

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh a realizace modelu filtračně-kompenzačního zařízení

Bc. Vojtěch Zatloukal

Diplomová práce

2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch Zatloukal**
Osobní číslo: **D17421**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**
Název tématu: **Návrh a realizace modelu filtračně-kompenzačního zařízení**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

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

- 1) Seznamte se s technologií filtračně-kompenzačních zařízení používaných na síti SŽDC
- 2) Navrhněte model filtračně-kompenzačního zařízení vhodný pro spolupráci se zařízením laboratoří KEEZ po stránce mechanické konstrukce, elektrického provedení a řídicího softwaru
- 3) Zrealizujte model filtračně-kompenzačního zařízení po stránce mechanické konstrukce, elektrického provedení a řídicího softwaru
- 4) Oživte model filtračně-kompenzačního zařízení v laboratoři a proměřte jeho parametry

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- 1) Hlava, K., Šedivý, P.: **Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení, skriptum UPce - DfJP - KEEZ, Pardubice, 2004**
- 2) Heřman, J., Hurych, A., Vaníček, J., Durych, V.: **Fázově a cyklově řízené polovodičové spínače, SNTL, Praha, 1977**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Sýkora

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **25. února 2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**



doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

L.S.



Ing. Dušan Čermák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 12. března 2019

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato diplomová práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

Poděkování

Děkuji panu Ing. Petru Sýkorovi za odborné vedení, pomoc, cenné připomínky a rady při vedení této diplomové práce. Také mu velice děkuji za osobní přístup a čas, který mi věnoval. Dále bych rád poděkoval Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě za poskytnutí prostor, materiálu a vybavení nutného pro realizaci této práce.

Anotace

Diplomová práce se zabývá rozбором funkce filtračně-kompenzačního zařízení (FKZ) používaného u SŽDC. Dále řeší implementaci FKZ do laboratorních podmínek, výpočty veličin potřebných k určení hodnot prvků FKZ a samotný výpočet prvků FKZ. V další části je proveden výběr vhodných komponent k sestrojení modelu FKZ. Následuje návrh obvodů řídicí jednotky a silového zapojení celého zařízení. V další kapitole je proveden rozbor fázového řízení a návrh řídicího softwaru. Předposlední kapitola popisuje návrh mechanické konstrukce zařízení a nakonec jsou popsány laboratorní zkoušky a zjištěné výsledky.

Klíčová slova

FKZ, laboratoř, výpočty, měření, kompenzace, vzduchové cívky, fázové řízení, triak

Title

Project and realization of filtration and compensation device

Annotation

The diploma thesis deals with the analysis of the function of the filter-compensating device (FKZ) used by SŽDC. Next, it does the implementation of FKZ into laboratory conditions, calculations of values needed to determine the values of FKZ elements and the calculation of FKZ elements. In the next section is done a selection of components for the construction of model FKZ. Then follows the circuit design of the control unit and the power connection of the device. The next chapter analyzes the phase control and design of control software. The last part describes the mechanical design of the device and finally the laboratory tests and the results.

Keywords

FKZ, laboratory, calculations, measurement, compensation, air coils, phase control, triac

Obsah

Obsah.....	7
Úvod.....	10
1 Filtračně-kompenzační zařízení FKZ.....	12
1.1 Uspořádání funkčních bloků FKZ.....	12
2 Výpočet parametrů modelu FKZ.....	14
2.1 Výpočet kompenzačního výkonu.....	14
2.2 Výpočet náhradní reaktance transformátoru.....	15
2.3 Výpočet celkové kompenzační kapacity.....	16
2.4 Výpočet dekompenzační indukčnosti.....	17
2.5 Výpočet filtračních LC větví vzhledem k frekvenci HDO.....	18
2.6 Výpočet filtrační větve 7. harmonické.....	21
3 Výběr komponent.....	22
3.1 Výběr kondenzátorů.....	22
3.1.1 Přepočítání celkového kompenzačního výkonu.....	24
3.2 Výběr tlumivek.....	25
3.2.1 Přesný dopočet tlumivek LC větví.....	25
3.2.2 Přesný dopočet dekompenzační indukčnosti.....	26
3.2.3 Proudové dimenzování tlumivek LC větví.....	26
3.2.4 Proudové dimenzování dekompenzační indukčnosti.....	27
3.3 Výpočet návrhu vzduchové cívky.....	28
3.3.1 Výpočet jednovrstvé vzduchové cívky.....	28
3.3.2 Výpočet vícevrstvé vzduchové cívky.....	29
4 Návrh elektrického zapojení.....	32
4.1 Zapojení silových obvodů.....	32
4.2 Zapojení řídicích obvodů.....	34
4.2.1 Napájecí obvody.....	34

4.2.2	Obvod pro předzpracování napěťového signálu.....	36
4.2.3	Obvod pro předzpracování proudového signálu.....	37
4.2.4	Volba automatického/ručního režimu řízení	40
4.2.5	Ovládání ručního řízení	40
4.2.6	Obvody pro řízení výkonového triaku.....	41
4.3	Návrh DPS řídicí jednotky	42
5	Návrh řídicího softwaru.....	43
5.1	Teoretický návrh řídicího softwaru	43
5.1.1	Princip fázového řízení.....	43
5.1.2	Řídicí algoritmus	44
5.2	Programátorská příručka	47
5.2.1	Popis programu.....	48
6	Návrh mechanické konstrukce	49
6.1	Návrh a popis čelního panelu.....	49
6.2	Návrh a popis zadního panelu	51
6.3	Pohled na zhotovený model FKZ.....	52
7	Laboratorní zkoušky modelu FKZ	54
7.1	Měření parametrů kompenzačních větví modelu FKZ	54
7.2	Měření vlivu dekompenzační indukčnosti	55
7.2.1	Chování indukčnosti (Ldek) při fázovém řízení.....	57
7.2.2	Vliv nesinusového odběru Ldek na celkový odebíraný proud	60
7.3	Ověření funkce modelu FKZ	62
7.3.1	Regulace pohonu pulzním měničem napětí bez připojeného modelu FKZ	63
7.3.2	Regulace pohonu pulzním měničem napětí s připojeným modelem FKZ – bez dekompenzační větve	64
7.3.3	Regulace pohonu pulzním měničem napětí s připojeným modelem FKZ – s dekompenzační větví.....	65
7.3.4	Porovnání naměřených údajů	66

Závěr.....	72
Seznamy	74
Seznam použité literatury	74
Seznam obrázků	75
Seznam rovnic	77
Seznam tabulek.....	78
Seznam příloh.....	79
Přílohy	80

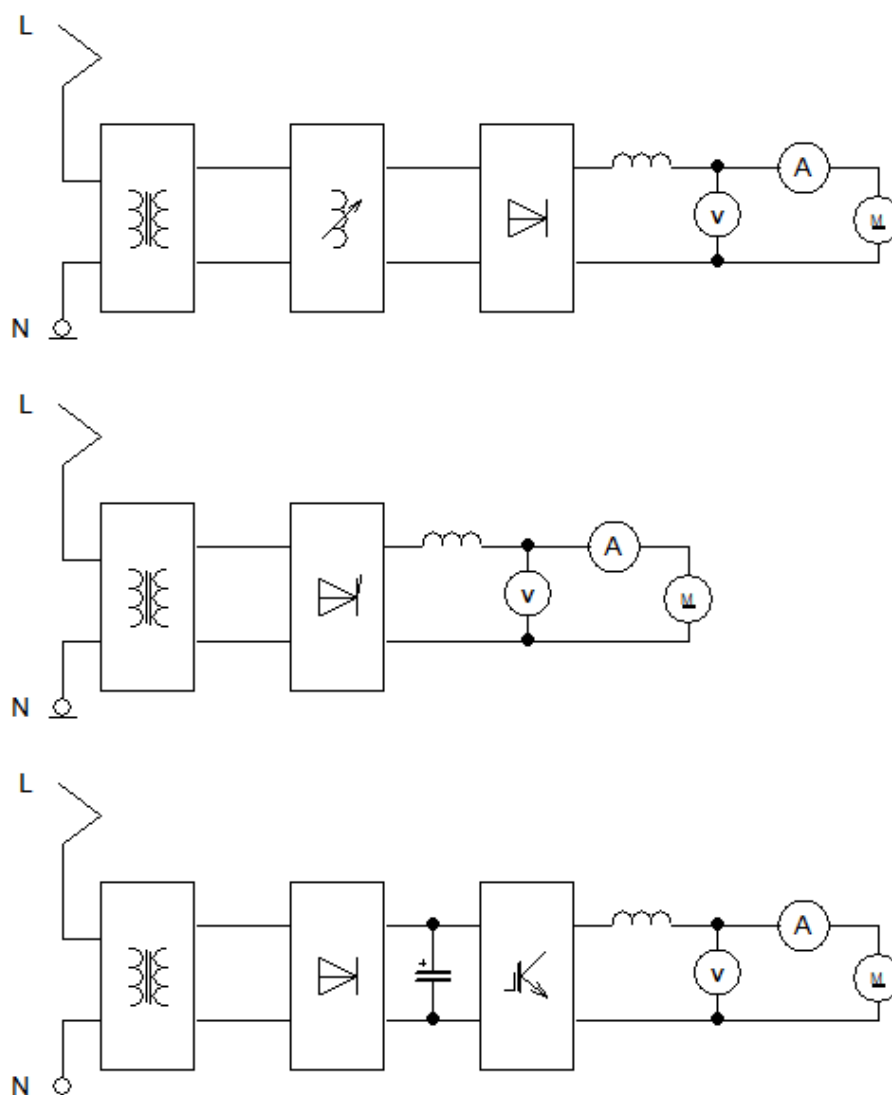
Úvod

Potřeba návrhu modelu filtračně-kompenzačního zařízení (FKZ) vznikla na základě provádění laboratorního měření v rámci výuky předmětu Elektromagnetická kompatibilita v kolejové dopravě. Náplní tohoto měření je zkoumání zpětných vlivů vybraných modelů vozidel střídavé trakce na napájecí síť. V měření se sledovaly vyšší harmonické proudy, způsobené různými druhy regulace, ale také odebíraný činný výkon a účinník.

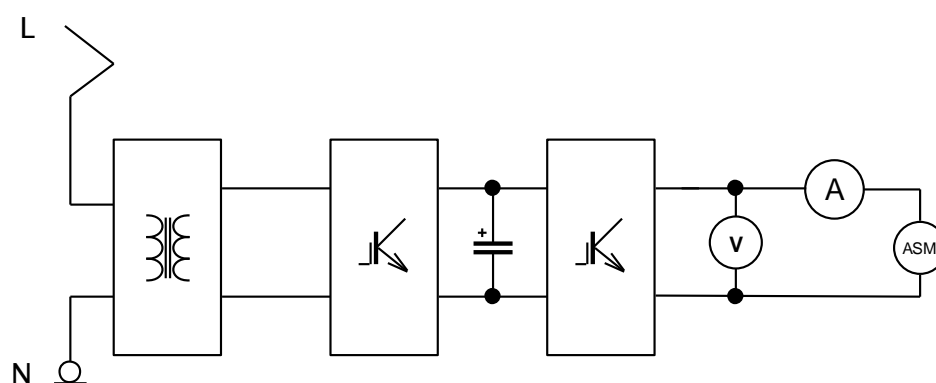
Pro sledování byly vybrány modely vozidel, které dopravci v České republice nejčastěji používají. Jedná se o vozidla s odbočkovou regulací, vozidla s tyristorovou regulací a vozidla s pulzním měničem napětí. Principiální zapojení těchto vozidel je na obrázku 1.

Problémy, které tato vozidla v napájecí síti způsobují, jsou již dávno známé. Taktéž je již řadu let v praxi provozováno zařízení, které tyto problémy řeší a částečně nebo úplně odstraňuje. Aby tedy bylo demonstrativní měření prováděné v rámci výuky kompletní jak z hlediska způsobených problémů těchto typů regulací, tak z hlediska jejich odstranění, bylo dohodnuto, že se postaví model FKZ uzpůsobený do laboratorních podmínek.

Dnešní moderní vozidla jsou schopna odebírat i rekuperovat s účinníkem velmi blízkým 1. Této vlastnosti je dosaženo řízeným tranzistorovým usměřňovačem a frekvenčním měničem, který napájí asynchronní motor. Blokové schéma takového vozidla je na obrázku 2. Až tedy dojde k modernizaci vozového parku dopravců a nebudou již provozovány vozidla s výše zmíněnými typy regulací, nebude již zařízení FKZ potřebné.



Obrázek 1: Principiální zapojení vybraných modelů vozidel střídavé trakce s odbočkovou regulací, tyristorovou regulací a pulzním měničem napětí



Obrázek 2: Principiální zapojení moderního vozidla střídavé trakce

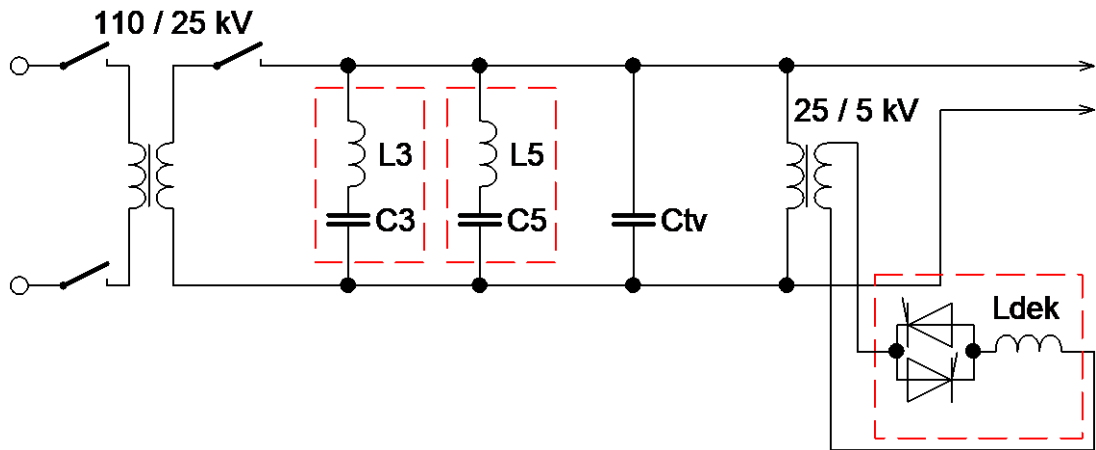
1 Filtračně-kompenzační zařízení FKZ

Požadavky kladené na zařízení: (Hlava, Šedivý, 2004, str. 61)

- vykompenzovat induktivní jalový výkon odebíraný vozidly na hodnotu $\cos(\varphi) = 0,95 - 0,98$ (v místě připojení k distribuční síti)
- udržet účinník v induktivní oblasti v době, kdy není trakční odběr
- omezit vyšší napěťové harmonické (především 3. a 5.) v místě připojení k distribuční síti
- dodržení minimální vstupní impedance trakční napájecí stanice na frekvenci HDO (hromadného dálkového ovládání)

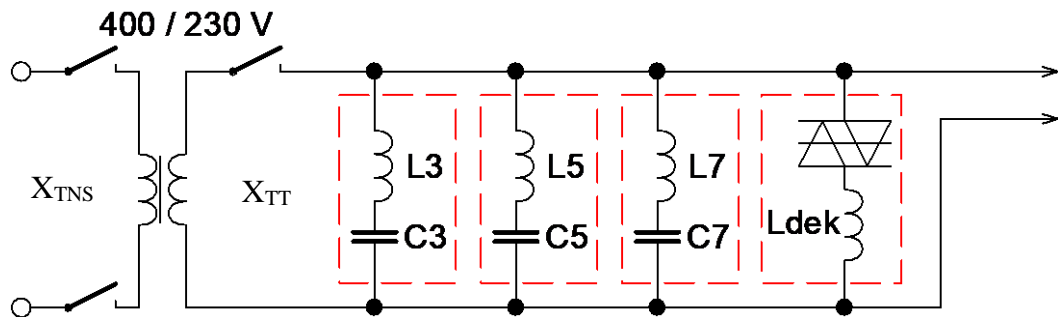
1.1 Uspořádání funkčních bloků FKZ

Filtračně-kompenzační zařízení je složeno z několika funkčních bloků, tak zvaných větví. Každá větev nebo jejich kombinace plní nějaký z předešlých bodů. Principiální schéma FKZ používaného u SŽDC je na obrázku 3. Možné provedení skutečného zařízení FKZ je k vidění na fotografiích v přílohách A a B. Větve tvořené sériovou LC kombinací slouží k filtraci vyšších harmonických a samotné kapacity C_3 a C_5 slouží ke kompenzaci induktivního jalového výkonu. V zařízení ještě obvykle bývá ponechán prostor pro instalaci větve pro filtraci sedmé harmonické, ta by byla tvořena prvky C_7 a L_7 . Aby bylo docíleno celkové potřebné kompenzační kapacity a umožněno připojení na tak vysoké napětí, jsou ve skutečnosti prvky C_3 a C_5 tvořeny sérioparalelními kombinacemi kondenzátorů s příslušnými balančními obvody, hlídajícími rozdělení napětí na jednotlivé kondenzátory. Tyto dvě LC větve jsou ještě vůči sobě naladěny tak, aby dosahovaly vysoké impedance na ovládacím kmitočtu HDO. Aby byl účinník udržen v induktivní oblasti i v době, kdy není odběr, je zde ještě tzv. dekompenzační tlumivka. Její induktivní výkon je dle trakčního odběru regulován tyristory. Tyristory jsou řazeny antiparalelně, aby šlo napětí řídit jak v kladné, tak záporné půlplně. Z důvodu vysokého napětí, na kterém jsou tyristory provozovány, je jich řazeno více v sérii. I přes to musela být dříve regulace prováděna na nižším napětí a to 5 kV. S dnes vyráběnými polovodičovými prvky je regulace dekompenzační větve realizována přímo na hladině 25 kV, avšak v době vzniku zařízení to možné nebylo. Člen C_{TV} ve schématu znázorněn kondenzátorem představuje kapacitu trolejového vedení, v zařízení jako takovém se tedy žádný takovýto prvek nenachází.



Obrázek 3: Principiální schéma FKZ používaného SŽDC

Koncepce modelu FKZ, navrhovaného v této práci, je na obrázku 4. Podstatný rozdíl oproti zapojení používaného u SŽDC je v hladině napětí, na které je celé zařízení provozováno. Díky tomu lze dekompensační větev řídit triakem, místo antiparalelní kombinace tyristorů, a také není potřeba vytvářet sérioparalelní kombinace z kondenzátorů. Zároveň se zde neuvažuje kapacita trolejového vedení. Tyto odlišnosti se budou muset při návrhu zohlednit.



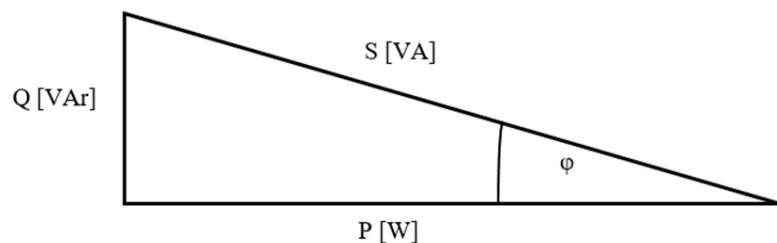
Obrázek 4: Principiální schéma modelu FKZ navrženého v této práci

2 Výpočet parametrů modelu FKZ

Tato kapitola je věnována výpočtům veličin, které jsou nutné k určení jednotlivých komponent filtračně-kompenzačního zařízení. Výpočty zároveň zohledňují požadovanou vstupní impedanci trakční napájecí stanice jako celku na kmitočtu HDO.

2.1 Výpočet kompenzačního výkonu

Jedním z prvních parametrů, který je potřeba při návrhu modelu FKZ stanovit, je kompenzační výkon, tedy celkový kapacitní výkon všech kapacit v obvodu sekundárního vinutí transformátoru. Pro stanovení tohoto výkonu je potřeba znát odebíraný činný výkon P (či zdánlivý S nebo jalový Q) a účinník první harmonické, tedy $\cos(\varphi)$. Dále je potřeba stanovit požadovanou hodnotu $\cos(\varphi)$, na kterou se má kompenzovat. Vztah těchto veličin znázorňuje obrázek 5.



Obrázek 5: Výkonový trojúhelník

Při laboratorním měření byly naměřeny hodnoty výkonů a účinníků pro různé koncepce řízení stejnosměrných pohonů na střídavé trakci. Byly zkoumány tři koncepce. Odbočková regulace, řízený usměrňovač a pulzní měnič napětí. Z naměřených hodnot vyplývá, že nejvíce jalového výkonu je produkováno při řízení pulzním měničem napětí a při odbočkové regulaci. Naměřené hodnoty z regulace pohonu pulzním měničem jsou uvedeny v příloze D.

Výchozí hodnoty¹ pro výpočet tedy jsou: $P = 3000 \text{ W}$; $\cos(\varphi) = 0,82$; požadovaná hodnota účinníku po kompenzaci $0,98$.

$$\begin{aligned} Q_{komp} &= P \cdot (tg(\varphi_{komp}) - tg(\varphi_{odeb})) = \\ &= 3000 \cdot (tg(\arccos(0,98)) - tg(\arccos(0,82))) = \\ &= \underline{\underline{1484,84 \text{ VAr}}} \end{aligned}$$

Q_{komp} – Kompenzační jalový výkon [VAr]

P – Odebíraný činný výkon [W]

φ_{komp} – Hodnota φ , na kterou se kompenzuje
[°]

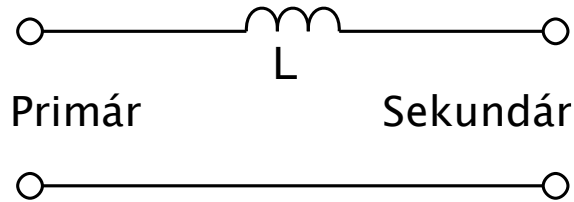
φ_{odeb} – Hodnota φ , se kterou se odebírá [°]

Rovnice 1: Výpočet hodnoty kompenzačního výkonu

¹ Protože je snaha do budoucna zajistit pro tato měření výkonnější transformátor, který je v tuto chvíli nejvíce omezujícím článkem měřicího řetězce z hlediska jeho nízkého výkonu, bude model FKZ naddimenzován na kompenzaci větších výkonů.

