o hodnotách 220kΩ, 47kΩ a 3,3kΩ, aby se dosáhlo požadované hodnoty. Ztráty na jednotlivých rezistorech se tedy ještě snížily. Pro větší booster, který má výstupní napětí až 500V se obdobným postupem zvolil předřadník o hodnotě 361kΩ, opět tvořený sériovou kombinací rezistorů 330kΩ a 33kΩ. Dosazením předřadníků sice úměrně ke zvětšení rozsahu vzrostla také spotřeba voltmetrů, ovšem vzhledem k účelu boosteru a tedy i přenášeným výkonům jsou tyto hodnoty pochopitelně zanedbatelné. Kontrolním srovnávacím měřením s jiným voltmetrem třídy přesnosti 1,5 se ověřilo, že zvolené hodnoty jsou správné. Na závěr se ještě přeznačila stupnice z rozsahu 100V na 400V resp. 500V. Zapojení voltmetrů do obvodů je patrné ze schématu silové části v příloze A.

2.3 Měření proudu

2.3.1 Počáteční úvahy

U měření proudu se vyskytl podobný problém jako u měření napětí a to cena měřících přístrojů. Z nabídky firem byl vhodný Weigel EQ48K za 685Kč nebo Metra FP80 za 1300Kč.

Toto řešení bylo zavrženo a hledala se jiná alternativa. Panelové přístroje běžně dostupné například v GM Electronics nebo v GESu zase neodpovídaly požadovaným proudům (10A), navíc měřili pouze stejnosměrné hodnoty. Vzhledem k tomu, že na Katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky byly zkušenosti s měřením Hallovou sondou, nabízela se možnost měřit takto proudy a poté je patřičně přizpůsobit a převádět na běžně dostupný analogový přístroj.

2.3.2 Snímač proudu

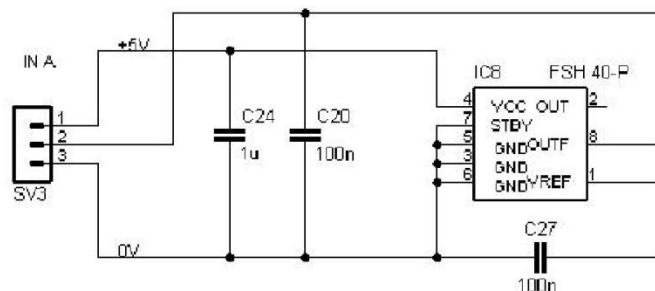
Jako snímač proudu byl použit integrovaný obvod pracující na bázi Hallové sondy od známé švýcarské firmy LEM, konkrétně typ FHS 40-P/SP600. Toto čidlo snímá intenzitu magnetického pole v okolí a převádí ji na napětí. Vzhledem k tomu, že v okolí každého vodiče protékaného proudem se vyskytuje magnetické pole, je možné ho využít pro měření proudu ve vodiči. Výrobce udává schopnost měřit proudy až do 100A a to jak stejnosměrné, tak střídavé. V případě stejnosměrných je ovšem nutné respektovat správnou polohu čidla vůči směru toku proudu. Součástka je umístěna v SMD pouzdru. Základní údaje o čidlu FHS 40-P/SP600 uvádí tabulka 1.

tab. 1 – Parametry čidla LEM FHS 40-P/SP600

napájecí napětí	U_{cc}	5V
spotřeba proudu	I_{cc}	15mA
měřicí rozsah mag. indukce	B_{max}	$\pm 3,3mT$
napěťový výstupní offset	U_{osFast}	50mV
výstupní impedance	Z_{out}	200 Ω
šířka pásma pro útlum 3dB	BW_{fast}	120kHz

Čidlo má dva výstupy V_{out} a $V_{outFast}$, které poskytují výstupní napětí v rozkmitu přibližně $\pm 2,5V$ v závislosti na naměřené magnetické indukci. Pro naše účely byl použit výstup $V_{outFast}$, který má větší šířku pásma, ovšem i větší výstupní offset. Toto čidlo bylo připájeno společně s blokujícími kondenzátory C20, C24 a C27, umístěnými co nejbližší k němu, na samostatnou destičku o rozměrech 25x12mm (fotomatrice v příloze C). Schéma zapojení jednotlivých vývodů je na obrázku 2.4.

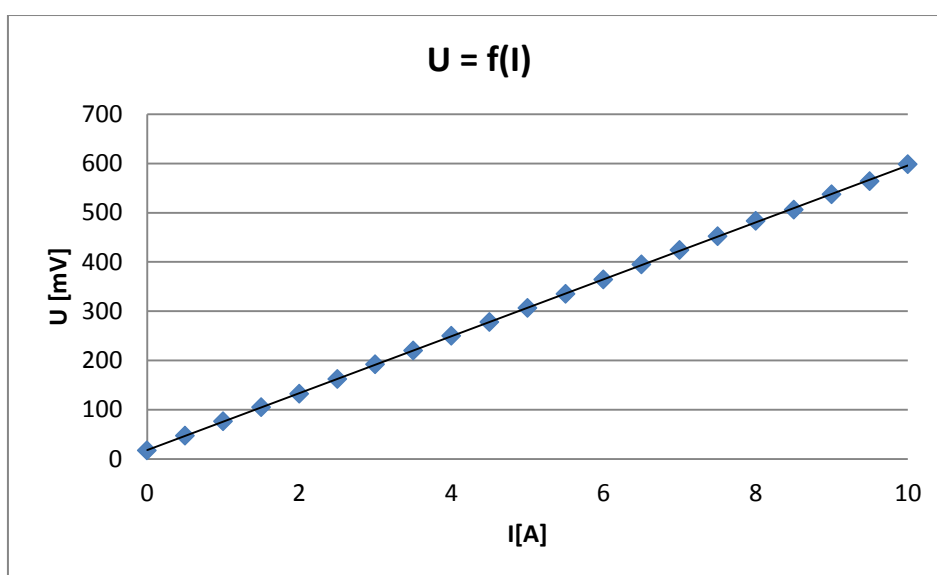
SNIMACE PROUDU



Obr. 2.4 Schéma zapojení čidla proudu na DPS (poskytla KEV)

Protože nebylo vyvedeno referenční napětí 2,5V, nebylo možné měřit výstupní napětí proti této referenci a bylo nutné ho vztahovat proti zemi. Výstupní napětí proti zemi tedy bylo posunuto o 2,5V. Okolo této hodnoty se pohybovala sinusoida úměrná měřenému střídavému proudu. Proto bylo nejdříve nutné odfiltrovat stejnosměrnou složku, harmonické napětí usměrnit a poté patřičně zesílit a indikovat na analogovém voltmetru. Efektivní hodnoty měřených proudů se měly pohybovat do 10A, byl proto zvolen voltmetr s rozsahem 10V tak, aby napětí 1V odpovídalo proudu 1A.

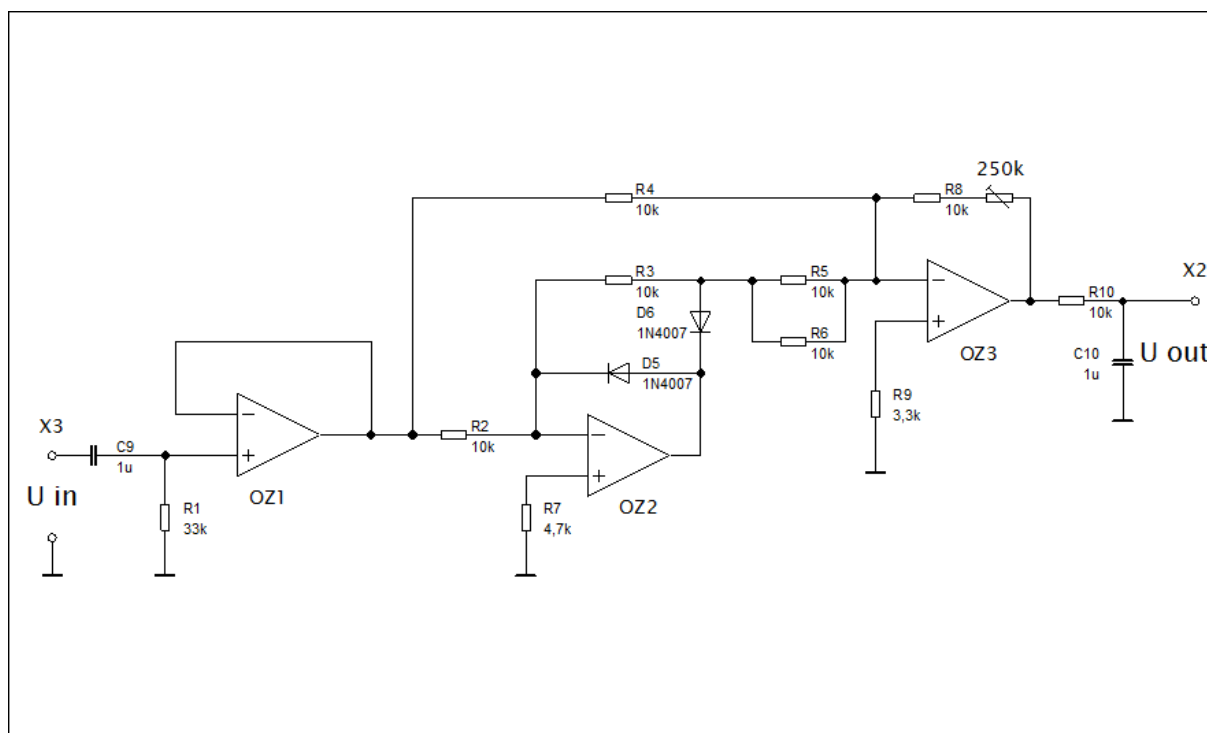
Aby bylo možné navrhnout zesilovač, bylo třeba provést orientační měření výstupního napětí čidla v závislosti na měřeném proudu. Čidlo bylo provizorně přichyceno k izolovanému vodiči 2,5mm². Z naměřených hodnot (obr. 2.5) vyplývá, že čidlo je lineární a offset se pohybuje v řádu jednotek mV.



Obr. 2.5 Graf závislosti napětí čidla na měřeném proudu

2.3.3 Návrh zesilovače ke snímači

Jak už bylo řečeno v předchozím textu, napětí přiváděné ze snímače bylo nejdříve nutné odfiltrovat, poté usměrnit, zesílit a stabilizovat. Schéma zesilovače je zobrazeno na obrázku 2.6, případně v příloze B.



Obr. 2.6 Schéma zapojení zesilovače pro Hallovu sondu

Jako filtr byl použit jednoduchý filtr 1. řádu, typu horní propust. Vzhledem k tomu, že měření bylo určeno pro síťový kmitočet 50Hz, bylo třeba nastavit mezní kmitočet tak, aby napětí síťového kmitočtu bez problémů prošlo. U filtru 1. řádu platí, že ve zlomovém kmitočtu je skutečný útlum 3dB (veličina nabývá hodnoty 0,707 své amplitudy), proto byl zvolen zlomový kmitočet 5Hz tedy o řád nižší, aby na 50Hz proud, resp. napětí prošlo nezkreslené. Kondenzátor C9 byl zvolen keramický 1µF a hodnota odporu R1 se dopočetla odvozením ze vzorce pro rezonanční kmitočet RC článku:

$$f_{rez} = \frac{1}{2\pi RC} \Rightarrow R = \frac{1}{2\pi C f_{rez}} = \frac{1}{2\pi \cdot 5 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 32k\Omega \quad (2.6)$$

čemuž z řady nejlépe odpovídá hodnota 33kΩ.