2.2 Výpočet náhradní reaktance transformátoru

Při výpočtu náhradní reaktance transformátoru se vychází ze zjednodušení náhradního schématu transformátoru, kdy se uplatní pouze podélná indukčnost (Hlava, Šedivý, 2004, str. 12). Zjednodušené náhradní schéma je na obrázku 6.



Obrázek 6: Zjednodušené náhradní schéma transformátoru

Pro výpočet je nutné znát poměrné napětí nakrátko, které udává tvrdost transformátoru. Tento parametr většinou není známý a je potřeba provést měření a následně výpočet dle rovnice 2.

$$u_k = \frac{U_{1-k}}{U_{1-n}} \cdot 100 = \frac{13,3}{400} \cdot 100 = 3,33\%$$

u_k – Poměrné napětí nakrátko [%]

U_{1-k} – Napětí primárního vinutí, při sekundárním vinutí nakrátko, a při jmenovitém proudu transformátoru [V]

U_{1-n} – Napětí primárního vinutí, při sekundárním vinutí naprázdno [V]

Rovnice 2: Výpočet poměrného napětí nakrátko

Náhradní indukčnost se vypočítá dle rovnice 3 (Hlava, Šedivý, 2004, str. 12), výsledná reaktance potom podle rovnice 4. Použitý transformátor je od firmy ZSE Praha, typ JNC 1. Štítkové hodnoty tohoto transformátoru jsou $U_1 = 380$ V, $U_2 = 220$ V, $S = 1000$ VA, viz obrázek 7.



Obrázek 7: Štítek transformátoru

$$L_{TT} = \frac{U_{TT}^2 \cdot u_k}{10 \cdot \pi \cdot p^2 \cdot S_{TT}} = \frac{400^2 \cdot 3,3}{10 \cdot \pi \cdot 0,6^2 \cdot 1000} = 47,04 \text{ H}$$

L_{TT} – Náhradní indukčnost trakčního transformátoru [H]

U_{TT} – Napětí primárního vinutí [V]

u_k – Poměrné napětí nakrátko [%]

p – Převod transformátoru [-]

S_{TT} – Jmenovitý výkon transformátoru [VA]

Rovnice 3: Výpočet náhradní indukčnosti trakčního transformátoru

$$X_{TT} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{TT} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 47,04 = \underline{\underline{14,78 \text{ k}\Omega}}$$

X_{TT} – Náhradní reaktance trakčního transformátoru [Ω]

L_{TT} – Náhradní indukčnost trakčního transformátoru [H]

f – frekvence [Hz]

Rovnice 4: Výpočet náhradní reaktance trakčního transformátoru

2.3 Výpočet celkové kompenzační kapacity

Při výpočtu celkové kompenzační kapacity se vyjde ze základního vztahu 5. Jednoduchým odvozením se potom dostane rovnice 6, ze které se spočítá celková kapacita.

$$Q = \frac{U^2}{X}$$

Q – Jalový výkon [VAr]

U – Napětí [V]

X – Reaktance [Ω]

Rovnice 5: Základní vztah pro výpočet jalového výkonu

$$Q_{komp} = \frac{U^2}{X_{Ckomp}}$$

⇓

$$C_{komp} = \frac{Q_{komp}}{U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1484,84}{230^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = \underline{\underline{89,35 \mu F}}$$

Q_{komp} – Jalový kompenzační výkon [VAr]

U – Napětí [V]

X_{Ckomp} – Reaktance kompenzační kapacity [Ω]

C_{komp} – Kompenzační kapacita [F]

Rovnice 6: Výpočet celkové kompenzační kapacity

2.4 Výpočet dekompenzační indukčnosti

Při výpočtu dekompenzační indukčnosti se vyjde z předpokladu, že dekompenzační indukčnost (induktivní jalový výkon) musí kompenzovat kompenzační kapacitu (kapacitní jalový výkon) a kapacitu trolejového vedení (kapacitní jalový výkon). Kompenzační kapacitní výkon byl vypočítán v oddíle 2.1 *Výpočet kompenzačního výkonu*. Pro určení kapacitního jalového výkonu trolejového vedení se opět vyjde ze základního vztahu 5, z tohoto vztahu se také vyjádří dekompenzační induktivní výkon. Nakonec se sestaví rovnice 7 (Hlava, Šedivý, 2004, str. 70), ze které se vyjádří a vypočítá dekompenzační indukčnost. Kapacita trolejového vedení se však v případě této práce neuvažuje a do vztahu se proto dosadí hodnota 0 μF .

$$Q_{dek} = Q_{komp} + Q_{CTV} \rightarrow \frac{U^2}{\omega \cdot L_{dek}} = Q_{komp} + U^2 \cdot \omega \cdot C_{TV}$$

$$\Downarrow$$

$$L_{dek} = \frac{U^2}{\omega \cdot (Q_{komp} + U^2 \cdot \omega \cdot C_{TV})} = \frac{230^2}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (1484,84 + 230^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0)} = \underline{\underline{113,4 \text{ mH}}}$$

Q_{dek} – Dekompenzační jalový výkon [VAr]

Q_{komp} – Kompenzační jalový výkon [VAr]

Q_{CTV} – Jalový výkon trolejového vedení [VAr]

U – Napětí [V]

L_{dek} – Indukčnost dekompenzační tlumivky [H]

ω – Úhlová frekvence [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] = $2 \cdot \pi \cdot f$

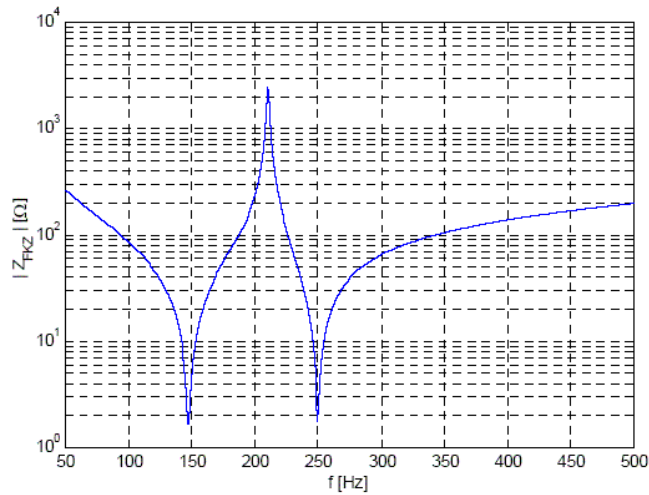
f – frekvence [Hz]

C_{TV} – Kapacita trolejového vedení [F]

Rovnice 7: Výpočet dekompenzační indukčnosti

2.5 Výpočet filtračních LC větví vzhledem k frekvenci HDO

Ačkoliv kompenzační kapacitní jalový výkon byl již spočítán v oddíle 2.1 *Výpočet kompenzačního výkonu*, je ještě potřeba tuto kapacitu rozdělit a dopočítat indukčnosti tak, aby sériová kombinace LC prvků tvořila filtr pro 3. a 5. harmonickou. K tomuto výpočtu by stačilo využít Thomsonova vztahu. Zároveň však tyto prvky ve filtračních větvích musí být napočítány tak, aby vzájemně paralelně rezonovaly na kmitočtu blízkém HDO a tím tvořily vysokou impedanci (pásmovou zadrž) na tomto kmitočtu, viz obrázek 8. Za tímto účelem je potřeba sestavit soustavu dvou lineárních rovnic o dvou neznámých (rovnice 8, 9), z nich poté vyjádřit a vypočítat kapacity C_3 a C_5 . Nakonec se k těmto kapacitám dopočítají hodnoty indukčností, dle již zmíněného Thomsonova vztahu (rovnice 10).



Obrázek 8: Průběh reaktance (impedance) X_{TNS} v závislosti na frekvenci (Filtračně-kompenzační stanice, 2018)

$$C_{komp} = C_3 + C_5$$

C_3 – Kapacita pro 3. harmonickou [F]

C_5 – Kapacita pro 5. harmonickou [F]

C_{komp} – Celková kompenzační kapacita [F]

Rovnice 8: Rovnice celkové kompenzační kapacity

Rovnice 9 (Hlava, Šedivý, 2004, str. 70) udávající celkovou vstupní reaktanci (impedanci) trakční napájecí stanice, uvažuje pouze imaginární členy.

$$X_{TNS_HDO} = X_{TT_HDO} - \frac{1}{\frac{1}{X_{3_HDO}} + \frac{1}{X_{5_HDO}} + \frac{1}{X_{TV_HDO}} + \frac{1}{X_{L_{DEK_HDO}}}}$$

X_{TNS_HDO} – Vstupní reaktance trakční napájecí stanice na frekvenci HDO [Ω]

X_{TT_HDO} – Reaktance trakčního transformátoru na frekvenci HDO [Ω]

X_{3_HDO} – Reaktance LC větve pro 3. harmonickou na frekvenci HDO [Ω]

X_{5_HDO} – Reaktance LC větve pro 5. harmonickou na frekvenci HDO [Ω]

X_{TV_HDO} – Reaktance trolejového vedení na frekvenci HDO [Ω]

$X_{L_{DEK_HDO}}$ – Reaktance dekompenzační tlumivky na frekvenci HDO [Ω]



$$X_{TNS_HDO} = X_{TT} \cdot \frac{f_{HDO}}{50} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{HDO} \cdot \left[\frac{C_3}{1 - \left(\frac{f_{HDO}}{f_3}\right)^2} + \frac{C_5}{1 - \left(\frac{f_{HDO}}{f_5}\right)^2} + C_{TV} - \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_{HDO})^2 \cdot L_{dek}} \right]}$$

X_{TNS_HDO} – Vstupní reaktance trakční napájecí stanice na frekvenci HDO [Ω]

X_{TT} – Reaktance trakčního transformátoru na frekvenci 50 Hz [Ω]

f_{HDO} – Frekvence hromadného dálkového ovládání [Hz]

C_3 – Kapacita kondenzátoru pro 3. harmonickou [F]

f_3 – Frekvence 3. Harmonické [Hz]

C_5 – Kapacita kondenzátoru pro 5. harmonickou [F]

f_5 – Frekvence 5. Harmonické [Hz]

C_{TV} – Kapacita trolejového vedení [F]

L_{dek} – Indukčnost dekompenzační tlumivky [H]

Rovnice 9: Rovnice celkové vstupní reaktance trakční napájecí stanice

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

f – Frekvence [Hz]

L – Indukčnost [H]

C – Kapacita [F]

Rovnice 10: Thomsonův vztah

Po vyjádření členů C_3 a C_5 z rovnice 9, viz skriptu EMC drážních zařízení (Hlava, Šedivý, 2004, str. 71), byly vypočítány hodnoty prvků modelu FKZ, uvedené v tabulce 2, při vstupních parametrech uvedených v tabulce 1.

Tabulka 1: Tabulka vstupních parametrů pro výpočet LC větvi

Hodnoty vypočtené	Hodnoty zadané
$X_{TT} = 14780 \Omega$	$U_{TV} = 230 V$
$Q_{komp} = 1484,84 VAr$	$X_{TNS} = 500 \Omega$
-	$f_3 = 150 Hz$
-	$f_5 = 250 Hz$
-	$f_{HDO} = 216,67 Hz$
-	$C_{TV} = 0 \mu F$

Tabulka 2: Tabulka vypočítaných hodnot prvků LC větvi

Hodnoty kapacit pro 3. a 5. harmonickou	Hodnoty indukčností pro 3. a 5. harmonickou
$C_3 = 64,61 \mu F$	$L_3 = 17,42 mH$
$C_5 = 15,99 \mu F$	$L_5 = 25,35 mH$

2.6 Výpočet filtrační větve 7. harmonické

Při výpočtu kapacit větví 3. a 5. harmonické je automaticky počítáno s možností přidání větve pro 7. harmonickou a taktéž s kapacitou trakčního vedení, která se rovněž uvažuje jako kompenzační prvek. Proto je kapacita 3. a 5. větve menší, než celková potřebná kompenzační kapacita spočítaná v oddíle 2.3 *Výpočet celkové kompenzační kapacity*. Je to z důvodu, aby následným přidáním filtrační větve 7. harmonické nedošlo k překompenzování do kapacitní oblasti. Zároveň to také dává prostor pro kapacitu vedení, která je v řádech jednotek μF a mnohdy ji není možné předem určit.

Protože se kapacita trolejového vedení v případě této práce neuvažuje, dopočítá se kapacita filtru 7. harmonické jako rozdíl celkové kompenzační kapacity a součtu kapacit větví 3. a 5. harmonické (viz rovnice 11). K této kapacitě se poté podle Thomsonova vztahu (rovnice 12) dopočítá potřebná indukčnost.

$$C_7 = C_{komp} - (C_3 + C_5) = 96,52 - (64,61 + 15,99) = \underline{\underline{8,74 \mu\text{F}}}$$

C_{komp} – Kompenzační kapacita [F]
 C_7 – Kapacita větve 7. harmonické [F]
 C_5 – Kapacita větve 5. harmonické [F]
 C_3 – Kapacita větve 3. harmonické [F]

Rovnice 11: Výpočet kapacity větve 7. harmonické

$$L = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \right)^2 \cdot \frac{1}{C}$$

⇓

$$L_7 = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_7} \right)^2 \cdot \frac{1}{C_7} = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 350} \right)^2 \cdot \frac{1}{8,74 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{23,65 \text{ mH}}}$$

f_7 – Frekvence 7. harmonické [Hz]
 L_7 – Indukčnost větve 7. harmonické [H]
 C_7 – Kapacita větve 7. harmonické [F]

Rovnice 12: Thomsonův vztah – vyjádřená indukčnost 7. harmonické

3 Výběr komponent

Přesné hodnoty prvků modelu FKZ byly vypočítány v předchozí kapitole. Nyní je potřeba najít vhodné součástky, které se svými parametry budou co nejvíce blížit těm vypočítaným.

3.1 Výběr kondenzátorů

V tabulce 3 jsou pro přehlednost znovu uvedeny vypočítané kapacity všech tří filtračních větví. Model FKZ bude provozován na napětí 230 V. Je tedy potřeba, aby kondenzátory byly dimenzovány alespoň na dvojnásobné napětí vzhledem k přepětí, které může vzniknout při připojení zařízení a také při rezonančních jevech na vlastní frekvenci.

Tabulka 3: Tabulka vypočítaných kapacit filtračních větví

Vypočtené hodnoty kapacit pro 3., 5. a 7. harmonickou
$C_3 = 64,61 \mu F$
$C_5 = 15,99 \mu F$
$C_7 = 8,74 \mu F$

Na trhu se vyskytují dvě skupiny kondenzátorů, které připadají v úvahu pro použití. Jsou to kondenzátory tzv. kompenzační a motorové.

Kompenzační kondenzátory se používají, jak říká samotný název, na kompenzaci. Tyto kondenzátory jsou určeny pro nepřetržitý provoz, proto mají kvalitní dielektrikum, které zajistí dlouhou životnost. Také mají vlastní odpojovač, který zajistí, že pokud dojde k poškození kondenzátoru (ať už tepelnými účinky nebo přepětím), sám se odstaví od napájení.

Motorové kondenzátory se používají u jednofázových asynchronních motorů. Slouží k vytvoření tzv. pomocné fáze, nutné pro rozběh. Mohou být použity buď pouze pro rozběh, kde dochází k jejich následnému odpojení odstředivým vypínačem, nebo mohou být připojeny trvale. Nemají bezpečnostní odpojovač a dosahují nižší hodnoty provozních hodin než kondenzátory kompenzační. Vzhledem k těmto „horším“ parametrům bývá nižší jejich cena v porovnání s kompenzačními kondenzátory.

Po uvážení zmíněných parametrů, výhod i nevýhod, bylo rozhodnuto, že se použijí kondenzátory motorové. Jmenovitá hodnota napětí vybraných kondenzátorů je 450 V, výrobní tolerance je $\pm 5 \%$. Kapacita pro 3. harmonickou bude tvořena celkem třemi kondenzátory.

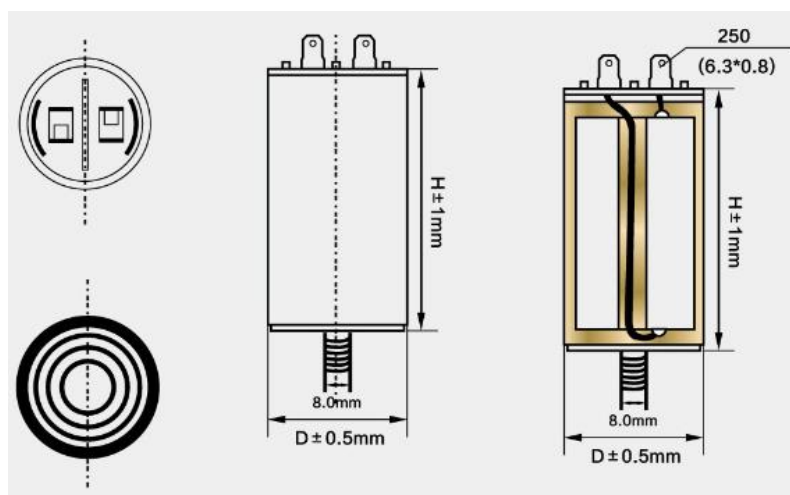
Dvěma s kapacitou 30 μF a jedním s kapacitou 4,5 μF . Pro 5. harmonickou bude tvořena kapacita dvěma kondenzátory s hodnotami 14 μF a 2 μF . Větev 7. harmonické bude složena ze dvou kondenzátorů 4,5 μF . Celkové kapacity jednotlivých větví jsou uvedeny v tabulce 4, vybrané parametry potom v tabulce 5. Provedení kondenzátoru je vyobrazeno na obrázku 9.

Tabulka 4: Tabulka zvolených kapacit filtračních větví

Hodnoty kapacit pro 3., 5. a 7. harmonickou
$C_3 = 64,5 \mu\text{F}$
$C_5 = 16 \mu\text{F}$
$C_7 = 9 \mu\text{F}$

Tabulka 5: Tabulka vybraných parametrů zvolených kondenzátorů (SRPassives)

Kapacita	4,5 μF	16 μF	30 μF
Výrobce	SR Passives	SR Passives	SR Passives
Typ kondenzátoru	polypropylénový	polypropylénový	polypropylénový
Pracovní napětí	450 V / 50 Hz	450 V / 50 Hz	450 V / 50 Hz
Pracovní teplota	- 25 až 70 °C	- 25 až 70 °C	- 25 až 70 °C
Rozměry tělesa	Ø 35 x 60 mm	Ø 40 x 70 mm	Ø 45 x 90 mm
Tolerance	$\pm 5 \%$	$\pm 5 \%$	$\pm 5 \%$
Životnost	3000 h	3000 h	3000 h
Vývody	4 x konektor 6,3mm	4 x konektor 6,3mm	4 x konektor 6,3mm
Upevnění	šroub M8	šroub M8	šroub M8



Obrázek 9: Provedení vybraných kondenzátorů (SRPassives)

3.1.1 Přepoččet celkového kompenzačního výkonu

Nyní je známa celková kapacita (nikoliv však skutečná, vzhledem k výrobní toleranci), výpočtem 13 je provedena kontrola dosahovaného kompenzačního výkonu. Výpočet je proveden pro optimální případ (Q_{komp}) a pro nejhorší případy, tedy kapacita $\pm 5\%$ (Q_{komp_MIN} a Q_{komp_MAX}).

$$Q_{komp} = \frac{U^2}{X_{C_{komp}}} = \frac{U^2}{\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot (C_3 + C_5 + C_7)}} = \frac{230^2}{\frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot (64,5 \cdot 10^{-6} + 16 \cdot 10^{-6} + 9 \cdot 10^{-6})}} = 1487 \text{ VAr}$$

$$Q_{komp_MIN} = \frac{U^2}{\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot (C_3 + C_5 + C_7)}} = \frac{230^2}{\frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot (61,275 \cdot 10^{-6} + 15,2 \cdot 10^{-6} + 8,55 \cdot 10^{-6})}} = 1413 \text{ VAr}$$

$$Q_{komp_MAX} = \frac{U^2}{\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot (C_3 + C_5 + C_7)}} = \frac{230^2}{\frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot (67,725 \cdot 10^{-6} + 16,8 \cdot 10^{-6} + 9,45 \cdot 10^{-6})}} = 1562 \text{ VAr}$$

Q_{komp} – Jalový kompenzační výkon [VAr]

U – Napětí [V]

$X_{C_{komp}}$ – Reaktance kompenzační kapacity [Ω]

C_3 – Kompenzační kapacita větve 3. harmonické [F]

C_5 – Kompenzační kapacita větve 5. harmonické [F]

C_7 – Kompenzační kapacita větve 7. harmonické [F]

Rovnice 13: Přepoččet kompenzačního výkonu dle zvolených kondenzátorů

Výpočet prokázal, že hodnota celkového kompenzačního výkonu se v ideálním případě oproti požadované hodnotě stanovené v oddíle 2.1 *Výpočet kompenzačního výkonu* příliš nezměnila. Pokud se ale vezme v úvahu výrobní tolerance, mohlo by dojít k překompenzování do kapacitní oblasti, což je nepřijatelné. Z tohoto důvodu se při výpočtu kompenzačního výkonu stanovila hodnota $\cos(\varphi)$, na kterou se má kompenzovat na 0,98. Tím je zajištěno, že účinník zůstane vždy v induktivní oblasti.

3.2 Výběr tlumivek

V tabulce 6 jsou pro přehlednost uvedeny vypočítané indukčnosti všech tří filtračních větví. Protože zvolené kapacity neodpovídají přesně těm vypočítaným, je potřeba ještě znovu přepočítat indukčnosti tak, aby byly filtry co nejpřesněji naladěny na frekvence harmonických.

Samozřejmě přesného naladění nemůže být nikdy docíleno, vzhledem k výrobním tolerancím součástek. Ovšem toto přesné ladění není nutnou podmínkou funkce zařízení. I v nejnepříznivějším případě výrobní tolerance bude filtr dosahovat nízké impedance v okolí frekvencí uvažovaných harmonických složek proudu.