K impedančnímu oddělení slouží první operační zesilovač OZ1, zde zapojený jako napěťový sledovač. Jeho vstupní impedance je řádově větší (ideálně nekonečná) než výstupní impedance (ideálně nulová), takže vstupní filtr neovlivňuje vstupní impedanci OZ2.

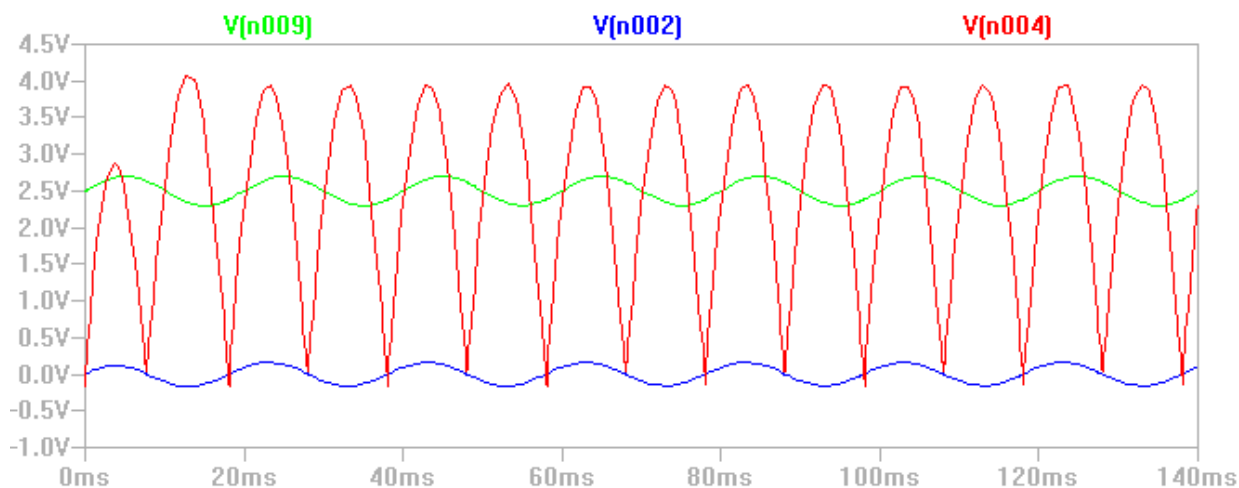
Protože stále pracujeme s velmi malými hodnotami napětí, není možné použít k usměrnění například klasický diodový můstek. Na diodách by se značně projevil nelinearity v oblasti prahového napětí cca 0,7V, případně by ani nepřešly do propustného stavu. Proto je zde použit tzv. ideální dvoucestný usměrňovač tvořený OZ2, OZ3 s diodami D5 a D6 a odpory R2, R3, R4, R5, R6, R8. Popis jeho činnosti je uveden například v [4]. Toto zapojení eliminuje předchozí negativa a jeho výstupní charakteristika má tvar funkce absolutní hodnoty. Protože zapojení OZ3 je v podstatě invertující zesilovač, jehož zesílení je dáno poměrem odporu ve zpětné vazbě k odporu na invertujícím vstupu, je možné přidáním trimru do zpětné vazby nastavit hodnotu požadovaného zesílení. Hodnota trimru byla určena přibližným odhadem z následujícího předpokladu. V grafu na obr. 2.5 odpovídá proudu 5A výstupní napětí čidla přibližně 300mV. Námi požadovaná hodnota na analogovém voltmetru bude např. 5V. Poměrem $\frac{5}{0.3}$ vychází požadované zesílení k zhruba 17. Hodnotu odporu (trimru) ve zpětné vazbě určíme takto:

$$\frac{R_{ZV}}{R_4} = k \Rightarrow R_{ZV} = k \cdot R_4 = 17 \cdot 10k\Omega = 170k\Omega \quad (2.7)$$

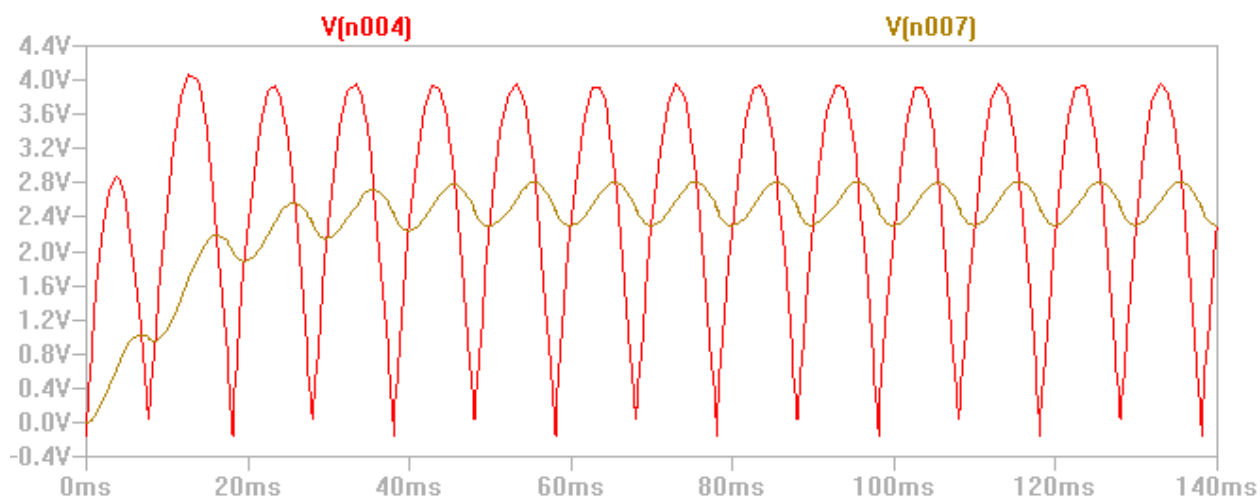
Nejbližší vhodná dodávaná hodnota je 250k Ω .