Tabulka 6: Tabulka vypočítaných indukčností filtračních větví

Vypočtené hodnoty indukčností pro 3., 5. a 7. harmonickou
$L_3 = 17,42 \text{ mH}$
$L_5 = 25,35 \text{ mH}$
$L_7 = 23,65 \text{ mH}$

3.2.1 Přesný dopočet tlumivek LC větví

Podle zvolených kondenzátorů v oddíle 3.1 *Výběr kondenzátorů* je proveden upřesňující výpočet tlumivek. Výpočet se provede podle Thomsonova vztahu, ze kterého se vyjádří indukčnost a za frekvenci dosadí hodnoty 3., 5. a 7. harmonické. Výpočet viz rovnice 14.

$$L = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \right)^2 \cdot \frac{1}{C}$$

f – Frekvence [Hz]

L – Indukčnost [H]

C – Kapacita [F]

↓

$$L_3 = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_3} \right)^2 \cdot \frac{1}{C_3} = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 150} \right)^2 \cdot \frac{1}{64,5 \cdot 10^{-6}} = 17,45 \text{ mH}$$

$$L_5 = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_5} \right)^2 \cdot \frac{1}{C_5} = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 250} \right)^2 \cdot \frac{1}{16 \cdot 10^{-6}} = 25,33 \text{ mH}$$

$$L_7 = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_7} \right)^2 \cdot \frac{1}{C_7} = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 350} \right)^2 \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^{-6}} = 22,98 \text{ mH}$$

Rovnice 14: Thomsonův vztah – vyjádřená indukčnost

3.2.2 Přesný dopočet dekompenzační indukčnosti

Hodnota dekompenzační indukčnosti se přepočítá dle již uvedeného vztahu. Výpočet ukazuje rovnice 15.

$$L_{dek} = \frac{U^2}{\omega \cdot (Q_{komp} + U^2 \cdot \omega \cdot C_{TV})} = \frac{230^2}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (1487 + 230^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0)} = \underline{\underline{113,24 \text{ mH}}}$$

Rovnice 15: Přepočet dekompenzační indukčnosti

Vypočítané hodnoty indukčností jsou příliš vzdáleny od konvenčně vyráběných hodnot. Bylo by tedy nutné řadit vždy více cívek do série, což ovšem není příliš vhodné. Zbytečně by narůstal ohmický odpor, kapacita přívodů a další parazitní veličiny, které jsou u cívek nežádoucí. To platí i ohledně dekompenzační indukčnosti.

Nezbývá tedy nic jiného, než nechat vyrobit cívky „na míru“, tedy přímo o vypočítaných hodnotách indukčností.

3.2.3 Proudové dimenzování tlumivek LC větvi

Dalším důležitým parametrem cívek je maximální hodnota proudu, kterou vinutí snese, aniž by došlo k tepelnému poškození izolace. Při proudovém dimenzování lze teoreticky vycházet z amplitudového zákona, který je definován vztahem 16.

$$I_n = \frac{100}{n} \rightarrow \begin{aligned} I_3 &= \frac{100}{3} = 33,3\% & I_n &- \text{Zastoupení } n\text{-té harmonické proudu } [\%] \\ I_5 &= \frac{100}{5} = 20\% & n &- \text{Řád harmonické} \\ I_7 &= \frac{100}{7} = 14,3\% & I_3 &- \text{Zastoupení 3. harmonické proudu } [\%] \\ & & I_5 &- \text{Zastoupení 5. harmonické proudu } [\%] \\ & & I_7 &- \text{Zastoupení 7. harmonické proudu } [\%] \end{aligned}$$

Rovnice 16: Amplitudový zákon

Z výpočtu plyne, že pokud proud první harmonické dosahuje hodnoty 10 A (na sekundární straně transformátoru), proud 3. harmonické by měl dosahovat maximálně hodnoty 3,33 A, proud 5. harmonické maximálně 2 A a proud 7. harmonické maximálně 1,43 A.

Ovšem z naměřených hodnot (viz příloha D) je patrné, že 3. harmonická dosahuje až 75 %, 5. harmonická až 62 % a 7. harmonická až 44 %. Jako nejhorší případ vychází situace, kdy je odebírán ze sekundárního vinutí proud 9 A. Zde dosahují harmonické 65 %, 25,5 % a 5 %, tomu odpovídající proudy lze vyčíst v příloze D. Odvozené hodnoty proudu, na které

je potřeba jednotlivé větve dimenzovat, jsou určeny jako kombinace Amplitudového zákona a naměřených hodnot (je zvolena vyšší hodnota proudu).

3.2.4 Proudové dimenzování dekompenzační indukčnosti

Při proudovém dimenzování dekompenzační indukčnosti se vyjde z požadovaného lépe řečeno z celkového kompenzačního výkonu stanoveného v oddíle 3.1.1 *Přepočet celkového kompenzačního výkonu*. Výpočet se provede dle upraveného vztahu pro výpočet výkonu, viz rovnice 17.

$$I_{dek} = \frac{Q_{komp}}{U} = \frac{1487}{230} = \underline{\underline{6,47 A}}$$

I_{dek} – Proud dekompenzační tlumivkou [A]

Q_{komp} – Jalový kompenzační výkon [VAr]

U – Napětí [V]

Rovnice 17: Proudové dimenzování dekompenzační indukčnosti

V tabulce 7 jsou uvedeny konečné hodnoty indukčností a jejich proudové dimenzování.

Tabulka 7: Tabulka vypočítaných indukčností a jejich proudové dimenzování

Vypočtené hodnoty indukčností a jejich proudové dimenzování	
$L_3 = 17,45 \text{ mH}$	$I_3 = 6 \text{ A}$
$L_5 = 25,33 \text{ mH}$	$I_5 = 2,5 \text{ A}$
$L_7 = 22,98 \text{ mH}$	$I_7 = 2 \text{ A}$
$L_{dek} = 113,24 \text{ mH}$	$I_{dek} = 7 \text{ A}$

3.3 Výpočet návrhu vzduchové cívky

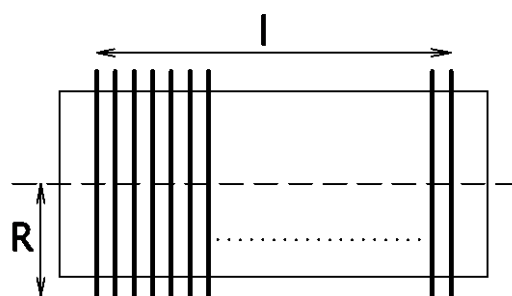
Indukčnosti používané v FKZ bývají realizovány vzduchovými cívkami. Je to z důvodu, aby nedocházelo k přesycení železného jádra a tím ke změně jejich parametrů. Vzduchové cívky však mají několikanásobně větší rozměry než cívky s jádrem a také zpravidla nedosahují takových hodnot indukčnosti.

Pro laboratorní účely však jsou rozměry a hmotnost rozhodující. Pokud mají být cívky umístěny na stole a má-li s nimi být snadno manipulováno, musí mít kompaktní rozměry a přijatelnou hmotnost. Proto je nutné provést orientační výpočet, zda je vůbec reálné navinout vzduchovou cívku o hodnotách vypočítaných v oddílech 2.4 *Výpočet dekompenzační indukčnosti* a 2.5. *Výpočet filtračních LC větví vzhledem k frekvenci HDO*.

Konstrukce vzduchových cívek jak jednovrstvých, tak vícevrstvých je poměrně jednoduchá. Díky tomu vznikly empirické vztahy, které za určitých podmínek umožňují jejich jednoduchý výpočet.

3.3.1 Výpočet jednovrstvé vzduchové cívky

Konstrukce jednovrstvé vzduchové cívky je velice jednoduchá tím, že je tvořena pouze jednou „vrstvou“ závitů drátu. Výpočet parametrů lze provést dle vztahu 18 (JENÍČEK, 2009a, citace podle Radiový Konstruktor č. 1/ 1960, str. 8 a 9). Jako hodnota indukčnosti se dosadí například hodnota indukčnosti pro filtr 3. harmonické, což je 17,45 mH (viz tabulka 7). Za přijatelné rozměry cívky lze považovat průměr 20 cm. Z hlediska jakosti je doporučeno, aby poloměr byl 1,25 násobek délky cívky (JENÍČEK, 2009b, citace podle Amatérského rádia č. 4/ 1959, str. 98). Pokud je tedy uvažován průměr 20 cm, délka bude 7,5 cm.



Obrázek 10: Nákres jednovrstvé vzduchové cívky

$$N = \sqrt{\frac{(25 \cdot l + 23 \cdot R) \cdot L}{R^2}} = \sqrt{\frac{(25 \cdot 7,5 + 23 \cdot 10) \cdot 17450}{10^2}} = 270$$

N – Počet závitů [-]
l – Délka cívky [cm]
R – Poloměr cívky [cm]
L – Indukčnost cívky [μH]

Rovnice 18: Výpočet jednovrstvé vzduchové cívky

Vypočtená hodnota je 270 závitů. Z tohoto čísla však nemusí být na první pohled patrný výsledek, zda lze takovou cívku vyrobit. Rovnice totiž nepočítá s požadovaným průměrem (či průřezem) použitého drátu. Je tedy dobré ještě spočítat, zda se vůbec takový počet závitů o požadovaném průměru vejde do daných rozměrů cívky (viz rovnice 19), případně potřebnou délku drátu.

$$N = \frac{l}{d} = \frac{7,5}{0,1} = 75$$

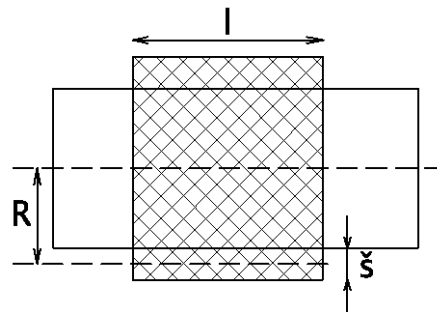
N – Počet závitů [-]
 l – Délka cívky [cm]
 d – Průměr drátu [cm]

Rovnice 19: Ověření výpočtu jednovrstvé cívky vzhledem k výrobě

Z výpočtu je patrné, že pokud je požadován průměr drátu alespoň 1 mm, není možné cívku v požadované konfiguraci vyrobit ani při těsném navíjení závitů vedle sebe. Standardně je mezi jednotlivými závity pro dosažení dobré jakosti mezera rovná průměru drátu (JENÍČEK, 2009b, citace podle Amatérského rádia č. 4/ 1959, str. 98).

3.3.2 Výpočet vícevrstvé vzduchové cívky

Konstrukce vícevrstvé cívky je již o něco složitější, stejně tak i její výpočet. Ovšem opět existuje empirický vzorec 20 (JENÍČEK, 2009a, citace podle Radiový Konstruktor 1/ 1960, str. 8 a 9), kterým lze přibližné parametry cívky vypočítat. Výsledný průměr cívky má být 20 cm, délka 7,5 cm, indukčnost 17,45 mH. Šířka vinutí bude 2 cm.



Obrázek 11: Náčrt vícevrstvé vzduchové cívky

$$N = \sqrt{\frac{(28.l + 19.R + 31.š).L}{R^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(28.7,5 + 19.9 + 31.2).17450}{9^2}} = 309$$

N – Počet závitů [-]
 l – Délka cívky [cm]
 R – Poloměr středního závitů cívky [cm]
 š – Šířka závitů cívky [cm]
 L – Indukčnost cívky [μH]

Rovnice 20: Výpočet vícevrstvé vzduchové cívky

Opět je dobré ověřit si, zda se vypočítaný počet závitů vejde do daných rozměrů cívky (viz rovnice 21).

$$N = \frac{l \cdot \check{s}}{d^2} = \frac{7,5 \cdot 2}{0,1^2} = 1500$$

N – Počet závitů [-]

l – Délka cívky [cm]

š – Šířka závitů cívky [cm]

d – Průměr drátu [cm]

Rovnice 21: Ověření výpočtu vícevrstvé cívky vzhledem k výrobě

Z výpočtu je patrné, že by bylo možné cívku vyrobit a dokonce jít i na menší rozměry a vyšší průřez drátu. Je ale potřeba ještě znát potřebnou délku drátu, který se má navinout. Ta se spočítá podle vzorce 22.

$$l_{\text{dratu}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot N}{100} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 9,308,7}{100} = \underline{\underline{174,54 \text{ m}}}$$

N – Počet závitů [-]

l_{dratu} – Délka drátu [m]

R – Poloměr středního závitu cívky [cm]

Rovnice 22: Výpočet délky navíjeného drátu vícevrstvé cívky

Z výpočtů vyplývá, že k navinutí cívky, pro větev 3. harmonické by bylo potřeba 174,54 m drátu. Pokud by byla snaha obdobným způsobem navrhnout i dekompenzační tlumivku o indukčnosti 113,24 mH, bylo by nutné navinout téměř 445 m drátu. Měď spotřebovaná na výrobu této cívky by poté vážila téměř 4 kg.

Je jasné, že není možné takovéto cívky navíjet ručně, bez patřičné výrobní technologie. Další faktor, který komplikuje provozování takovýchto cívek v laboratoři je hmotnost, jaké by cívky dosahovaly. Ovšem cívky o těchto hodnotách indukčnosti navinuté na železném jádře, budou mít hmotnost velice podobnou.

Bylo tedy osloveno několik výrobců, kteří se výrobou cívek zabývají. Snahou bylo nechat vyrobit cívky (buď vzduchové, nebo i se železným jádrem), které by svými parametry co nejlépe odpovídaly těm vypočteným. Výrobu se však z různých důvodů zajistit nepodařilo. Nakonec tedy bylo rozhodnuto, že se dané indukčnosti poskládají z cívek na železném jádře, které má KEEZ k dispozici. Složení jednotlivých větví ukazuje tabulka 8.

Tabulka 8: Složení indukčností jednotlivých větví

	Tlumivka	Štítková hodnota při 50 Hz [mH]	Tolerance [%]	Celková změřená hodnota na 100 Hz [mH]
L ₃	ELFIS <i>ITS010/2/1</i>	2	-	17,28
	ELFIS <i>ITS006</i>	5	-	
	Neznámá	12	-	
L ₅	5 x ELFIS <i>ITS006</i>	5	-	26,2
	2 x ELFIS <i>ITS010/2/1</i>	2	-	
	Neznámá	4	-	
L ₇	SKYBERGTECH <i>SKYTL4-21</i>	21	20	22,49
	ELFIS <i>ITS010/2/1</i>	2	-	
L _{dek}	SKYBERGTECH <i>SKYTDC10-25</i>	25	20	44,3
	EXIMET TRAFO <i>TLO E 150.66/019</i>	20	-	

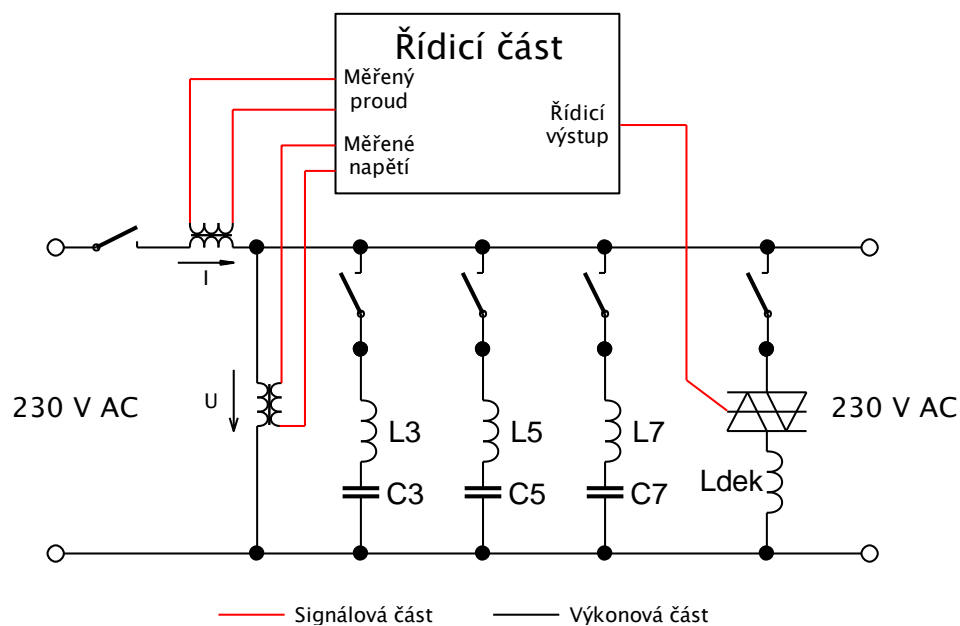
Spojením několika cívek bylo přibližně docíleno požadovaných hodnot indukčností. Ovšem došlo k výraznému zhoršení celkových parametrů cívek, především narostl ohmický odpor a parazitní kapacity. Tyto horší parametry se mohou dále negativně projevit při zapojení filtračních LC větví, například jinými rezonančními frekvencemi.

4 Návrh elektrického zapojení

Kapitola se zabývá silovým zapojením modelu FKZ a návrhem elektrických zapojení řídicí (mikroprocesorové) části. V oddílech 4.1 *Zapojení silových obvodů* a 4.2 *Zapojení řídicích obvodů* jsou uvedena bloková schémata, na jejichž základě jsou poté navržena konkrétní obvodová řešení.

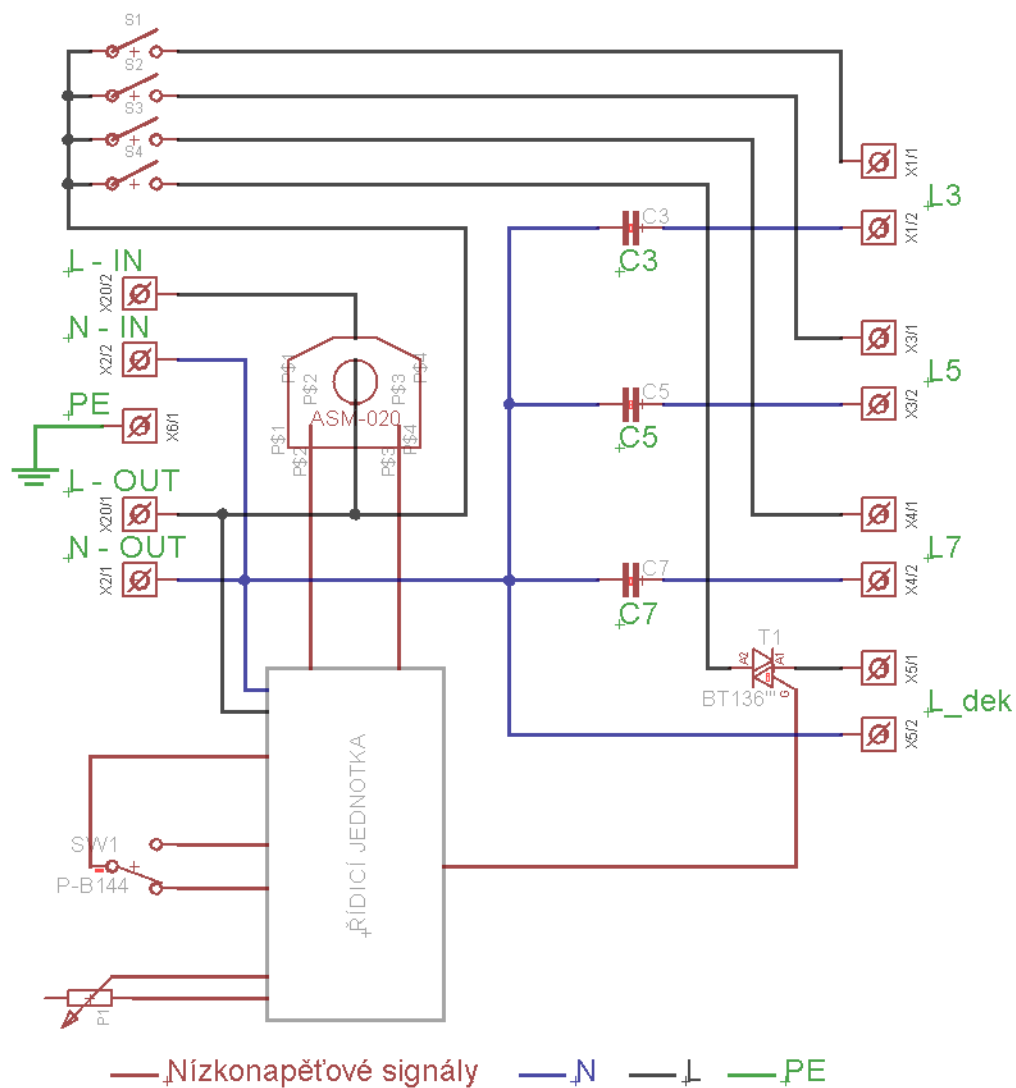
4.1 Zapojení silových obvodů

Z hlediska mechanického provedení výrobku (návrhu šasi, uspořádání čelního/zadního panelu) a navázání řídicí části k silovým obvodům je třeba rozmyslet zapojení celého zařízení. Principiální schéma ukazuje obrázek 12. Každá větev (filtrační/ kompenzační větve a dekompenzační větve) musí být samostatně odpojitelná, na vstupu je umístěn měřicí proudový transformátor a napěťový transformátor, přes který je zajištěna synchronizace řídicí části se sinusovým průběhem napětí sítě.



Obrázek 12: Zapojení silové části

Z důvodu přijatelných rozměrů a hmotnosti výsledného výrobku nejsou tlumivky (L3, L5, L7 a Ldek) součástí zařízení, ale jsou umístěny mimo něj. Jejich připojení je realizováno na zadním panelu, a to přes banánkové konektory. Elektrické zapojení modelu ukazuje obrázek 13.

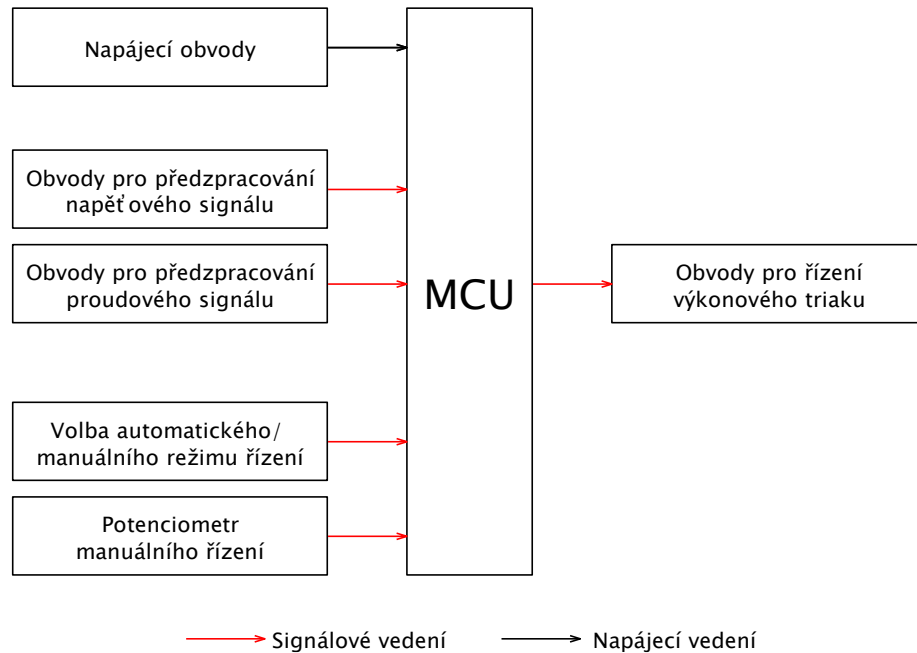


Obrázek 13: Elektrické zapojení modelu FKZ

Levá strana schématu představuje čelní panel. Kompenzační kapacity (ve schématu C3, C5 a C7) jsou umístěny ve střední části výrobku. Svrky pro připojení indukčností jsou umístěny na zadním panelu.

4.2 Zapojení řídicích obvodů

Blokové schéma řídicích obvodů ukazuje obrázek 14. Jako MCU je použit vývojový kit od STMicroelectronics, konkrétně STM32F072B-Discovery. To znamená, že blok MCU jako takový je plně funkční. Obvodová řešení se tedy týkají podpurných obvodů, které zajistí napájení a navázání kitu k silovým obvodům. Dále je třeba doplnit potřebné ovládací prvky.

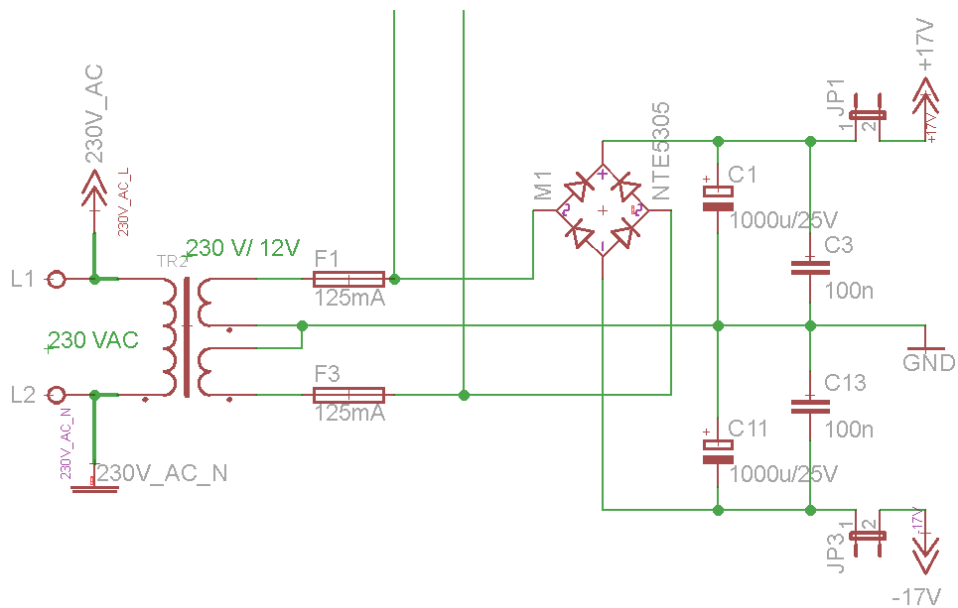


Obrázek 14: Blokové schéma řídicí části

4.2.1 Napájecí obvody

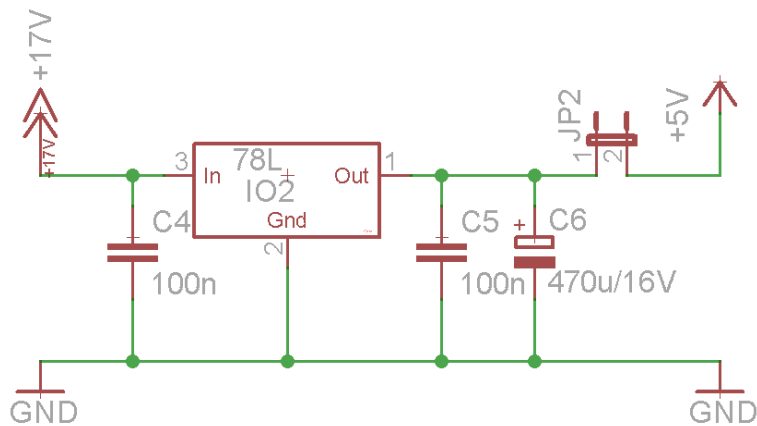
Řídicí část modelu FKZ potřebuje ke své funkci několik napájecích hladin napětí. Kit STM32F072B pro svou funkci potřebuje +5 V. Dále je třeba symetrické napájecí napětí ± 12 V pro operační zesilovač. V zapojeních je ještě používáno napětí +3 V, to je ale vyrobeno zdrojem na vývojovém kitu.

Schéma symetrického napájení je na obrázku 15. Sekundární vinutí transformátoru jsou zapojena do série, čímž je vytvořen střed vinutí s nulovým potenciálem. Následují pojistky dimenzované na jmenovitý proud transformátoru, Graetzův usměrňovací můstek a nakonec filtrační kapacity. Na schématu lze ještě vidět jumpery JP1 a JP2. Ty slouží k bezpečnému oživení napájení.



Obrázek 15: Zapojení symetrického napájení

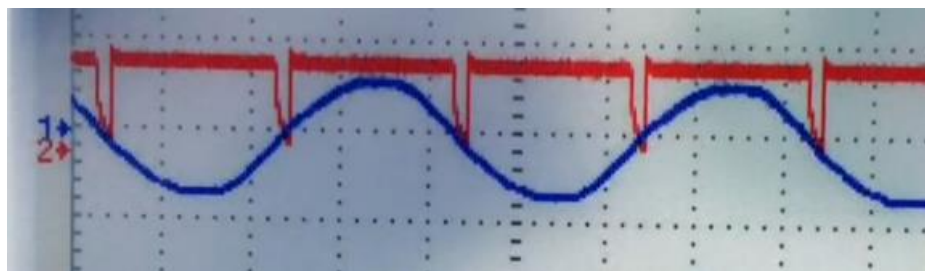
Za filtračními kondenzátory následují napěťové stabilizátory. Jedná se o lineární stabilizátory 78L05, 78L12 a 79L12. Zapojení jednoho ze stabilizátorů je na obrázku 16. Ve schématu se kromě stabilizátoru vyskytují ještě keramické kondenzátory zajišťující jeho stabilitu a elektrolytický kondenzátor, který na výstupu stabilizátoru slouží spolu s keramickým jako filtr (pokrývá impulzní odběr). Ostatní stabilizátory jsou zapojeny obdobným způsobem.



Obrázek 16: Zapojení lineárního stabilizátoru

4.2.2 Obvod pro předzpracování napětí nulou

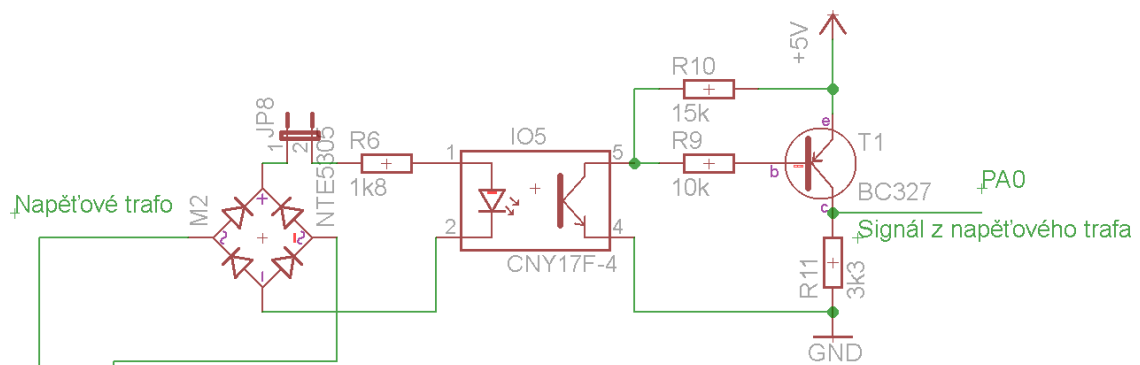
Obvod slouží k detekci průchodu sinusového napájecího napětí nulou (HANKOVEC, David, 2002-2019). Tato synchronizace je nezbytně důležitá pro správnou funkci fázového řízení. Schéma zapojení ukazuje obrázek 18. Střídavý sinusový signál je odebírán ze sekundárního vinutí napájecího transformátoru, následně jde signál na dvoucestný usměrňovač. Usměrněním dojde k vytvoření pulzujícího průběhu napětí, který je přiváděn do optotranzistoru. Ten se následně otvírá „v rytmu“ pulzujícího napětí. Z důvodu nízkého zesílení a výkonového zatížení kolektoru optotranzistoru, je k výstupu připojen klasický tranzistor. Na jeho kolektoru je poté obdélníkový průběh, který je již vhodný pro zpracování mikroprocesorem. Naměřený průběh ukazuje obrázek 17.



CH1 – Sekundární napětí transformátoru CH1 – 20 V/ dílek
CH2 – Průběh na kolektoru tranzistoru CH2 – 5 V/ dílek
Časová základna 5 ms/ dílek

Obrázek 17: Detekce průchodu napájecího napětí nulou

Galvanické oddělení signálu, nezbytné pro spojení silových a řídicích částí zařízení, je v tomto případě zajištěno napájecím transformátorem. Ovšem bylo by možné i přímé připojení usměrňovače na síťové napětí (musel by být na toto napětí dimenzován). Poté by oddělení zajišťoval optotranzistor.



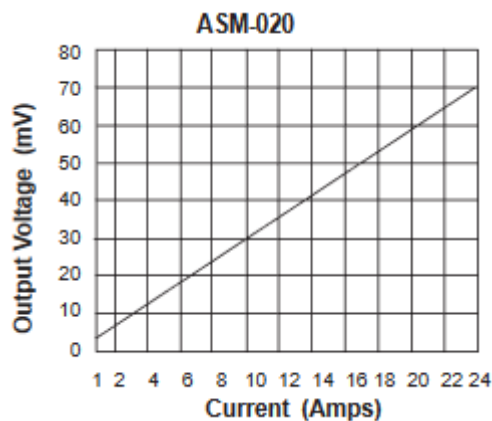
Obrázek 18: Zapojení obvodu detekce průchodu napětí nulou

4.2.3 Obvod pro předzpracování proudového signálu

Obvod opět slouží k zachycení průchodu signálu nulou. Tentokrát se však jedná o zachycení průchodu nulou odebíraného (sinusového) proudu. Tento údaj je totiž nezbytný pro režim automatické regulace, kdy se měří fázové zpoždění mezi napětím a proudem. Podle toho se následně nastavuje úhel fázového řízení.

Zatímco detekovat průchod napětí nulou je poměrně jednoduché, detekovat průchod proudu nulou je o něco složitější. Jeden ze způsobů je pomocí proudového transformátoru měřit proud a tento proud poté na měřicím odporu převést na napětí, které se dále zpracovává. Tato myšlenka vychází z patentu č. 239283 (SMÉKAL, František, Miroslav HORÁLEK a Miroslav BÁRTA, 1983) a je v této práci použita.

Celé zapojení se bude odvíjet od zvoleného typu proudového transformátoru. Dle prováděných měření při teoretickém návrhu modelu FKZ se proud sekundárním vinutím trakčního transformátoru pohyboval v rozmezí cca 0 až 10 A. Byl tedy zvolen cenově dostupný proudový senzor série ASM od firmy Talema. Tyto transformátory mají lineární převodní charakteristiku, viz obrázek 19.



Obrázek 19: Převodní charakteristika proudového transformátoru ASM-020 (ASM Series - Current Sensor for 50/ 60 Hz)

Jak je z charakteristiky patrné, transformátor není dělaný pro měření menšího proudu než 1 A, navíc hodnota napětí při tomto proudu činí pouze asi 4 mV. Takto nízké napětí by bylo problematické detekovat (vzhledem k možným šumům a citlivosti operačních zesilovačů). Aby bylo docíleno optimálnějších hodnot, udělají se na „primárním“ vinutí dva závity a bude se měřit dvojnásobný proud, než ve skutečnosti obvodem poteče. To jednak umožní měřit proudy menší než 1 A (mělo by být možno měřit už od 0,5 A), a dále na měřicím odporu zajistí dvojnásobné napětí. I přes to se ale výsledné napětí bude pohybovat

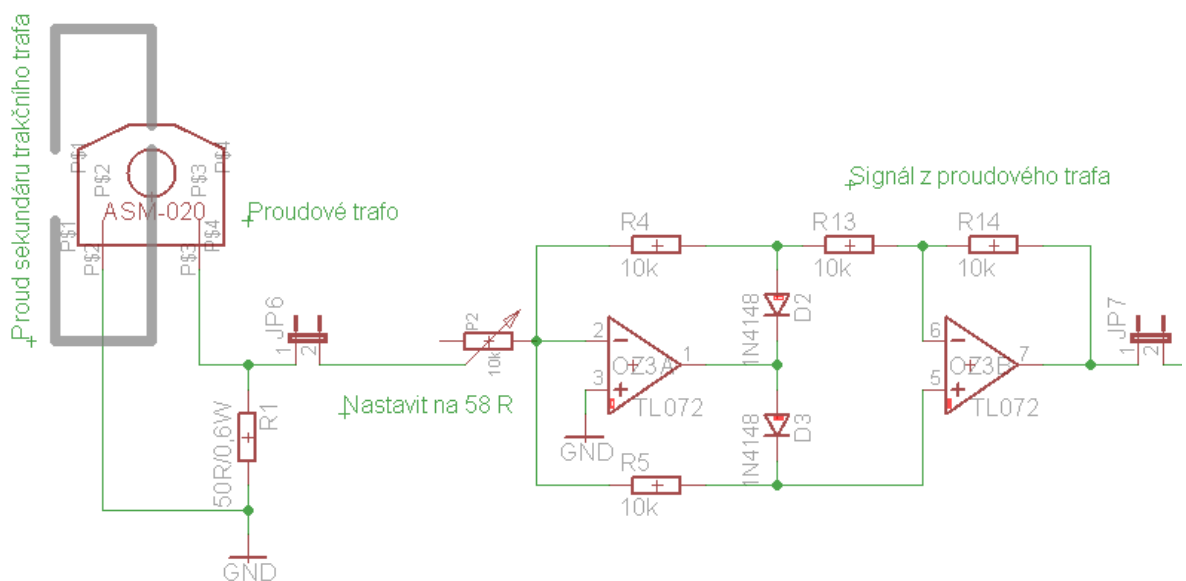
v rozmezí od asi 4 mV do 60 mV (teoreticky dle rozsahu měřícího transformátoru až do 70 mV).

Z toho vyplývají hned dva problémy. Napětí je příliš malé pro přímé zpracování a musí se zesílit. Rozsah hodnot, ve kterém se napětí bude pohybovat, je poměrně velký.

Signál se tedy bude muset zesílit operačním zesilovačem na přijatelnou hodnotu, ovšem je nutné uvažovat rozptyl vstupního napětí a nastavit zesílení tak, aby se OZ nedostal do saturace. Jelikož je napájecí napětí OZ ± 12 V, musí zesílený signál nabývat maximálně hodnoty cca 11 V. Z toho vychází, že po zesílení bude signál nabývat hodnot v rozmezí přibližně 0,8 až 11 V, dle velikosti sekundárního proudu trakčního transformátoru.

V dalším kroku se musí sinusové napětí upravit do podoby obdélníkového průběhu, vhodného pro detekování náběžné/sestupné hrany (zajímá nás totiž průchod nulou, ne absolutní hodnota proudu). První myšlenka byla použít komparátor. Zde je ovšem problém, že na vstup mikroprocesoru je možné přivést pouze kladné napětí. Při prováděných pokusech komparovat síťovou jednocestně usměrněnou sinusovku se navíc nepodařilo docílit přesvědčivých výsledků. Síť je poměrně zarušená a komparátor při průchodu nulou zakmitával. Zavedení hystereze by bylo vzhledem k proměnné hodnotě měřeného napětí problematické, protože by ke komparaci docházelo v různé časové okamžiky. Tyto různé časy by závisely na amplitudě, jaké by napětí zrovna nabývalo.

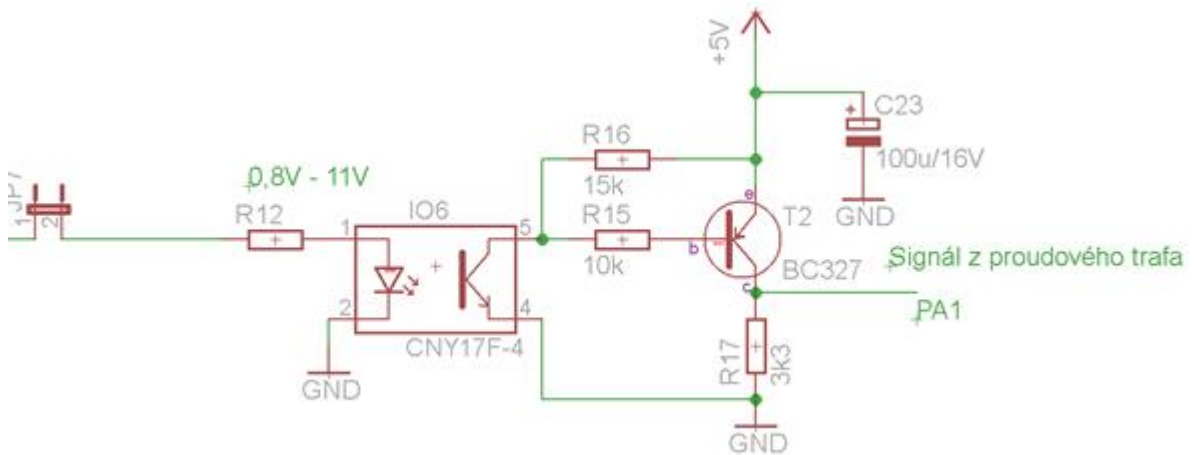
Nakonec byl tedy zvolen aktivní dvoucestný usměrňovač s operačním zesilovačem (KUBÁČ Petr, 2017). Schéma zapojení je na obrázku 20.



Obrázek 20: Zapojení proudového transformátoru a aktivního usměrňovače s OZ

Toto zapojení kompenzuje úbytek napětí na usměrňovacích diodách a zároveň lze pomocí vstupního odporu (ve schématu trimr P2) nastavit hodnotu zesílení. Jedná se o invertující zapojení, tudíž poměr $R4/P2$ určuje zesílení.

Další zpracování signálu (vytvoření obdélníkového průběhu) je stejné jako u detekce průchodu napětí nulou. Schéma ukazuje obrázek 21.



Obrázek 21: Zapojení obvodu detekce průchodu proudu nulou

Zde je nutné pečlivě pracovat se vstupními parametry optotranzistoru, které ukazuje tabulka 9.

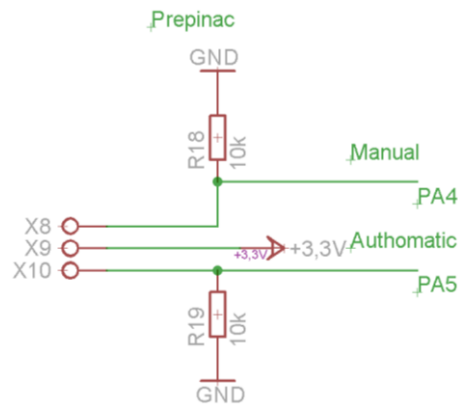
Tabulka 9: Tabulka vstupních parametrů optotranzistoru CNY17F-4 (CNY17F – Phototransistor, 2005)

Parameter	Test condition	Symbol	Min	Typ.	Max	Unit
Forward voltage	$I_F = 60 \text{ mA}$	V_F		1.25	1.65	V

Měřením bylo zjištěno, že optotranzistor obstojně pracuje (pro daný účel použití) i při napětí V_F kolem 1 V (prahové napětí diody) a proudu I_F kolem 10 mA. Hodnota předřadného odporu se tedy bude muset určit měřením dle konkrétního kusu optotranzistoru tak, aby svými mezními pracovními hodnotami co nejlépe pokryl pásmo možného vstupního napětí. Hodnota odporu by se však měla pohybovat kolem 200Ω .

4.2.4 Volba automatického/ručního režimu řízení

Volba automatického nebo ručního režimu je prováděna přepínačem. Přepínač musí být umístěn na ovládacím panelu, proto je k DPS připojen přes konektor WAGO 236. Na plošném spoji jsou potom odpory, přes které se při zvolené poloze přepínače uzavře obvod. Na odpor se tím přivede napětí (3 V), které je tím přivedeno i na vstup mikroprocesoru. Mikroprocesor napětí na svém vstupu poté vyhodnotí jako logickou 1. Schéma zapojení je na obrázku 22.