Protože je měřené napětí nízkého kmitočtu, je dobré ho na výstupu z usměrňovače vyhladit. Toho je docíleno zapojením dolní propusti 1. řádu tvořené odporem R10 = 10k Ω a kondenzátorem C10 = 1 μ F. Hodnota kondenzátoru se určila zkušebním měřením tak, aby bylo napětí co nejméně zvlněné, zároveň však nedocházelo k dlouhým přechodovým dějům při náhlé změně proudu.

Následovala zkušební simulace popisovaného obvodu ve freeware programu pro simulace LT Spice. Na obrázku 2.7 je zeleně zobrazeno sinusové vstupní napětí se stejnosměrným posunem 2,5V, modře napětí za filtrem a červeně usměrněné napětí za OZ 3. Následující obrázek 2.8 zobrazuje červenou barvou usměrněné napětí za OZ 3 (stejně jako v předchozím obrázku) a žlutou výstupní napětí za stabilizačním kondenzátorem, které se pohybuje okolo hodnoty 2,4V. Je zde vidět i počáteční přechodový děj, který trvá necelých 40ms.



Obr. 2.7 Simulace zesilovače a usměrňovače v programu LT Spice (zelená=napětí z čidla, modrá=napětí za vstup. filtrem, červená=napětí za usměrňovačem)



Obr. 2.8 Simulace zesilovače a usměrňovače v programu LT Spice (červená=napětí za usměrňovačem, žlutá=napětí na C10)

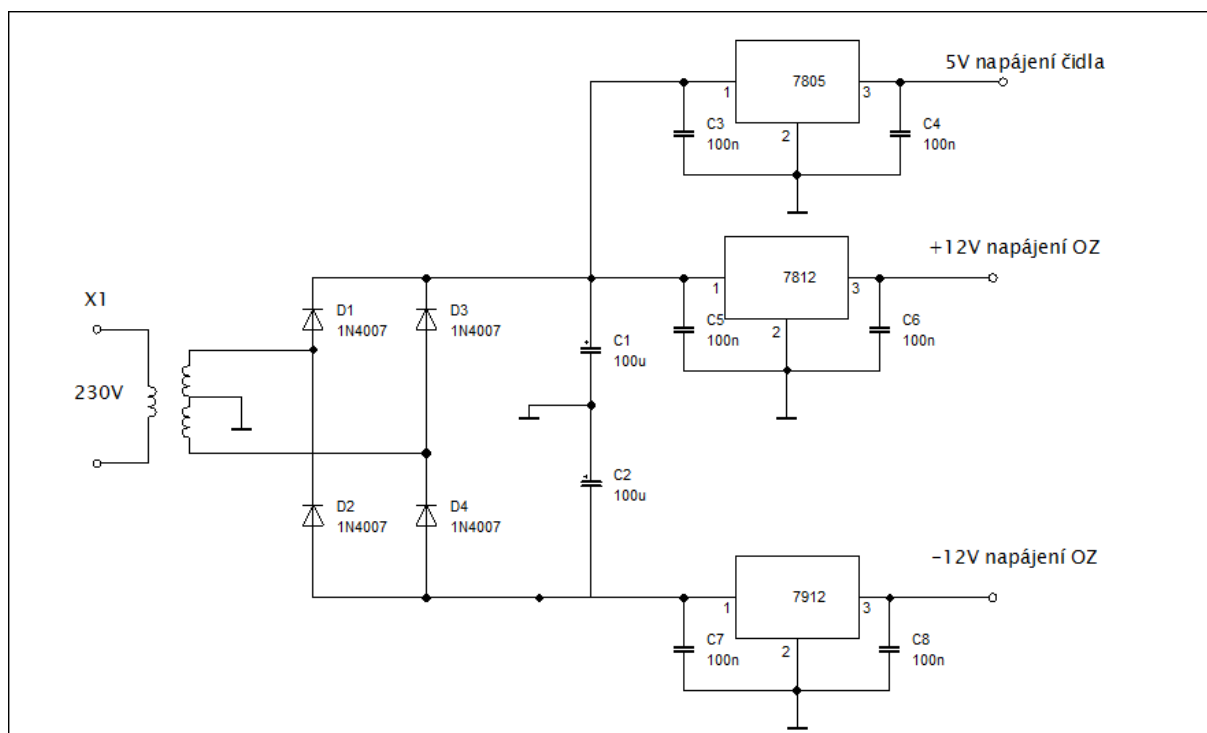
2.3.4 Návrh napájecího zdroje

Protože bylo potřeba přivádět z OZ na analogový voltmetr napětí o rozsahu 10V, OZ jsme museli napájet, s ohledem na předpokládané úbytky uvnitř struktury 2V, napětím $\pm 12V$. Symetrické napájení bylo nezbytné pro správnou funkci usměrňovače, proto nešlo použít náhradní napájení pouze jednou polaritou. Napájení čidla vyžaduje 5V. Celkem byly tedy nutné 3 napájecí hladiny.

Schéma zapojení je zřejmé z obrázku 2.9, případně přílohy B. Jedná se o klasické jednoduché schéma zdroje, pro naše účely však plně postačující. Postup návrhu byl následující: jako stabilizátory byly použity integrované obvody řady 78xx, které mají zabudovanou tepelnou a zkratovou ochranu. Konkrétně tedy 7805 pro čidlo, 7812 pro kladné napětí OZ a 7912 pro záporné napětí OZ. Pro správnou funkci stabilizátorů výrobce udává, že je na vstup nutné přivádět napětí o cca 3V vyšší, než je požadované výstupní. V našem případě alespoň 15V. S ohledem na nutnost obou polarit napětí, byl použit transformátor s vyvedeným středem, za ním usměrňovač tvořený diodovým můstkem a vyhlazovací kondenzátory. Napájení mělo být z běžné sítě, proto byl vybrán transformátor s převodem $\frac{230V}{2 \times 12V}$. Jedná se o efektivní hodnoty, vyhlazovací kondenzátory se však nabíjí na maximální hodnotu. Ta je v tomto případě:

$$U_C = U \cdot \sqrt{2} = 12 \cdot \sqrt{2} = 17V \quad (2.8)$$

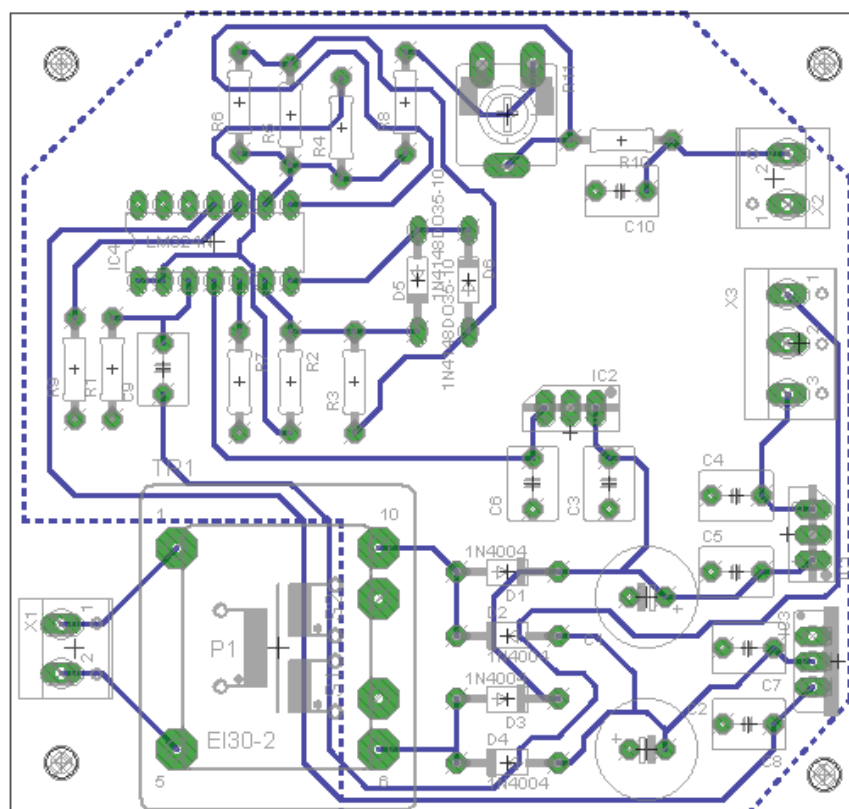
což plně vyhovuje minimálnímu požadovanému vstupnímu napětí stabilizátorů 15V. U stabilizátoru 7805 dochází vlivem většího napěťového rozdílu k většímu tepelnému namáhání, nicméně s ohledem na odebírané proudy (jednotky mA) nebylo nutné dosazovat chladič.



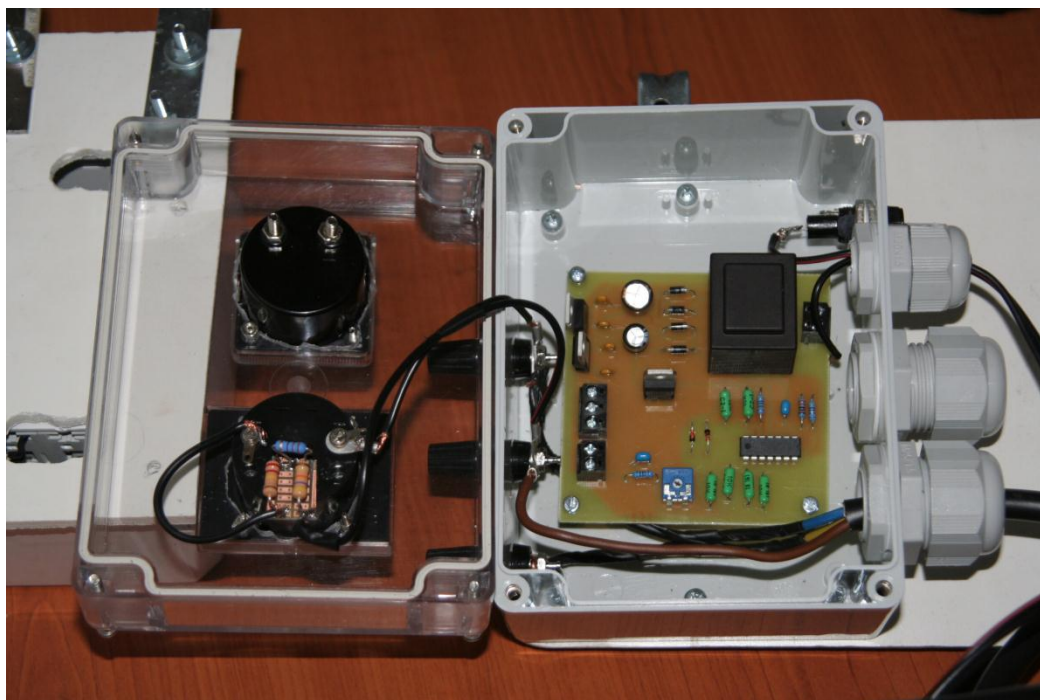
Obr. 2.9 Schéma zdroje pro napájení OZ a čidla

Kondenzátory C1 a C2 jsou vyhlazovací, pro svou velkou kapacitu $100\mu\text{F}$ byly použity elektrolytické kondenzátory na 50V. Blokovací kondenzátory C3 až C8, pro zamezení kmitání na vysoké frekvenci, jsou na doporučení výrobcem stabilizátorů keramické 100nF , umístěné co nejbližší k vývodům stabilizátorů.