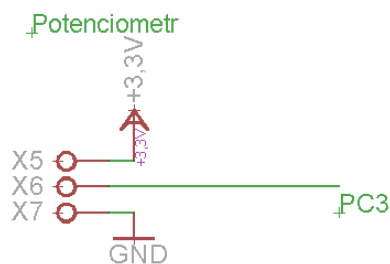


Obrázek 22: Zapojení přepínače automatického/ručního režimu řízení

Velikost odporů určuje, jak velký proud tlačítkem poteče. Jejich minimální hodnota by tedy byla určena buď maximálním dovoleným proudem přepínače, nebo výkonem napájecího zdroje.

4.2.5 Ovládání ručního řízení

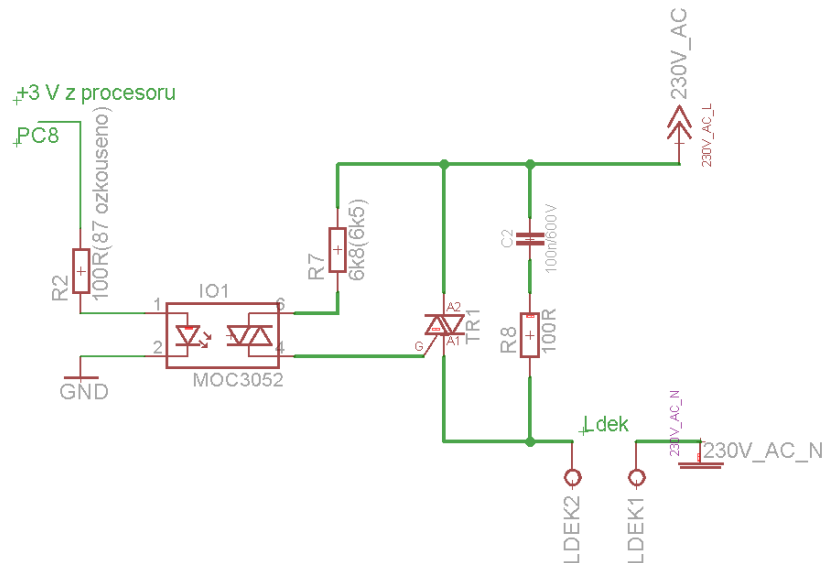
Ke kontrole zařízení v ručním režimu řízení je využito potenciometru. Potenciometr musí být umístěn na ovládacím panelu, takže je opět připojen k DSP přes konektor WAGO 236. Na plošném spoji je poté jezdec připojen ke vstupu mikroprocesoru (AD převodníku). Schéma zapojení je na obrázku 23.



Obrázek 23: Zapojení potenciometru pro ruční řízení

4.2.6 Obvody pro řízení výkonového triaku

Výkonový triak pracuje na síťovém napětí, z bezpečnostních důvodů proto není možné připojit řídicí elektrodu přímo k mikroprocesoru. Triak je zároveň vhodné řídit opačnou polaritou napětí, než jakou má na vstupu A1. Z těchto důvodů je výkonový triak řízen optotriakem. Optotriak zajišťuje galvanické oddělení (elektrická pevnost činí 7,5 kVAC) řídicích obvodů a zároveň vyžaduje pouze jednu polaritu řídicího signálu. Schéma zapojení ukazuje obrázek 24 (HANKOVEC, David, 2002-2019).



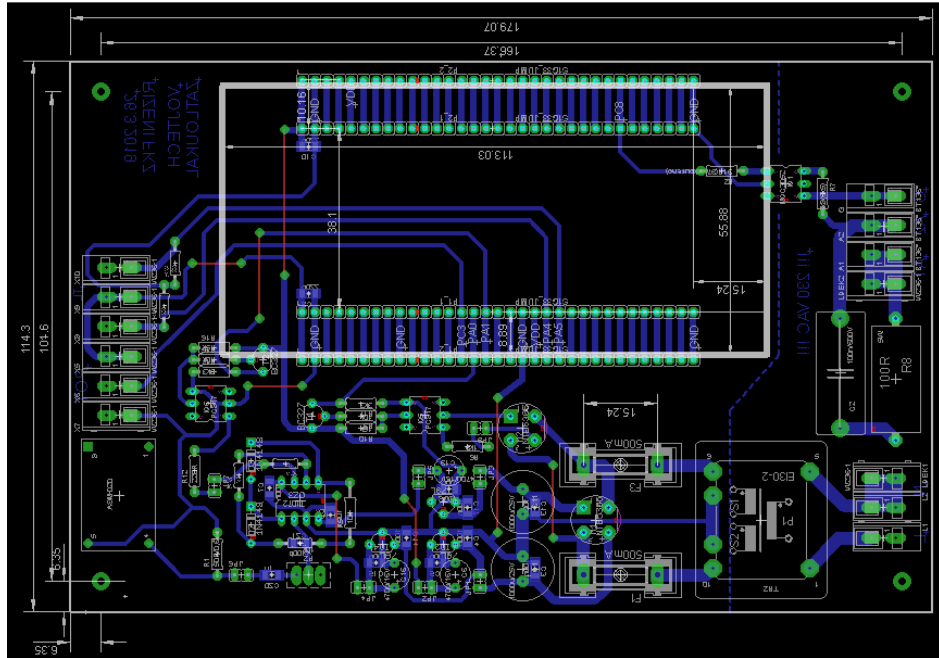
Obrázek 24: Zapojení obvodu pro spínání výkonového triaku

Řídicí vstup optotriaku je připojen přes odpor přímo k výstupu mikroprocesoru. Tento odpor omezuje proud LED diodou. Výstup optotriaku je přes odpor, který určuje proud optotriakem, připojen přímo k síťovému napětí. Paralelně k výkonovému triaku musí být připojen RC snubber. Jelikož triak bude spínat induktivní zátěž (tlumivku o hodnotě asi 113 mH), je tento RC člen nezbytný. Pokud by nebyl použit, v lepším případě by mohlo docházet, vlivem přepětí vznikajícího spínáním indukčnosti, k nechtěnému otevření triaku. V horším případě by mohlo dojít k jeho zničení.

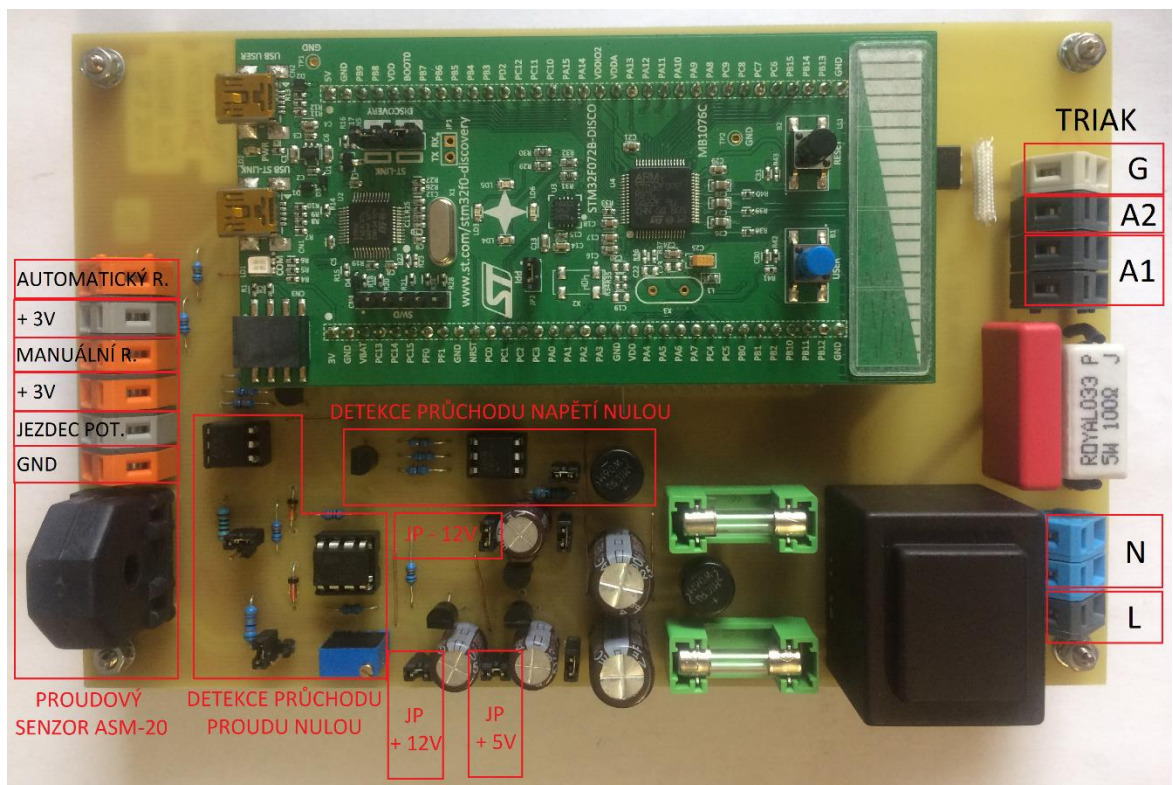
Kompletní schéma celé řídicí jednotky je uvedeno v přílohách F a G.

4.3 Návrh DPS řídicí jednotky

Návrh plošného spoje je proveden v programu EAGLE. Při návrhu byla snaha dodržet oddělení silnoproudých a slaboproudých částí obvodů. Obrázek 25 ukazuje navržený plošný spoj. Na dalším obrázku 26 je vyrobená a osazená řídicí jednotka s popisem důležitých částí.



Obrázek 25: Návrh řídicí jednotky v programu EAGLE



Obrázek 26: Vyrobená a osazená řídicí jednotka – popis

5 Návrh řídicího softwaru

Tato kapitola se zabývá rozbořem funkce zařízení z hlediska jeho řízení. V oddíle 5.1 *Teoretický návrh řídicího softwaru* je nastíněn a rozebrán řídicí algoritmus. V oddíle 5.2 *Programátorská příručka* jsou rozebrány jednotlivé funkce používané v řídicím SW a je zde rovněž uveden přehled využitých IO pinů.

5.1 Teoretický návrh řídicího softwaru

Pro stanovení požadavků na řídicí SW je dobré uvést body, které musí řídicí část plnit:

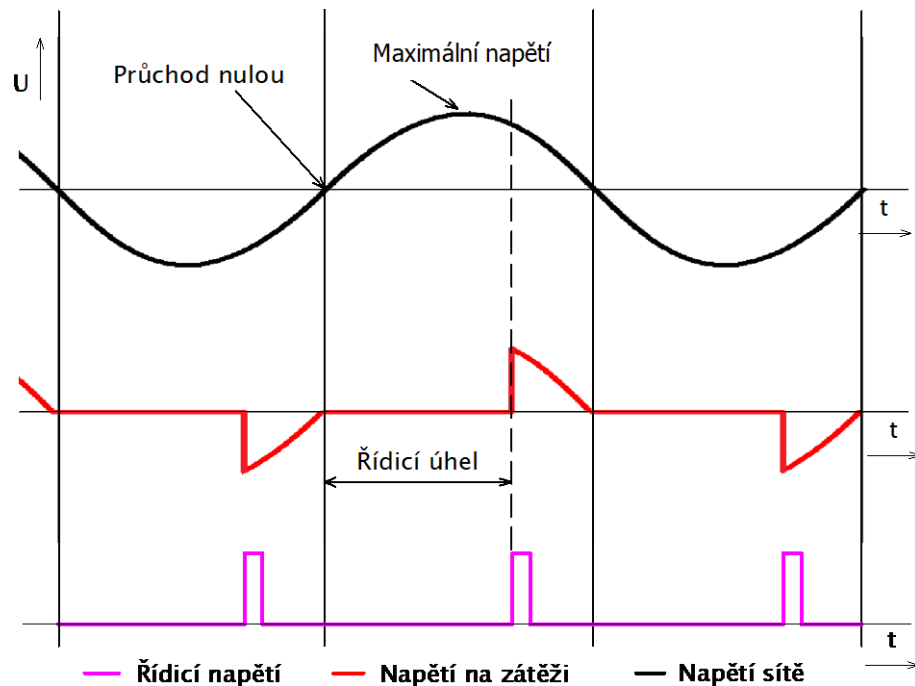
- řídit velikost dekompenzační indukčnosti
- umožňovat řízení v režimech tzv. „ruční řízení“, „automatické řízení“ a „blokováno“

Pro řízení velikosti dekompenzační indukčnosti je použito fázové řízení, jak již bylo nastíněno v teoretické části práce, v oddíle 1.1 *Uspořádání funkčních bloků FKZ*. Princip tohoto řízení je rozebrán v následujícím pododdíle.

5.1.1 Princip fázového řízení

Fázové řízení bylo dříve hojně využíváno v různých odvětvích (Stmívače, regulace otáček ručních nástrojů, regulace otáček domácích spotřebičů, regulace trakčních střídavých pohonů atd.). Umožňuje totiž bezztrátovou regulaci střídavého napětí (neuvažujeme-li spínací ztráty) a je ve své podstatě velice jednoduché. Časem se tato metoda stala nevyhovující, právě z důvodu generování vyšších harmonických napětí a proudu, a rušení s tím spojeným. Určitého zlepšení důsledků této regulace lze zajistit použitím frekvenčních filtrů. Ovšem dnes již je tento typ regulace překonán a jeho uplatnění zůstalo pouze v malých domácích spotřebičích či nástrojích.

Princip fázového řízení ukazuje obrázek 27. Řídicí úhel udává, kdy se má triak otevřít. Při průchodu napětí nulou se triak uzavře a otevře ho až další impulz. Tímto způsobem lze na zátěži plynule řídit střední hodnotu napětí.



Obrázek 27: Princip fázového řízení

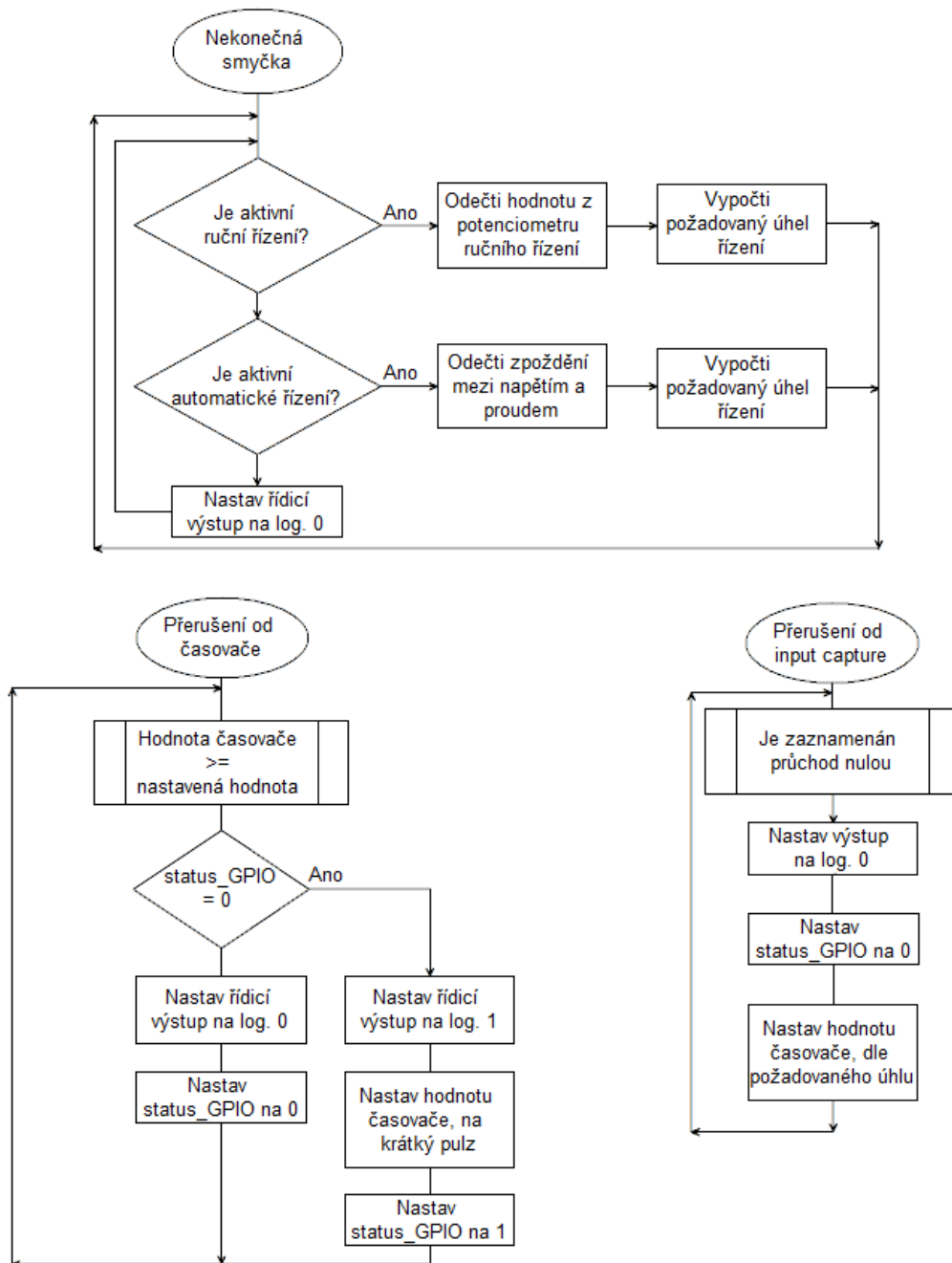
5.1.2 Řídicí algoritmus

Řídicí algoritmus je znázorněn vývojovými diagramy na obrázku 28. Obrázek ukazuje nekonečnou smyčku hlavního programu a dvě rutiny vykonávané při přerušení. Jsou tedy vynechány veškeré inicializace proměnných, nastavení periferií, nastavení IO pinů a rutina pro obsluhu AD převodníku. Zároveň ukazuje pouze obecný postup, jak funguje řídicí software. Vývojové diagramy tedy nejsou vázány na syntaxi kódu.

Na začátku nekonečné smyčky jsou vždy zkontrolovány vstupy, dle kterých se rozhodne, zda bude běžet smyčka „ručního řízení“ nebo „automatického řízení“. V závislosti na typu řízení se buď odečítá hodnota z AD převodníku (natočení potenciometru) nebo se měří záchytnou jednotkou input capture čas mezi průchody nulou sinusového signálu (odečítá se fázový posun napětí a proudu). Následuje přepočítání naměřených hodnot na hodnotu, která bude odpovídat požadovanému řídicímu úhlu.

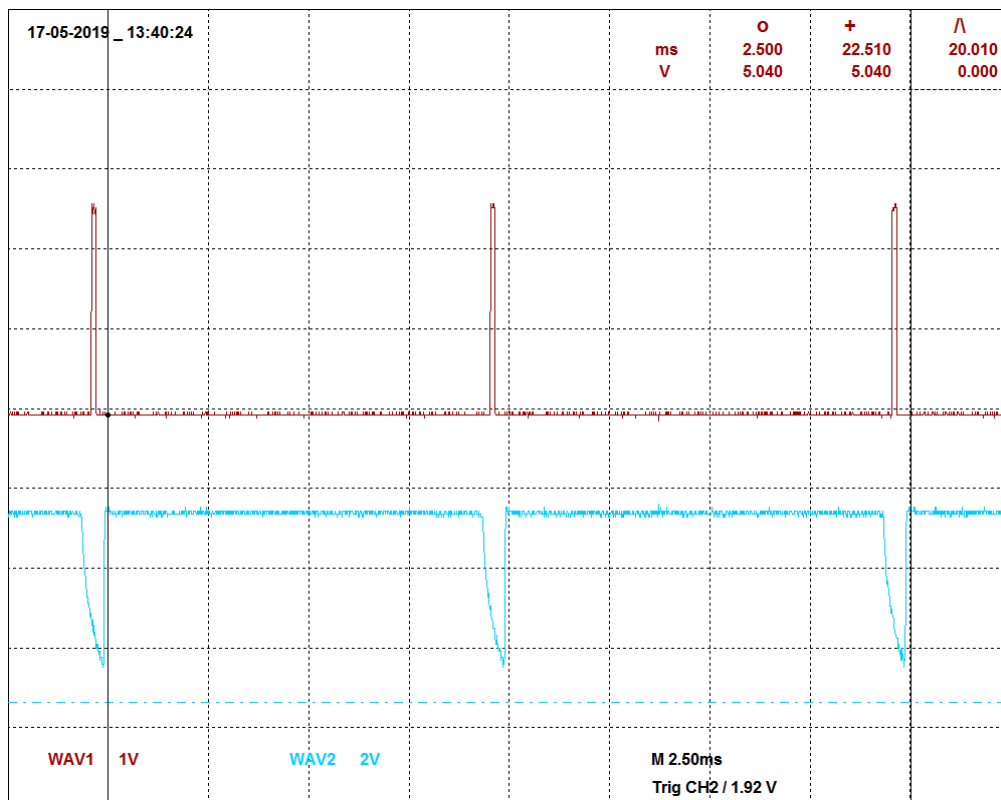
Aby bylo možno kontrolovaně generovat impulzy, a tedy řídit napětí, je nezbytné synchronizovat řídicí část s napětím sítě. Jakmile je zaznamenán průchod napětí nulou, je vyvoláno přerušení (přerušení od input capture) a v něm do registru, ve kterém je uložena komparační úroveň, je zapsána hodnota představující řídicí úhel. Jakmile časovač dosáhne nastavené komparační úrovně, je vyvoláno další přerušení (přerušení od časovače) a na řídicím výstupu je nastavena log. 1, představující hodnotu 5 V. Zároveň je v komparačním registru nastavena hodnota časovače na krátký pulz a status_GPIO na 1. Po chvíli časovač

opět dosáhne komparační úrovně a vyvolá opět přerušení. Tentokrát nastaví řídicí výstup na log. 0 a status_GPIO na 0. Tímto způsobem je pomocí jednoho časovače docíleno krátkého řídicího impulzu, který zajistí otevření triaku. Délka pulzu je nastavena asi na 100 us (viz obrázky 29 a 30), kdežto triak je držen v otevřeném stavu procházejícím proudem, a to až do dalšího průchodu nulou.