Návrh DPS byl proveden ve freeware programu Eagle 5.8 a výroba zadána firmě Elektrosound (www.elektrosound.cz). Výrobu provádí fotocestou. Celá elektronická část tj. zdroj a zesilovače je umístěn na jedné DPS z materiálu FR4 (skelný laminát plněný epoxidovou pryskyřicí) o rozměrech $85\times 85\text{mm}$, spoje jsou jednostranné. Vodivé cesty jsou široké $0,5\text{mm}$, izolace od rozlité mědi $0,3\text{mm}$. Rozmístění součástek a spojů je zřejmé z obrázku 2.10, na obrázku 2.11 je potom vidět celkový pohled na otevřený měřicí přípravek. V příloze C je zobrazena fotomatrice pro výrobu této desky.



Obr. 2.10 DPS pro zdroj a zesilovače



Obr. 2.11 Celkový pohled na box měření

Zařízení je napájeno dvoužilovým vodičem o průřezu 1mm^2 z běžné sítě 230V 50Hz. Jištění proti zkratu je provedeno tavnou skleněnou pojistkou umístěnou před transformátorkem, na straně sítě. Jedná se o rychlou pojistku (pro elektroniku) F (5x20mm) 0,125A, 250V v šroubovém pouzdru. Z pohledu bezpečnosti se jedná o zařízení třídy ochrany II - tzn. není vyveden ochranný vodič, a veškeré nebezpečné živé i neživé části jsou uvnitř plastového krytu, takže nejsou běžně přístupné dotyku.

2.4 Cenová kalkulace

Rozdělení nákladů na jednotlivá zařízení je uvedeno v příloze D, kde je uvedena tabulka s použitými součástkami a jejich cenami. Z ní je zřejmé, že celkové náklady na součástky pro měření proudu jsou ve výši 485 Kč. V kapitole 2.3.1 bylo zmíněno, že ceny analogových panelových voltmetrů se pohybují od 685Kč do 1300Kč, z čehož vyplývá, že v porovnání s klasickými přístroji lze dosáhnout úspory finančních nákladů 30 až 63%. Dále je zřejmé, že mezi nejdražší položky, které tvoří celkovou cenu, patří transformátor (76 Kč), čidlo proudu LEM (95 Kč) a výroba DPS (74 Kč). V ceně nejsou zahrnuty některé položky jako například přístrojová krabice, průchodky, spojovací materiál, které byly částečně použity z jiného zařízení.

2.5 Závěr

Voltmetry pro měření sdruženého napětí společně s předřadníky připájenými na cuprexitové destičce byly umístěny do vyvrtaných otvorů na čelní části přístrojového boxu (obr. 2.11) a jejich správná funkce byla ověřena srovnáním naměřených hodnot s elektromagnetickým voltmetrem tř. př. 1,5.

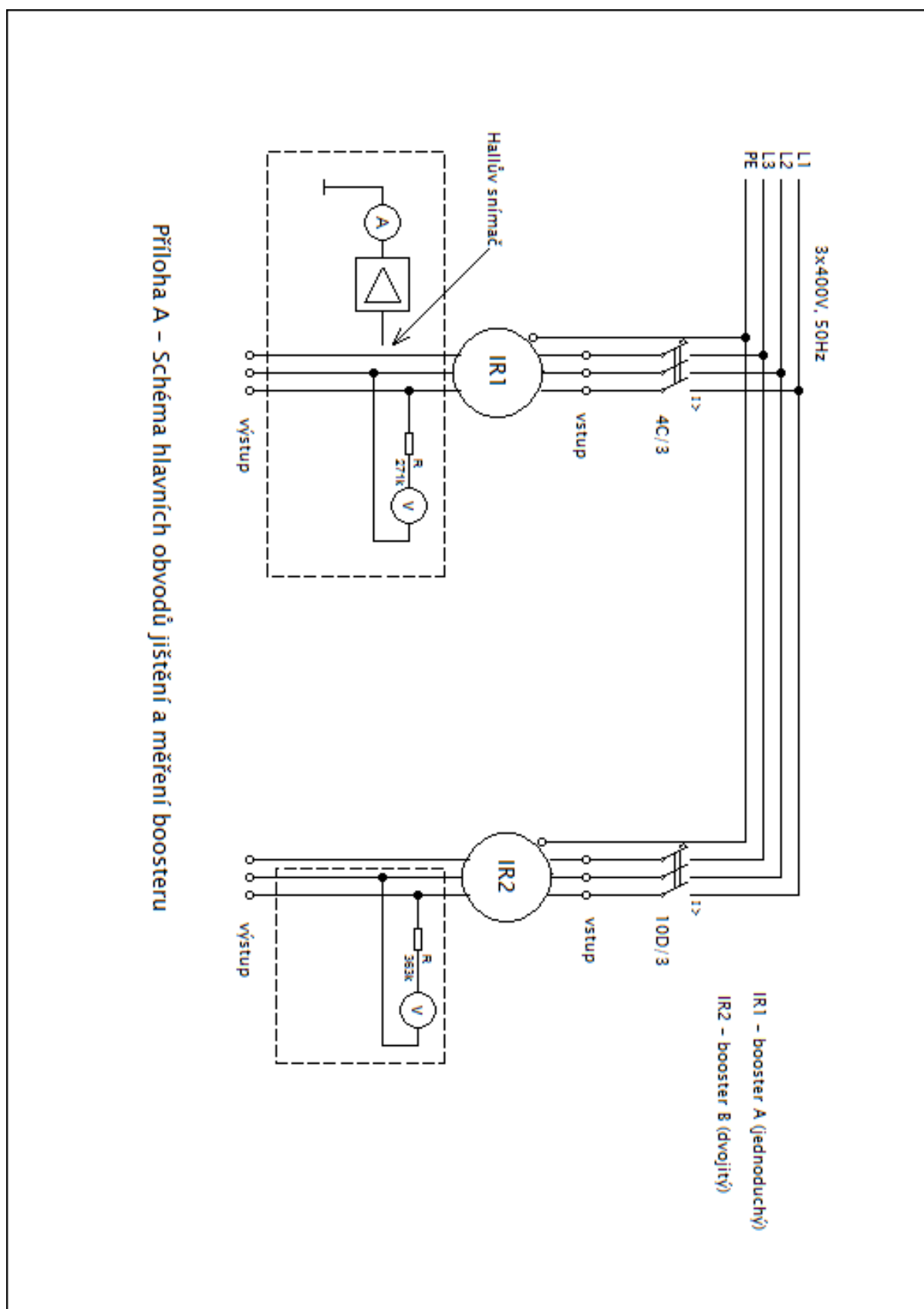
Obvod elektroniky pro měření proudu byl zkušebně sestaven na nepájivém poli a v laboratoři na něm byly osciloskopem změřeny průběhy napětí v důležitých uzlech. Výstupní napětí z čidla proudu bylo nahrazeno sinusovým průběhem ze signálového generátoru. Změřené průběhy odpovídali předpokládaným (obr. 2.7 a 2.8), čímž se ověřila principiální funkčnost navrženého schéma. Pro přesné nastavení ampérmetru při definitivním umístění čidla proudu je určen trimr, kterým se nastaví požadované zesílení OZ.

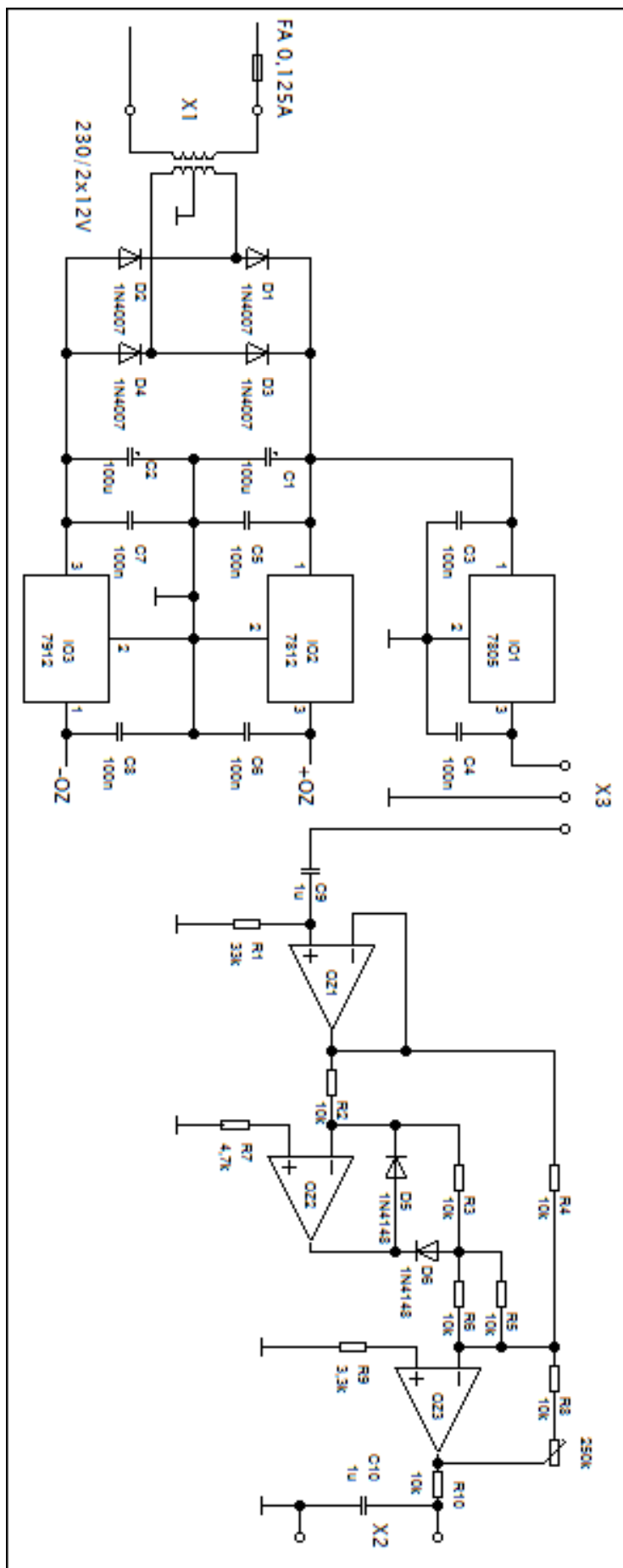
Dá se říci, že měření pomocí Hallovy sondy LEM FHS 40-P má řadu výhod. Patří mezi ně finanční úspora, jak je již zmíněno v kapitole 2.4, galvanické oddělení měřeného a měřicího obvodu, což je výhodné z hlediska bezpečnosti, je možné analogový signál z čidla převádět na číslicový a dále zpracovávat na počítači, případně ho například odesílat do nadřazeného řídicího systému. Zároveň je s ním však spojena citlivost na rušivá elektromagnetická pole. Pro přesná měření je nutné při návrhu obvodu a DPS brát zřetel na elektromagnetickou kompatibilitu. Zvláště při měření menších proudů (tedy i malých magnetických polí) může vlivem velké citlivosti čidla docházet k rušení signálu od okolních zařízení, a ten po dalším zpracování může dávat nesmyslné výsledky. Také je nutné zajistit stabilní a co nejtěsnější polohu čidla vůči měřenému vodiči, tak, aby nedocházelo ke zkreslení průběhu signálu. Z tohoto pohledu je ideální řešení, které uvádí přímo výrobce čidla [7], totiž vytvoření DPS kde je vodivá cesta měřeného proudu umístěna přímo na DPS pod (nebo nad) čidlem a je vyvedena na svorkovnice, ke kterým jsou připojeny přívodní vodiče. Toto řešení je však náročnější na výrobu a není realizovatelné tam, kde není možné přerušit měřený obvod. Další nepřesnosti měření vnáší do řetězce ostatní elektronické součástky, především zesilovače a jejich parazitní vlastnosti (offset, drift, šum).