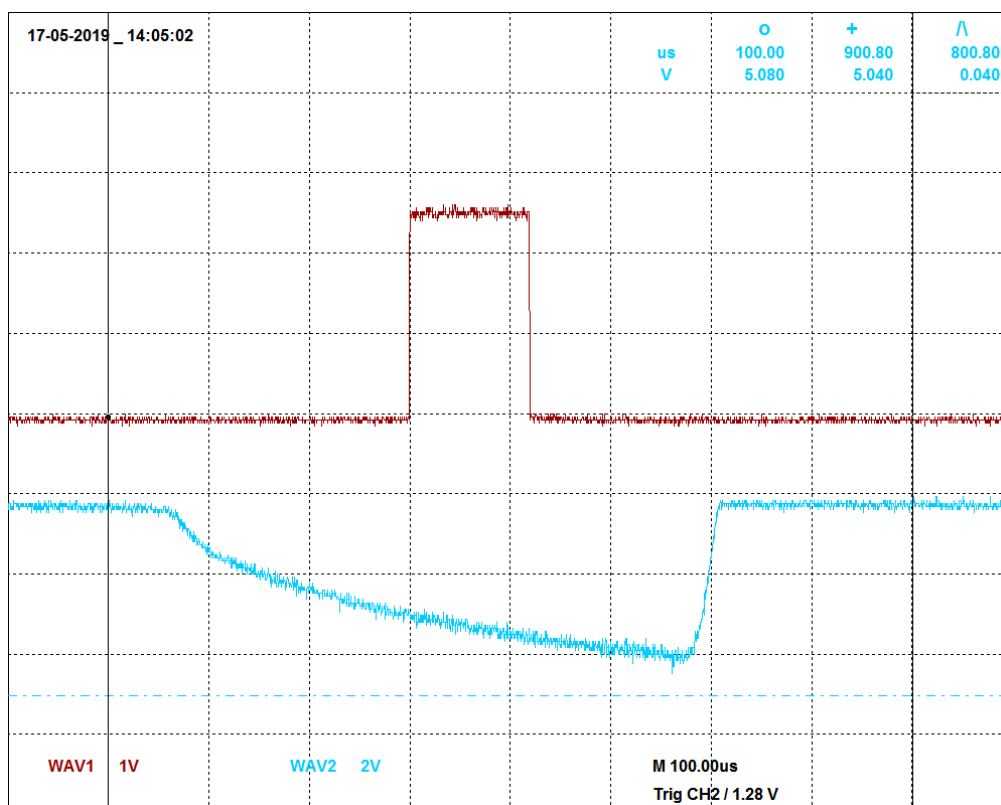


Obrázek 28: Vývojové diagramy řídicího algoritmu

V kódu je využíváno ještě jedné rutiny, a to rutiny obsluhující AD převodník. V ní probíhá pouze vyčtení navzorkované hodnoty z příslušného registru AD převodníku do proměnné, se kterou je dále pracováno při výpočtu v nekonečné smyčce.



Obrázek 29: Synchronizační a řídicí pulzy – $\alpha = 180^\circ$



Obrázek 30: Synchronizační a řídicí pulz – $\alpha = 180^\circ$ - DETAIL

5.2 Programátorská příručka

Tento oddíl rozebírá napsaný řídicí software z pohledu programátora. Je zde uveden použitý vývojový SW, využívané periferie a IO piny. Popis kódu je uveden v pododdíle 5.2.1 *Popis programu*.

Program je napsán v jazyku C, s využíváním vysokoúrovňových knihoven HAL (High Abstraction Layer). K vytvoření projektu, nakonfigurování periférií a nastavení IO pinů, byl použit project creator STM32CubeMX 5.1.0. Kompilace probíhala v programu Keil uVision5 a k editaci kódu bylo využito editoru Source Insight 3.5.

Software je napsán pro vývojový kit STM32F072B-Discovery. Tento kit je osazen procesorem STM32F072, založeným na architektuře ARM. Procesor k taktování používá interní RC oscilátor s frekvencí 48 MHz.

Tabulka 10 uvádí přehled periférií, které program užívá. Dále je v ní uvedeno stručné nastavení a účel využitých periférií.

Tabulka 10: Tabulka použitých periférií

Periferie	Nastavení	Použití
Timer 2	Input capture na kanálech 1 a 2 (PA0 a PA1) – povoleno přerušení	Zachycení průchodu nulou, měření fázového posunu
Timer 3	Časovač, předdělička 480 – povoleno přerušení	Generování řídicího impulzu na PC8
Interní ADC	AD převodník na kanále IN3 (PA3) – povoleno přerušení	Měření napětí

Další tabulka (č. 11) uvádí přehled použitých IO pinů, jejich nastavení a použití.

Tabulka 11: Tabulka použitých IO pinů

Pin	Nastavení	Použití
PA0	IN	Zachycení průchodu napětí nulou
PA1	IN	Zachycení průchodu proudu nulou
PA3	IN	Měření polohy potenciometru
PA4	IN	Volba ručního režimu
PA5	IN	Volba automatického režimu
PC8	OUT	Generování řídicího impulzu

5.2.1 Popis programu

Program je složen z několika funkcí. Jedná se o hlavní funkci main, rutiny, které se vykonávají při přerušení, a nakonec funkce, které obstarávají inicializaci IO pinů, nastavení interních hodin mikroprocesoru, AD převodníku a časovačů.

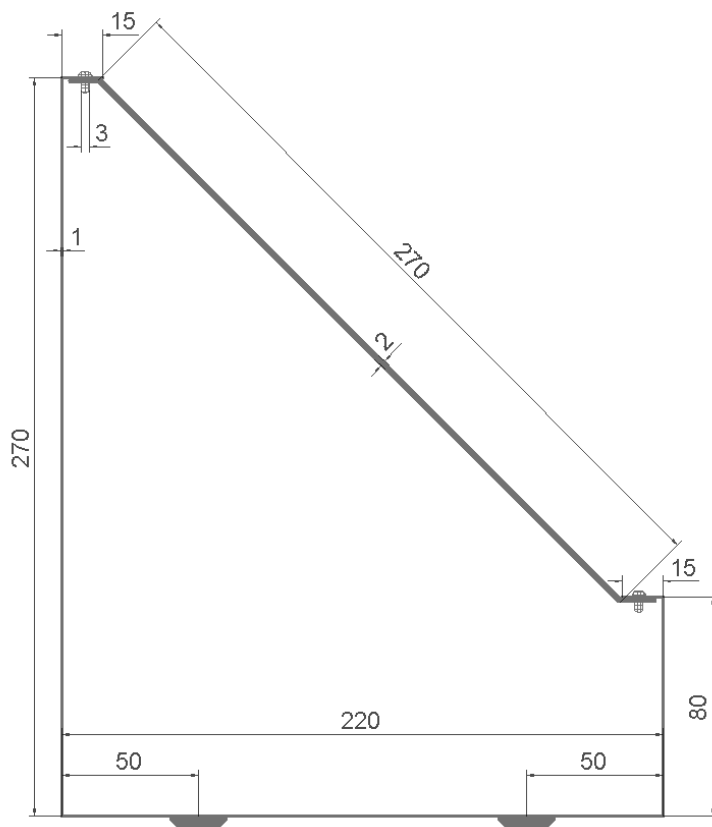
V hlavní funkci main jsou nejprve volány funkce pro nastavení IO pinů, časovačů TIM2 a TIM3 a AD převodníku. Následuje nekonečná smyčka, ve které jsou kontrolovány vstupy PA4 a PA5. Podle hodnot, jaké se na vstupech vyskytují, se program větví na „ruční režim řízení“ a na automatický režim řízení“. Pokud by nastala situace, že ani na jednom vstupu PA4 a PA5 není přítomná log. 1 (režim řízení „odpojeno“ nebo porucha), dojde k zastavení všech generovaných přerušení a tím tedy k uzavření triaku.

V ručním režimu jsou povolena přerušení od časovače TIM2 na kanálu 1 (PA0), od časovače TIM3 a od AD převodníku. Poté následuje přepočítání hodnoty AD převodníku na napětí v milivoltech (proměnná *ADC_voltage*) a výpočet požadovaného řídicího úhlu (proměnná *pulse_delay*)

V automatickém režimu jsou povolena přerušení od časovače TIM2 na kanálech 1 a 2 (PA0 a PA1) a od časovače TIM3. Následuje vyčtení hodnot z registrů časovače TIM2 (proměnné *input_capture_CH1* a *input_capture_CH2*) a výpočet fázového posunu (*input_capture_delta*). Zde se program opět větví podle toho, zda *input_capture_delta* nabývá kladné nebo záporné hodnoty (induktivní nebo kapacitní charakter). Podle toho se řídicí úhel buď zvyšuje, nebo snižuje.

6 Návrh mechanické konstrukce

Návrh mechanické konstrukce je proveden tak, aby bylo zařízení vyrobitelné „svépomocí“ v podmínkách Univerzity. Konstrukční návrh zařízení při pohledu z boku uvádí obrázek 31.

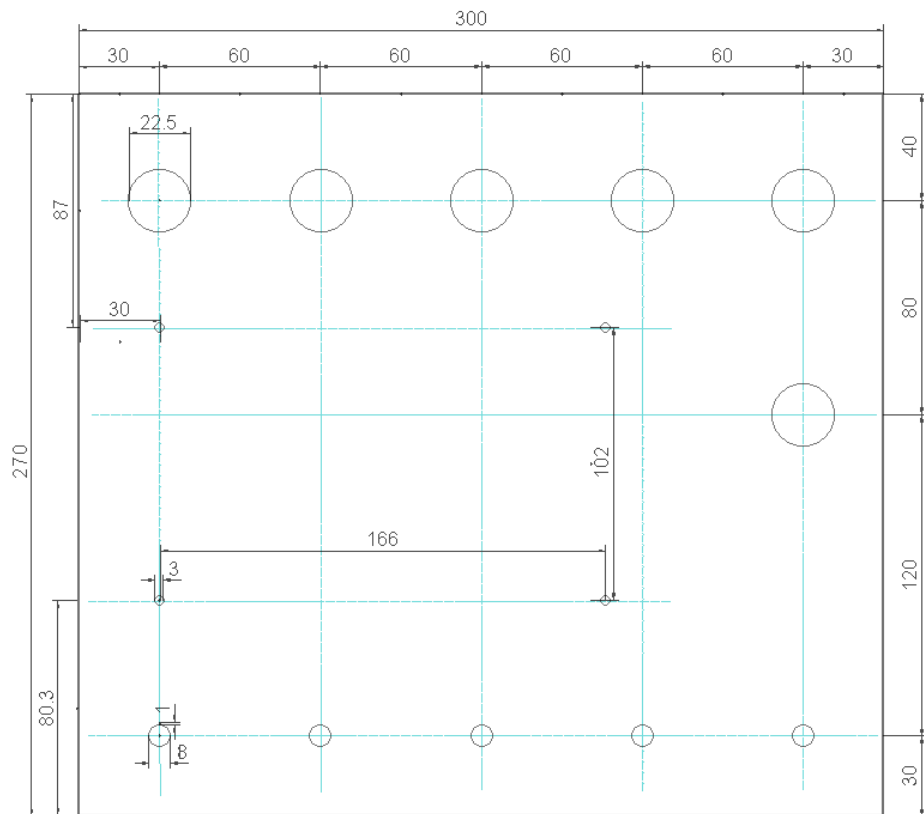


Obrázek 31: Výkres - bokorys

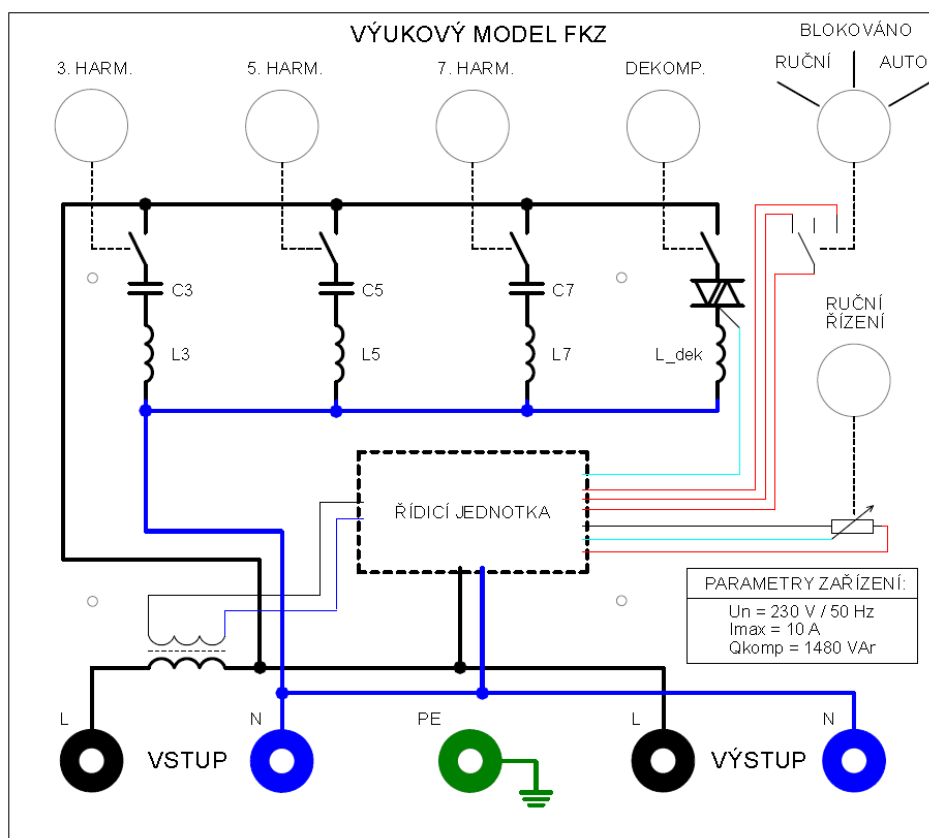
Šasi je vyrobeno z jednoho kusu nerezového plechu tloušťky 1,5 mm. Rozměr rozvinutého plechu činí 300 x 600 mm. Konstrukce je dostatečně tuhá, pro jistotu je však počítáno se zpevňující výztuží, kterou lze dodatečně instalovat. Výztuž by tvořila spojnici mezi předním a zadním panelem, byla by provedena z nerezového plechového pásku o tloušťce 2 mm a rozměrech 20 x 295 mm.

6.1 Návrh a popis čelního panelu

Rozvržení čelního panelu ukazuje obrázek 32. Na obrázku 33 je potisk s popisem ovládacích prvků a silovým zapojením modelu FKZ. V horní části jsou umístěny vypínače, zleva pro připojení/ odpojení filtračních větví, dekompenzační tlumivky a přepínač ručního/automatického režimu. Svisle pod přepínačem je umístěn potenciometr. Ve spodní části jsou umístěny svorky, pro připojení zařízení do obvodu. Vlevo jsou vstupní svorky, vpravo výstupní svorky a uprostřed je zemní svorka.



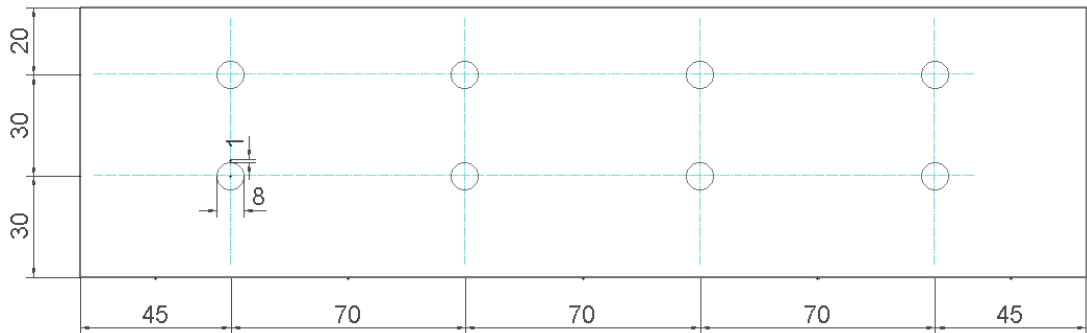
Obrázek 32: Výkres - čelní panel



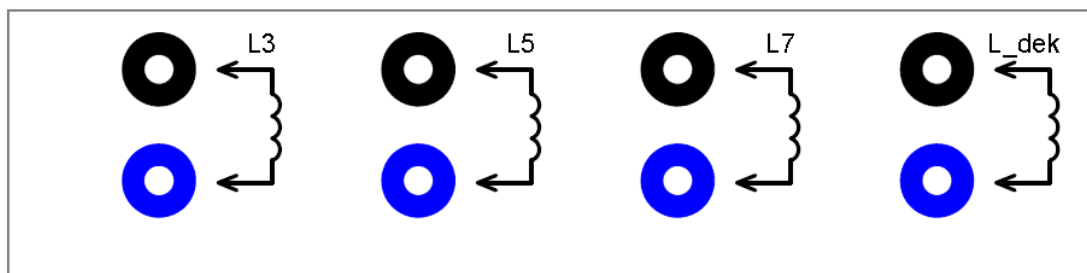
Obrázek 33: Potisk - čelní panel

6.2 Návrh a popis zadního panelu

Výrobní výkres zadního panelu ukazuje obrázek 34. Na obrázku 35 je poté potisk s popisem. Svorčky slouží pro připojení všech čtyř indukčností, zleva pro 3. harmonickou, 5. harmonickou, 7. harmonickou a dekompenzační tlumivku. Sobě odpovídající svorčky jsou umístěny vždy nad sebou.



Obrázek 34: Výkres - zadní panel



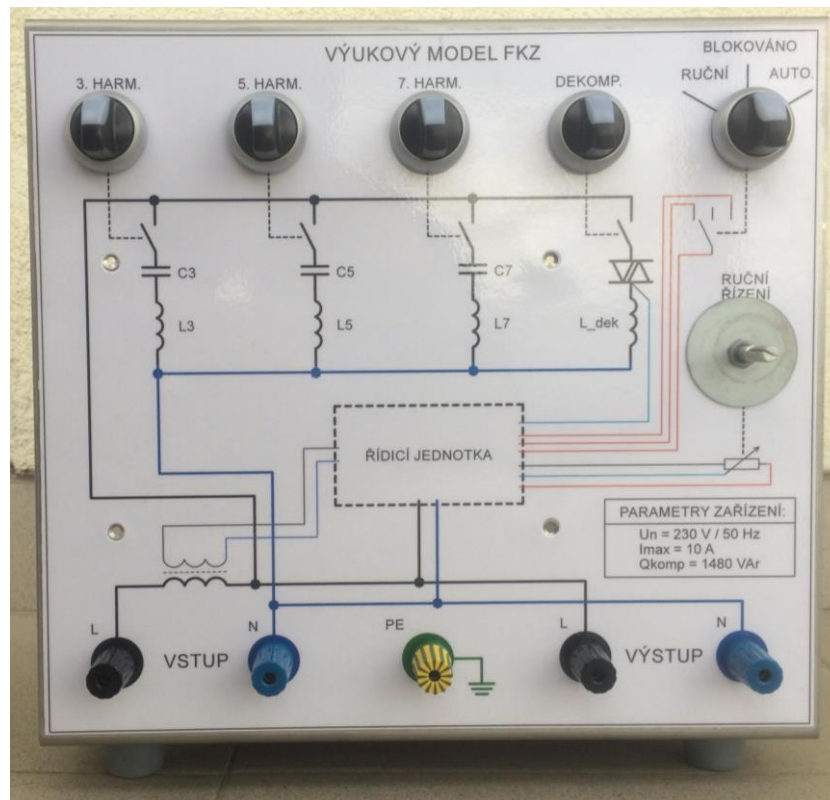
Obrázek 35: Potisk - zadní panel

6.3 Pohled na zhotovený model FKZ

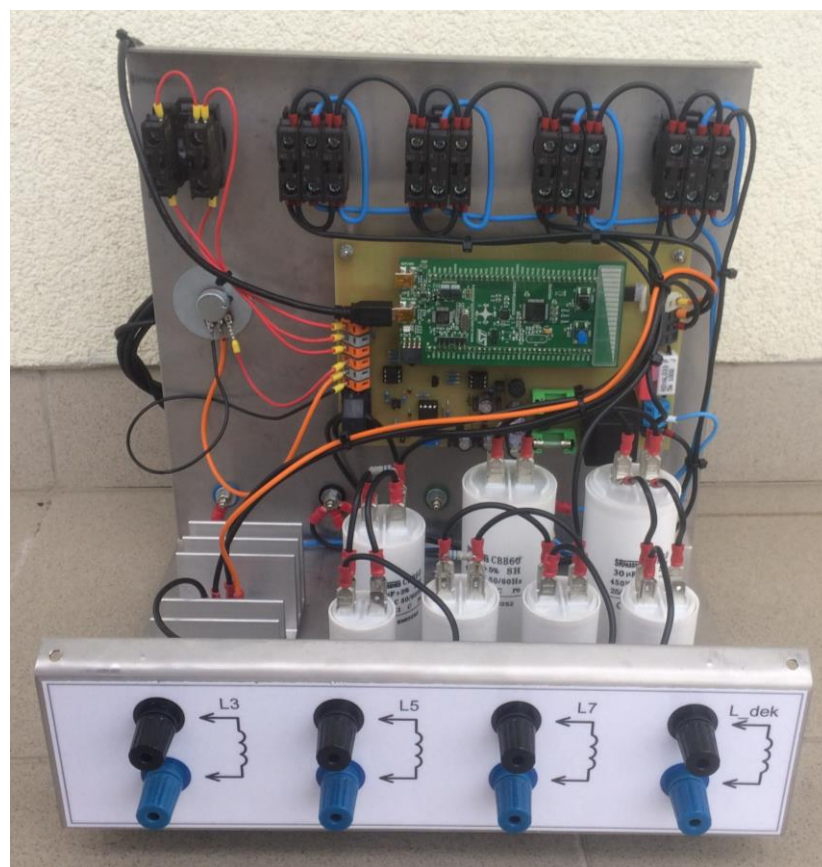
V tomto oddíle jsou uvedeny fotografie vyrobeného modelu. Na následujícím obrázku 36 je fotografie vyrobeného šasi. Na dalších obrázcích (obrázek 37 a 38) jsou fotografie zkompletovaného modelu FKZ.



Obrázek 36: Fotografie vyrobeného šasi



Obrázek 37: Fotografie vyrobeného modelu FKZ – pohled zepředu



Obrázek 38: Fotografie vyrobeného modelu FKZ – pohled zezadu

7 Laboratorní zkoušky modelu FKZ

Pro zjištění vlastností navrženého zařízení je nutné provést laboratorní zkoušky. Tyto zkoušky by měly prokázat, zda model skutečně plní úkoly stanovené na začátku této práce v kapitole 1 *Filtračně-kompenzační zařízení FKZ*.

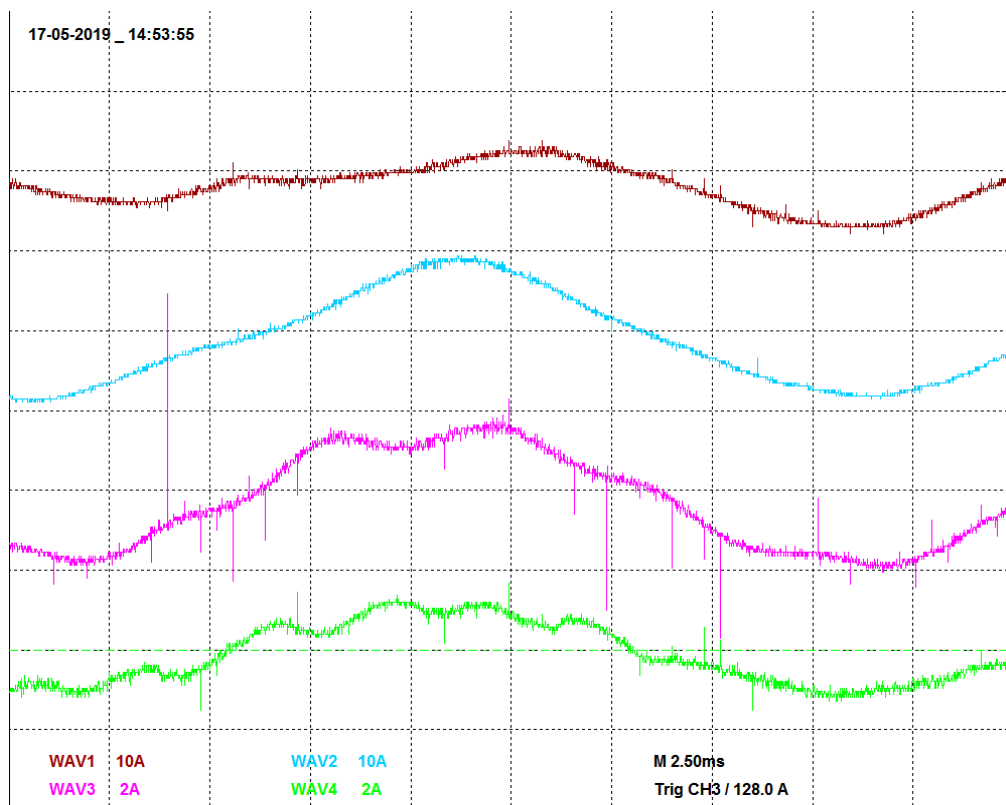
7.1 Měření parametrů kompenzačních větví modelu FKZ

Při tomto měření bylo postaveno měřicí pracoviště dle zapojení v příloze H. Postupně byly připojovány samostatně jednotlivé filtrační LC větve pro 3., 5., a 7. harmonickou, nakonec byly připojeny všechny větve současně. Pomocí výkonového analyzátoru byly měřeny odebírané výkony (P, Q, S), proud a účinník. Naměřená data jsou uvedena v tabulce 12.

Tabulka 12: Naměřené parametry filtračních LC větví

Měření LC větví				
	3. harm	5. harm	7. harm	Všechny větve
U _{1rms} [V]	230	230	230	230
I _{1rms} [A]	5,65	1,27	0,70	7,60
P ₁ [W]	25,3	4,9	2,0	32,0
S ₁ [VA]	1315	291	160	1747
Q ₁ [VAr]	-1315	-291	-160	-1751
cos (φ) L [-]	-	-	-	-
cos (φ) C [-]	0,019	0,017	0,012	0,018

Proud odebíraný jednotlivými větvemi odpovídá teoretickým předpokladům z oddílu 3.2.3 *Proudové dimenzování tlumivek LC větví*. Na obrázku 39 lze vidět jejich průběh sejmutý z osciloskopu. Kompenzační jalový výkon však dosahuje vyšších hodnot, než bylo spočítáno a to o zhruba 200 VAr.



CH1 – Proud odebíraný modelem FKZ *CH2* – Proud větví 3. harmonické

CH3 – Proud větví 5. harmonické *CH4* – Proud větví 7. harmonické

Obrázek 39: Průběh proudů jednotlivými LC větvemi

7.2 Měření vlivu dekompenzační indukčnosti

Další měření ukazuje vliv dekompenzační indukčnosti. Do obvodu byly připojeny všechny filtrační LC větve i větve s dekompenzační indukčností. Pomocí potenciometru v režimu ručního řízení byl nastavován řídicí úhel α . Nastavováním úhlu byl řízen triak, a tedy velikost dekompenzační indukčnosti. Naměřená data jsou uvedena v tabulce 13. Pracoviště bylo opět zapojeno podle schématu v příloze H.

Tabulka 13: Vliv řízení dekompenzační indukčnosti

Měření vlivu dekompenzační indukčnosti										
α [°]	180	160	140	120	110	100	90	80	70	65
U _I rms [V]	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I _I rms [A]	7,60	7,61	7,54	7,16	6,24	5,93	5,37	4,76	4,41	4,01
P _I [W]	32	32	33	41	78	113	194	344	665	874
S _I [VA]	1750	1750	1737	1648	1439	1366	1235	1094	1012	919
Q _I [VA _r]	-1750	-1750	-1737	-1647	-1437	-1361	-1219	-1039	-762	-282
cos(φ) _L [-]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
cos(φ) _C [-]	0,019	0,019	0,019	0,025	0,054	0,082	0,160	0,310	0,660	0,950

V následujícím grafu (obrázek 40) je vynesena závislost účinníku modelu FKZ na řídicím úhlu triaku.

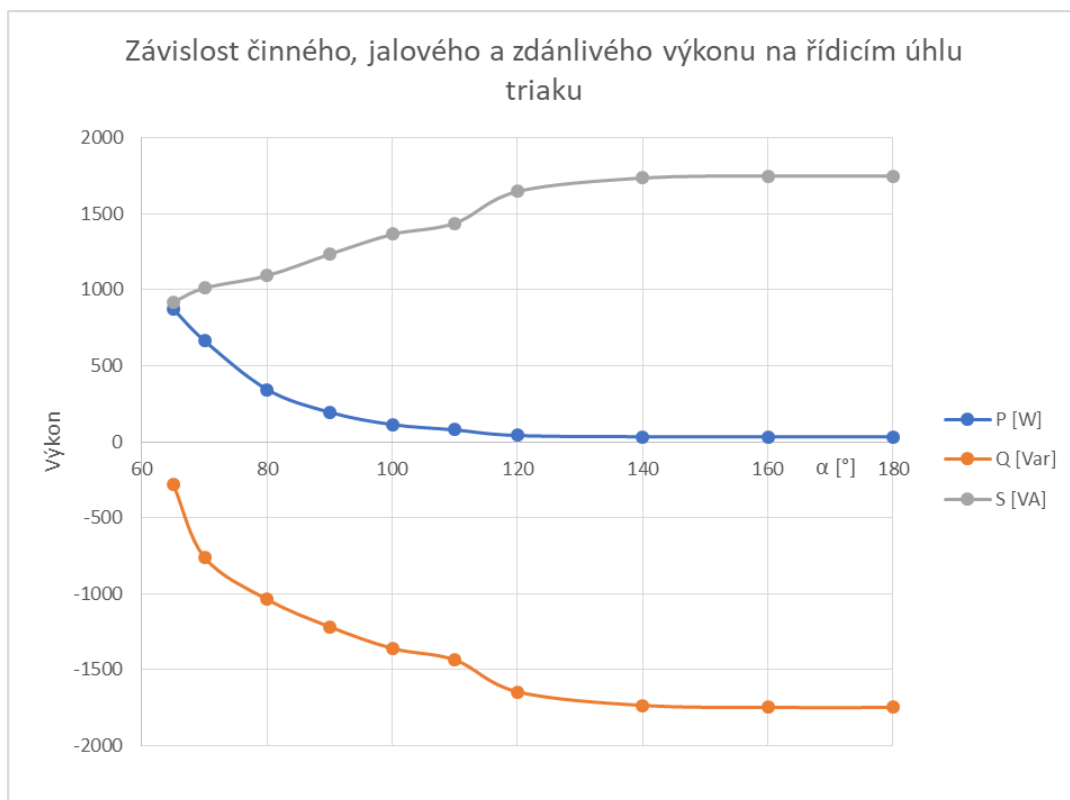


Obrázek 40: Závislost účinníku na řídicím úhlu triaku

Z grafu je patrné, že s klesajícím řídicím úhlem roste celkový účinník modelu FKZ. Toto chování je správné, neboť s klesajícím řídicím úhlem roste napětí na indukčnosti, stejně tak roste i proud. Jelikož se jedná o proud procházející dekompenzační tlumivkou, je odebíraný výkon převážně jalový² a kompenzuje kapacitní jalové výkony odebírané filtračními LC větvemi. Celkový jalový výkon odebíraný modelem tedy klesá a účinník se poté blíží 1. Závislost odebíraných výkonů na řídicím úhlu triaku ukazuje obrázek 41.

Jako dekompenzační indukčnosti bylo použito dvou sériově spojených indukčností s železným jádrem o celkové hodnotě kolem 45 mH (místo cca 113 mH spočítaných v teoretické části práce). Vlivem nižší použité hodnoty tlumivky se nepodařilo „přetáhnout“ účinník modelu do induktivní oblasti. Ovšem dle trendu křivky se lze domnívat, že pokud by byla použita správná tlumivka, podařilo by se dosáhnout účinníku 0,95 induktivního charakteru.

² Jelikož použitá dekompenzační tlumivka byla na železném jádře, docházelo při nízkých řídicích úhlech k jejímu přesycování a prudkým nárůstům proudu. Z tohoto důvodu byl do dekompenzační větve vložen předřadný odpor o hodnotě 12 Ω . Vlivem tohoto odporu však narůstal odebíraný činný výkon, což je patrné z naměřených hodnot i z obrázku 41.



Obrázek 41: Závislost výkonů na řídicím úhlu triaku

7.2.1 Chování indukčnosti (Ldek) při fázovém řízení

Zařazením indukčnosti do obvodu střídavého proudu dojde k fázovému zpoždění proudu oproti napětí. Vlivem tohoto zpoždění dochází k přechodným dějům. Při spínání induktivní zátěže polovodiči poté dochází k jevům, kdy není možné v požadovaný okamžik uzavřít ventil z důvodu stále procházejícího proudu (vlivem doznívání přechodného děje). Doba, po kterou bude spínací ventil stále držen otevřený procházejícím proudem, je dána rychlostí zániku proudu v cívce.³ Tento problém se obvykle řeší zpětnou diodou zařazenou antiparalelně ke spínacímu prvku. Dioda zajistí vedení proudu při doznívání přechodného děje a spínací prvek se tak může bezpečně uzavřít.

Jiné je to však u fázového řízení či např. řízeného usměrňovače. Zde se doznívající proud uzavírá přes jiný spínací element (ventil). V určitém okamžiku tedy dojde ke stavu, kdy již procházející proud není přerušovaný, ale stane se nepřerušovaným.⁴ Poté již další snižování řídicího úhlu nemá význam, protože ventily jsou drženy procházejícím proudem v otevřeném stavu po celou dobu půlperiody a řízené napětí je již sinusové. Na následujících obrázcích jsou uvedeny oscilogramy pro různé hodnoty řídicího úhlu.

³ Doba zániku proudu u kombinace prvků RL je ovlivněna velikostí odporu. Čím větší hodnoty bude odpor nabývat, tím déle bude trvat doznívání proudu.

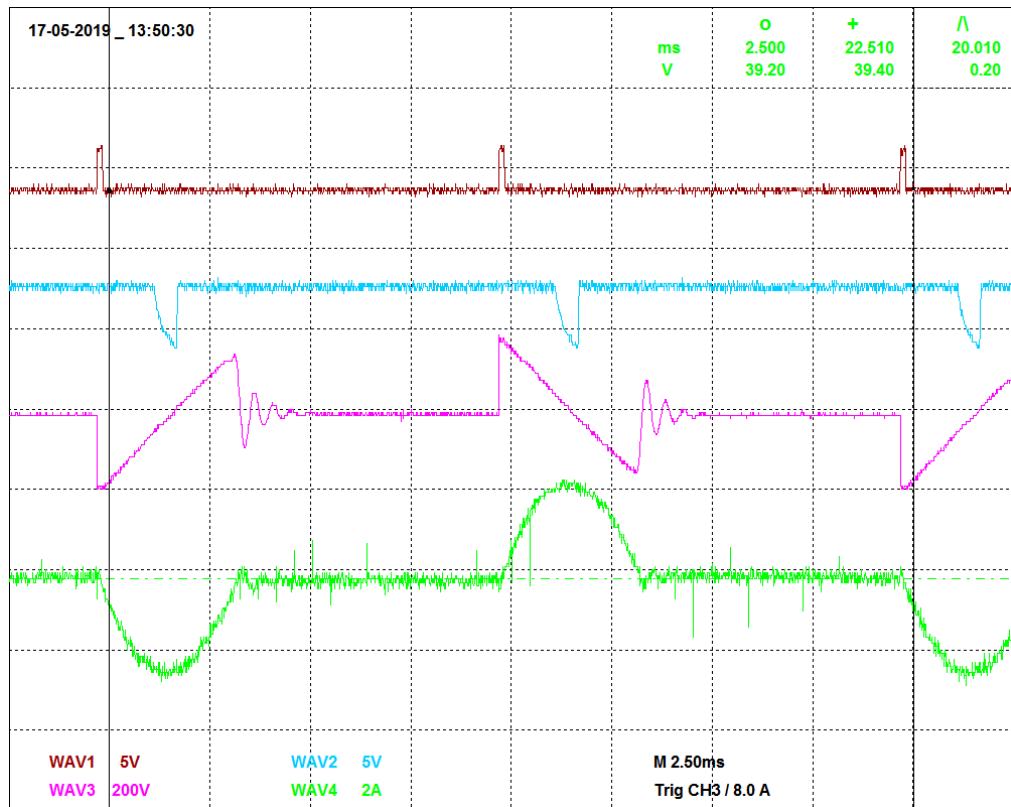
⁴ O nepřerušovaném proudu mluvíme tehdy, je-li řídicí úhel menší nebo roven době překmitu napětí do opačné polaroty, při uzavření triaku. Doba doznívání proudu tedy omezuje rozsah řízení.

CH1 – Řídicí pulzy

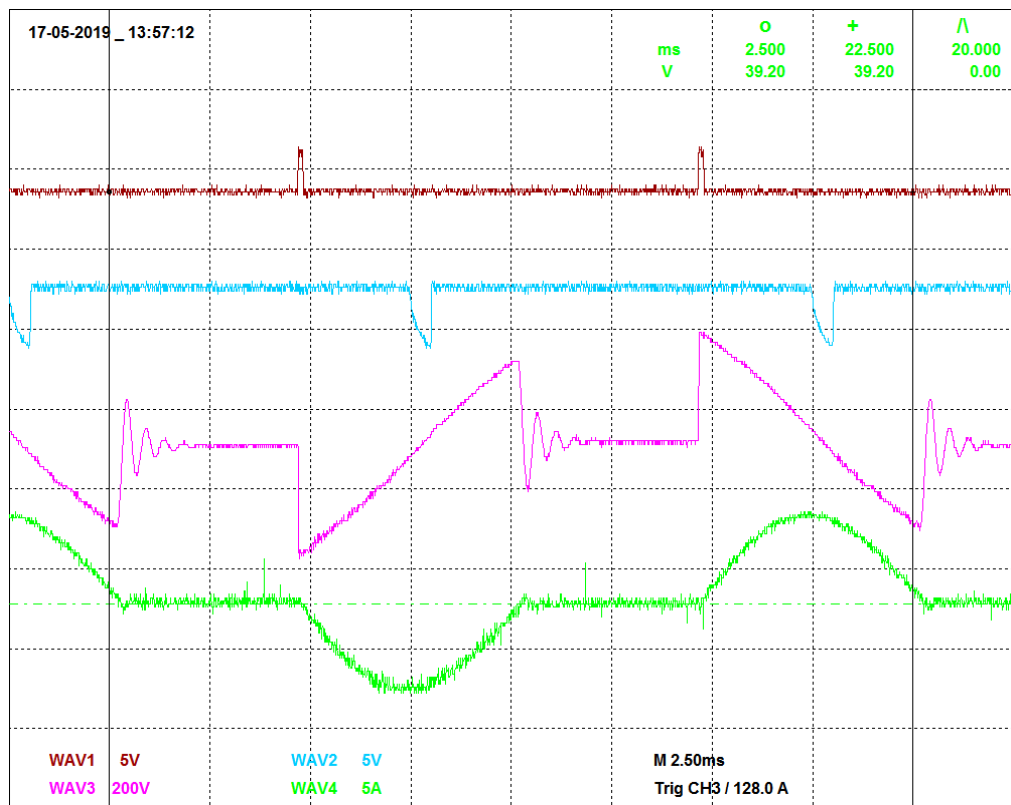
CH2 – Detekce průchodu nulou

CH3 – Napětí dekompenzační větve

CH4 - Proud dekompenzační větvi



Obrázek 42: Proud dekompenzační tlumivkou – řídicí úhel 120°



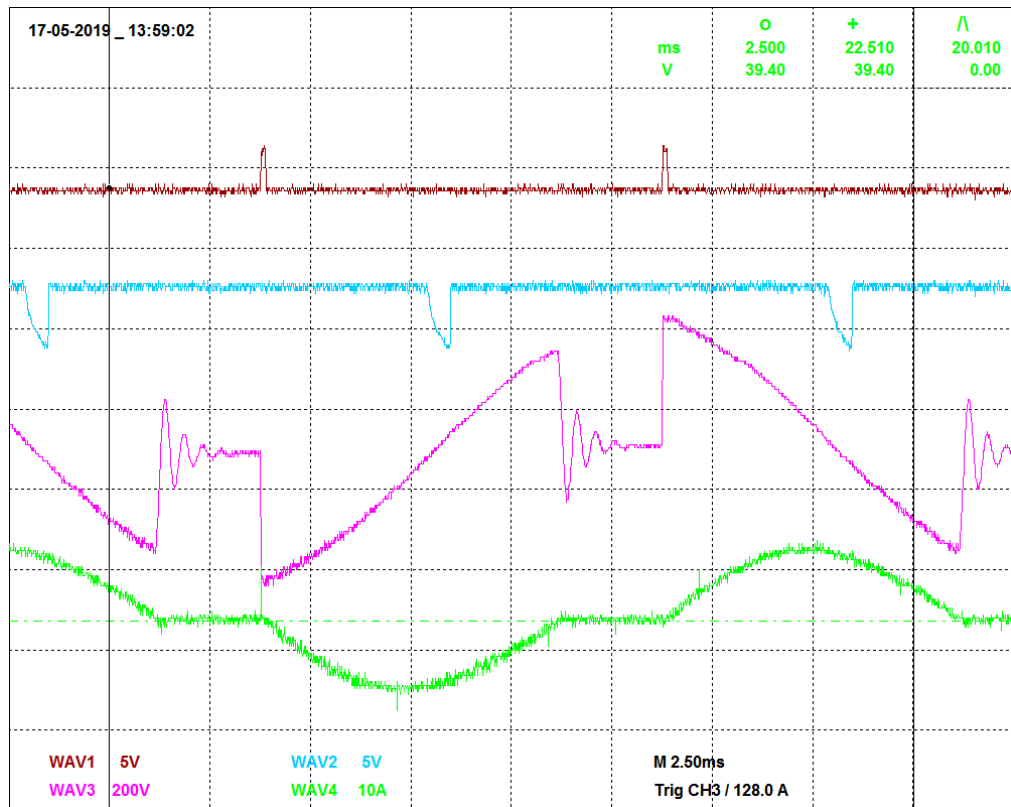
Obrázek 43: Proud dekompenzační tlumivkou – řídicí úhel 100°