I přes určitou složitost elektronických obvodů a náročnost na potlačení jejich rušení je zřejmé, že jejich využití i v oblasti měření stále roste. Jejich výhodou je klesající cena elektronických součástek (díky možnosti velkosériové výroby) a modularita, která umožňuje sestavovat univerzálnější zařízení dle přání zákazníka, aniž by se výrazně prodloužil a prodražil jejich vývoj.

Použitá literatura

- [1] Bartoš, V., Skala, B.: *Měření na elektrických strojích*, Plzeň: ZČU, 2002.
- [2] Bašta, J.; Chládek, J.; Mayer, I.: *Teorie elektrických strojů*, Praha: SNTL, 1968.
- [3] Hruškovič, L.: *Elektrické stroje*, Bratislava: Slovenská technická univerzita, 1999.
- [4] Punčochář, J.: *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vydání. Praha: BEN, 2002.
- [5] Palík, F. a kol.: *Jednofázová elektrická lokomotiva S 489.0*, Praha: NADAS, 1969.
- [6] TES [online]. *Katalog výrobků firmy TES*. [cit 5. 3. 2012] dostupné z:
<http://www.tes.cz>
- [7] LEM [online]. *Dokumentace k výrobkům firmy LEM*. [cit 5. 3. 2012] dostupné z:
<http://www.lem.com>



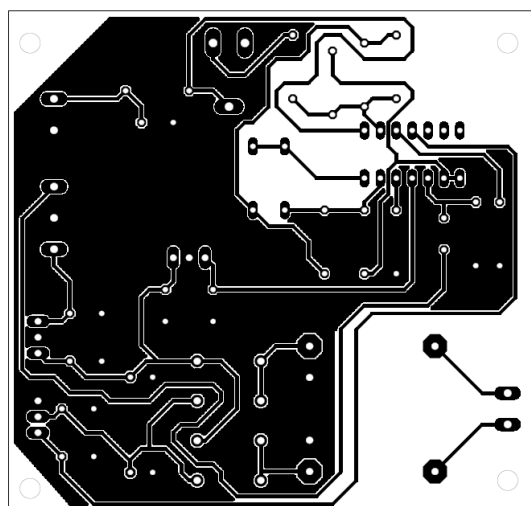


Příloha B – Schéma slaboproudých obvodů (zesilovače a napájecí zdroj)

Příloha C – matrice pro výrobu DPS



Zvětšená matrice pro čidlo proudu (poskytla KEV)



Matrice pro zesilovače a napájecí zdroj (85x85mm)

Příloha D – seznam použitých součástek

součástka	počet kusů	cena za kus (Kč)	celková cena s DPH (Kč)
JIŠTĚNÍ			
jistič OEZ Letohrad LPN, C4/3, I _k =10kA	1	604	604
jistič Moeller PL7, D10/3/, I _k =10kA	1	659	659

MĚŘICÍ PŘÍSTROJE			
voltmetr Faithful FB460, AC100V, tř. př. 2,5	1	145	145
voltmetr MP 45, DC10V, tř. př. 2,5	1	110	110

ELEKTRONICKÉ SOUČÁSTKY			
El trafo HAHN do DPS 230/2x12V, 1,9VA,	1	76	76
pojistka F 0,125A/250V, 5x20mm	1	4	4
pojistkový držák PTF5030, 5x20mm	1	11	11
dioda 1N4007, 1A/1000V	4	1	4
dioda 1N4148, 0,2A/75V	2	1	2
elektrolyt. kond. 100uF/50V	2	2	4
keramický kond. 100nF/63V	6	1	6
keramický kond. 1uF/50V	2	5	10
operační zesilovač LM 324, +-16V, DIP14	1	6	6
rezistor pokovený 0,5W, 4,7kΩ	1	2	2
rezistor pokovený 0,5W, 3,3kΩ	1	2	2
rezistor pokovený 0,5W, 33kΩ	1	2	2
rezistor pokovený 0,5W, 10kΩ	6	2	12
rezistor pokovený 0,5W, 330Ω	1	2	2
trimr lineární horizont. PT10, 250kΩ, 0,1W	1	6	6
uhlíkový rezistor, 1W, 220kΩ	1	4	4
uhlíkový rezistor, 1W, 47kΩ	1	4	4
uhlíkový rezistor, 1W, 3,3kΩ	1	4	4
uhlíkový rezistor, 1W, 330kΩ	1	4	4
uhlíkový rezistor, 1W, 33kΩ	1	4	4
stabilizátor napětí 7812, +12V, 1A	1	9	9
stabilizátor napětí 7912, -12V, 1A	1	16	16
stabilizátor napětí 7805, +5V, 1A	1	8	8
svorkovnička do DPS 3pólová	1	6	6
svorkovnička do DPS 2pólová	2	3	6
snímač LEM FHS 40-P/SP600	1	95	95
výroba DPS 85x85mm	1	74	74
distanční sloupek šestihran, M3, 15mm	3	4	12
celkem (za jednu sestavu bez voltmetru)			375
celkem (za jednu sestavu s voltmetrem)			485