CH1 – Řídicí pulzy

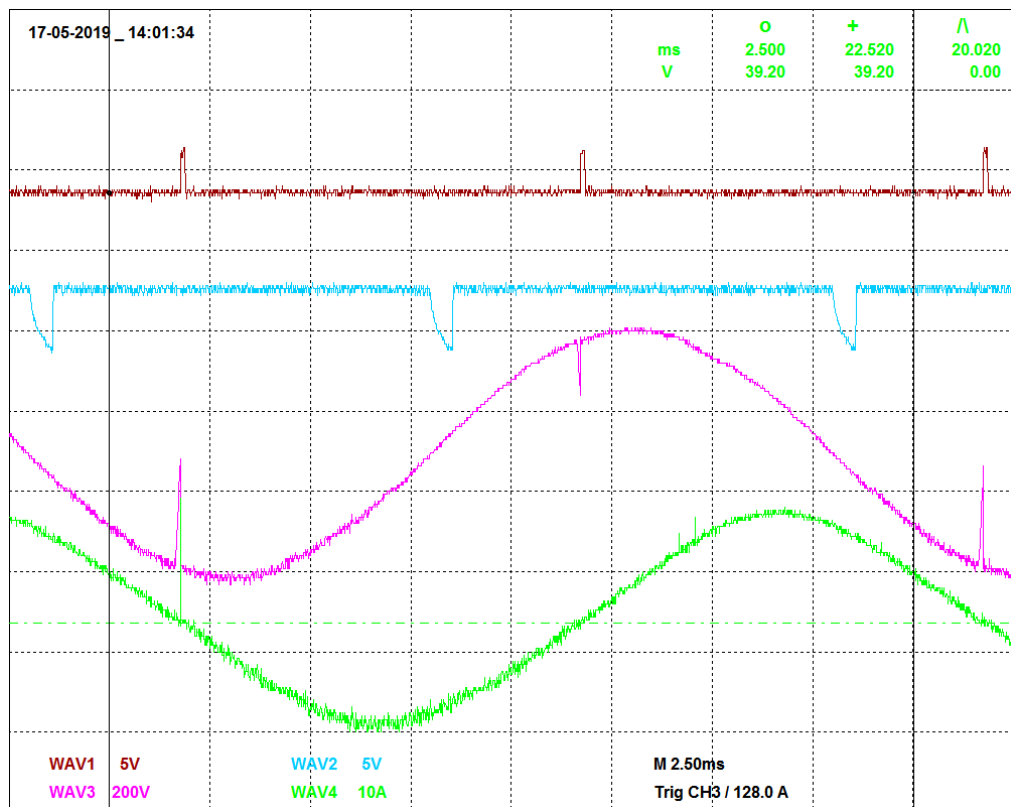
CH2 – Detekce průchodu nulou

CH3 – Napětí dekompenzační větve

CH4 - Proud dekompenzační větvi



Obrázek 44: Proud dekompenzační tlumivkou – řídicí úhel 80°

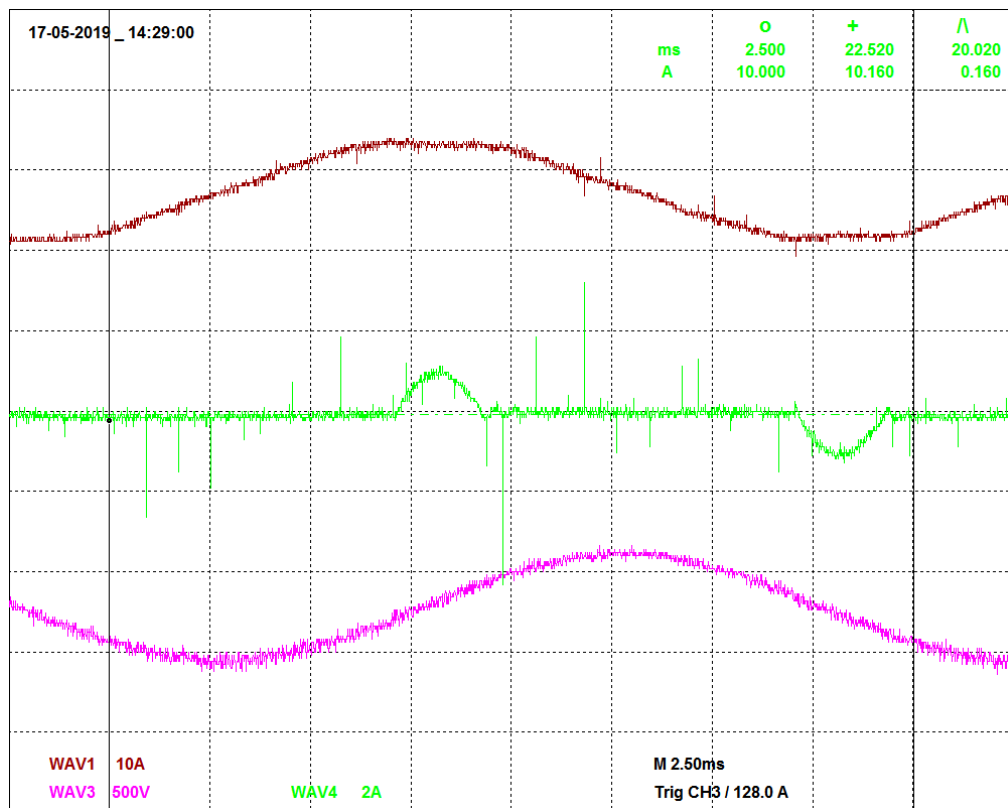


Obrázek 45: Proud dekompenzační tlumivkou – řídicí úhel 65°

7.2.2 Vliv nesinusového odběru Ldek na celkový odebíraný proud

Fázovým řízením napětí na dekompenzační indukčnosti je sice docíleno „řízení“ induktivního jalového výkonu, ovšem při spínání dochází k nesinusovému odběru jak napětí, tak proudu. Nesinusový odběr poté způsobuje deformaci celkového proudu odebíraného modelem FKZ (i skutečným FKZ), což způsobuje deformaci síťového napětí a produkci vyšších harmonických. Zařízení jako takové tedy filtruje nejen vyšší harmonické produkované trakčními vozidly, ale i samo sebou. Na následujících obrázcích jsou uvedeny oscilogramy odebíraného proudu dekompenzační větví a celkový proud odebíraný modelem FKZ, při různém řídicím úhlu.

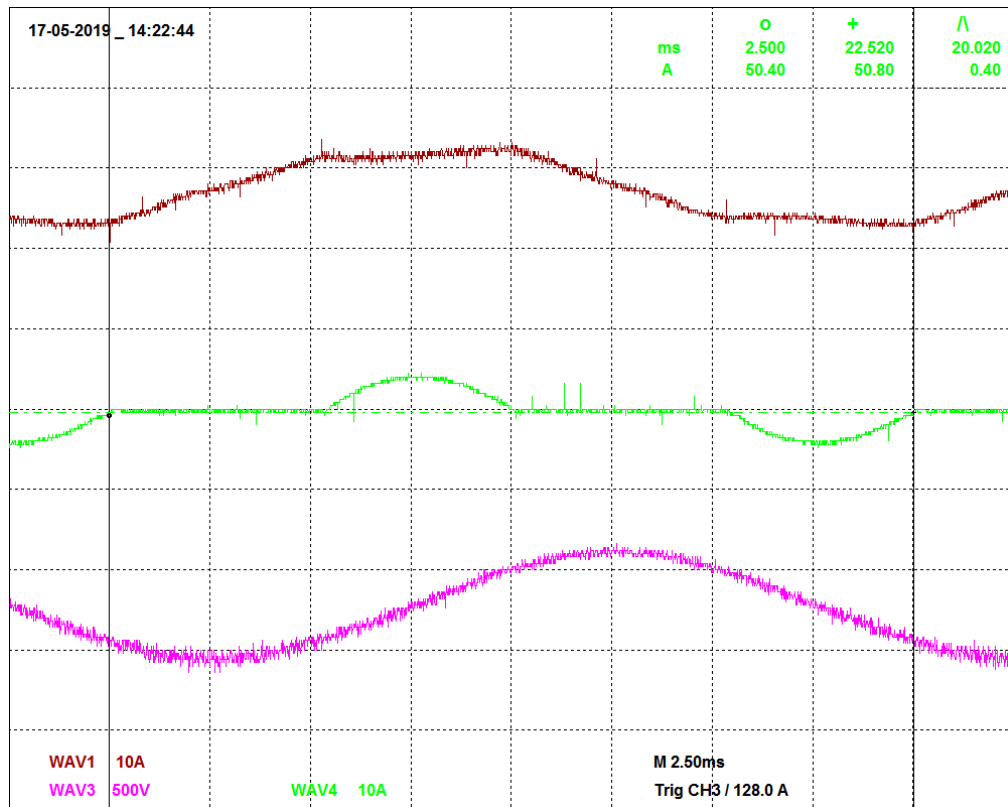
CH1 – Proud odebíraný modelem FKZ CH4 - Proud dekompenzační větví
CH3 – Napětí odebírané modelem FKZ



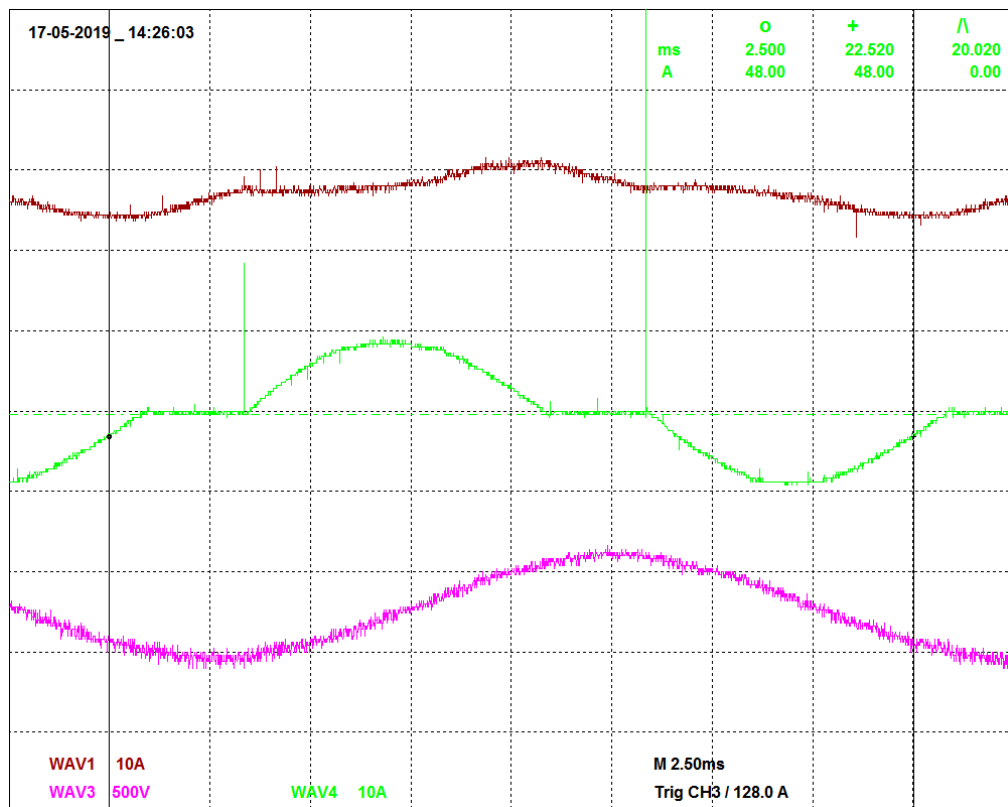
Obrázek 46: Proud odebíraný modelem FKZ – řídicí úhel 120°

CH1 – Proud odebíraný modelem FKZ *CH4* - Proud dekompenzační větvi

CH3 – Napětí odebírané modelem FKZ



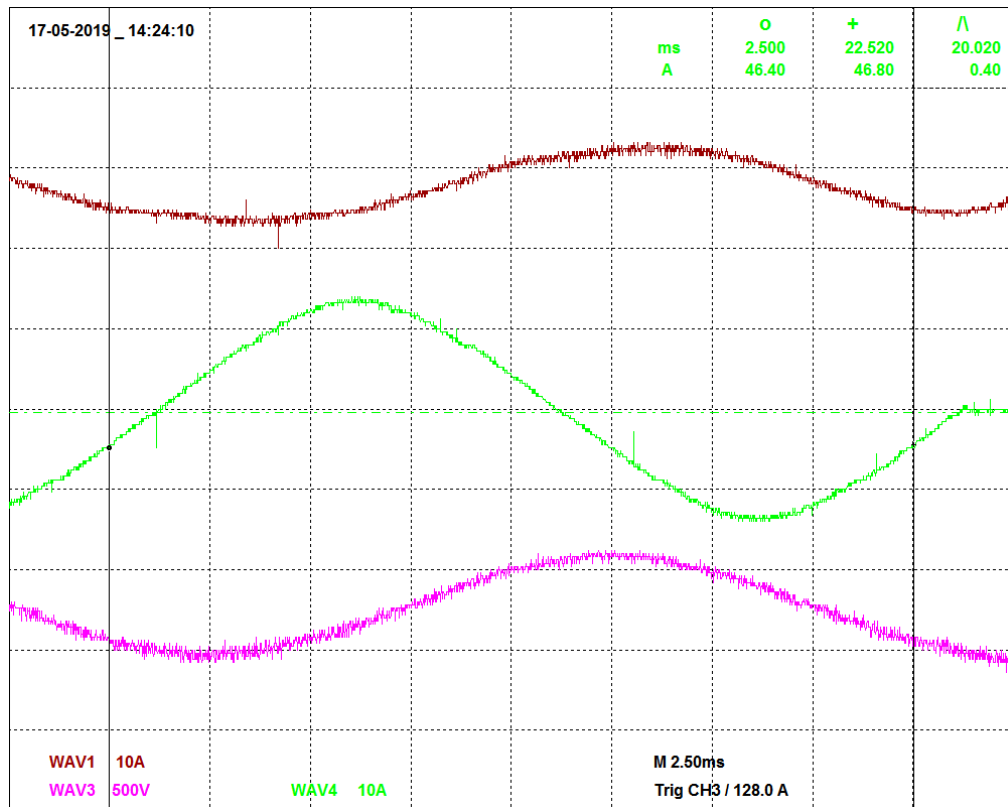
Obrázek 47: Proud odebíraný modelem FKZ – řídicí úhel 100°



Obrázek 48: Proud odebíraný modelem FKZ – řídicí úhel 80°

CH1 – Proud odebíraný modelem FKZ *CH4 - Proud dekompenzační větvi*

CH3 – Napětí odebírané modelem FKZ



Obrázek 49: Proud odebíraný modelem FKZ – řídicí úhel 65°

7.3 Ověření funkce modelu FKZ

Model by měl plnit stejné funkce, jako plní skutečné FKZ. Tedy eliminovat složky vyšších proudových harmonických produkovaných vozidly střídavé trakce a kompenzovat odebíraný jalový výkon tak, aby účinník byl v mezích 0,95 - 0,98 induktivního charakteru.

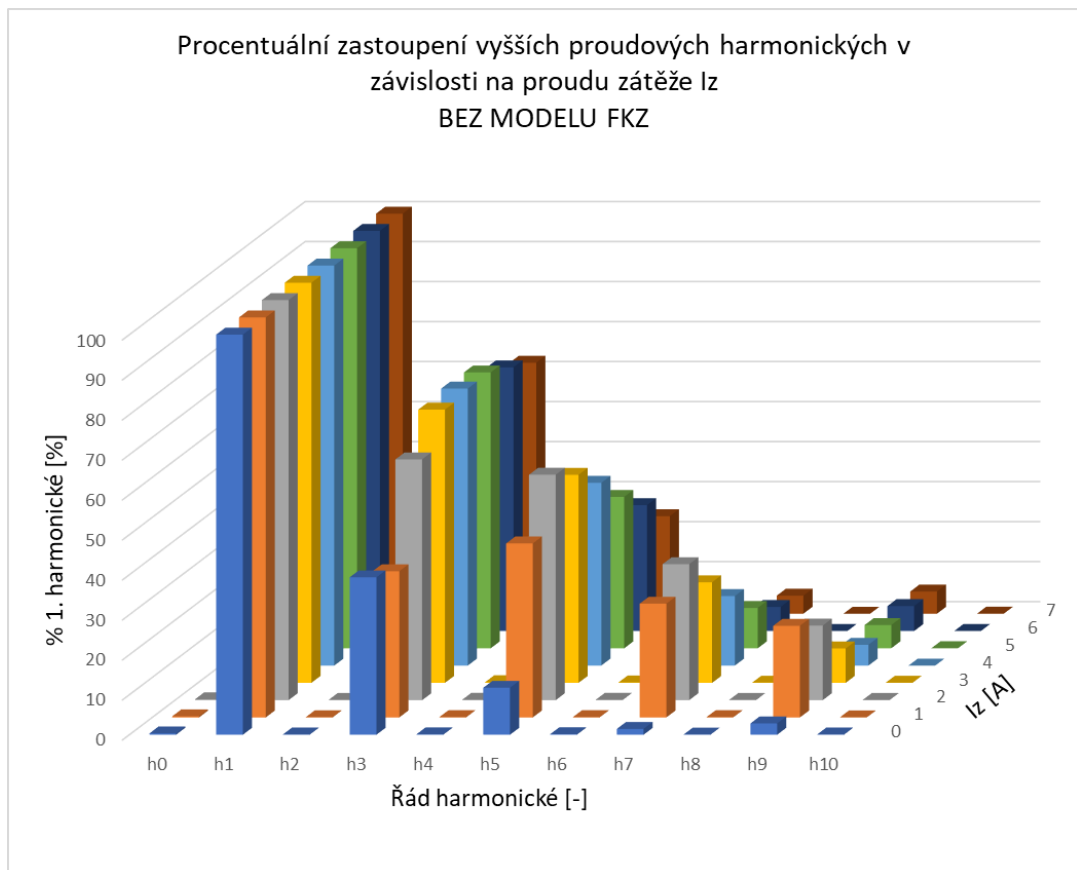
Pro ověření těchto parametrů byla zvolena koncepce pohonu s pulzním měničem napětí, stejně jako tomu bylo v teoretické části, kde bylo tohoto „typu vozidla střídavé trakce“ využito pro stanovení kompenzačního výkonu a dalších parametrů navrhovaného modelu FKZ. Model by samozřejmě fungoval i pro jiné koncepce pohonu jako odbočkovou regulaci, či tyristorovou regulaci obdobných výkonových parametrů.

Koncepce pohonu s pulzním měničem napětí byla zvolena i z toho důvodu, že svým principem je totožná se spínanými zdroji. Spínané zdroje jsou dnes hojně využívány téměř v každém elektronickém zařízení, což přispívá k deformaci síťového napětí. Analogicky by tedy bylo vhodné řešit tuto problematiku i u veřejných distribučních sítí.

Pro ověření funkčnosti modelu FKZ byly provedeny tři typy měření. První měření spočívalo v měření zpětných vlivů regulace pohonu s pulzním měničem napětí na elektrickou síť (pododdíl 7.3.1). Druhé měření probíhalo s totožným zapojením, avšak s připojenými filtračně-kompenzačními větvemi v obvodu sekundárního vinutí trakčního transformátoru (pododdíl 7.3.2). Při posledním měření byla do obvodu připojena i dekompenzační větev (pododdíl 7.3.3). Schéma zapojení pracoviště je uvedeno v příloze I.

7.3.1 Regulace pohonu pulzním měničem napětí bez připojeného modelu FKZ

Hodnoty naměřené při této konfiguraci zapojení jsou uvedeny v příloze J. Na výkonovém analyzátoru, který byl připojen na primární straně trakčního transformátoru, byly sledovány především vyšší proudové harmonické, které jsou přenášeny zpět do sítě. Na obrázku 50 je uveden graf, který ukazuje podíl vyšších harmonických⁵ při různém proudu zátěže (různém proudu pulzním měničem).



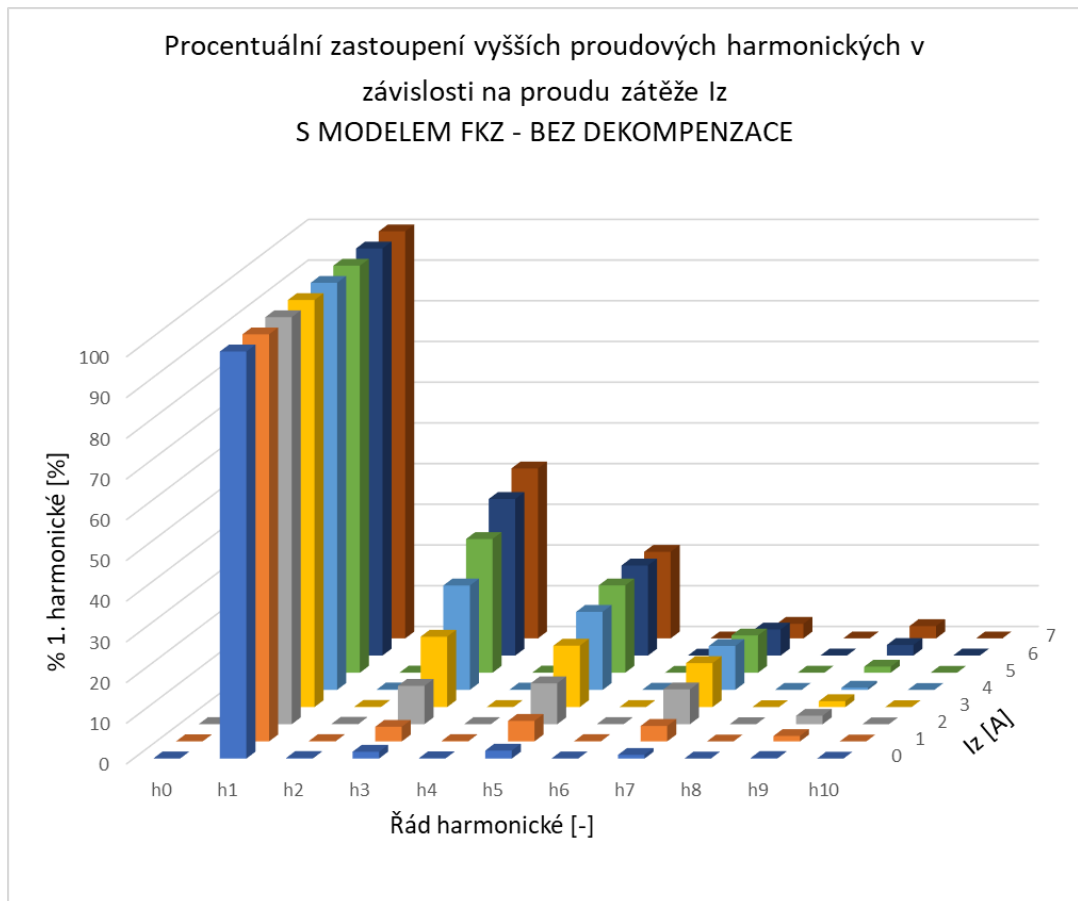
Obrázek 50: Podíl vyšších proudových harmonických produkovaných při regulaci pohonu pulzním měničem napětí – BEZ MODELU FKZ

⁵ Procentuální zastoupení vůči 1. harmonické základního kmitočtu, která představuje 100 %. Dosahuje-li 3. harmonická 61 % znamená to, že proud 3. harmonické dosahuje hodnoty 61 % proudu 1. harmonické.

Z grafu je patrný výskyt především lichých harmonických. Vznik lichých harmonických je typický pro dvoupulzní diodový usměrňovač.

7.3.2 Regulace pohonu pulzním měničem napětí s připojeným modelem FKZ – bez dekompenzační větve

U tohoto měření byly připojeny filtračně-kompenzační LC větve modelu FKZ. Na obrázku 51 je uveden graf, který opět ukazuje podíl vyšších proudových harmonických.

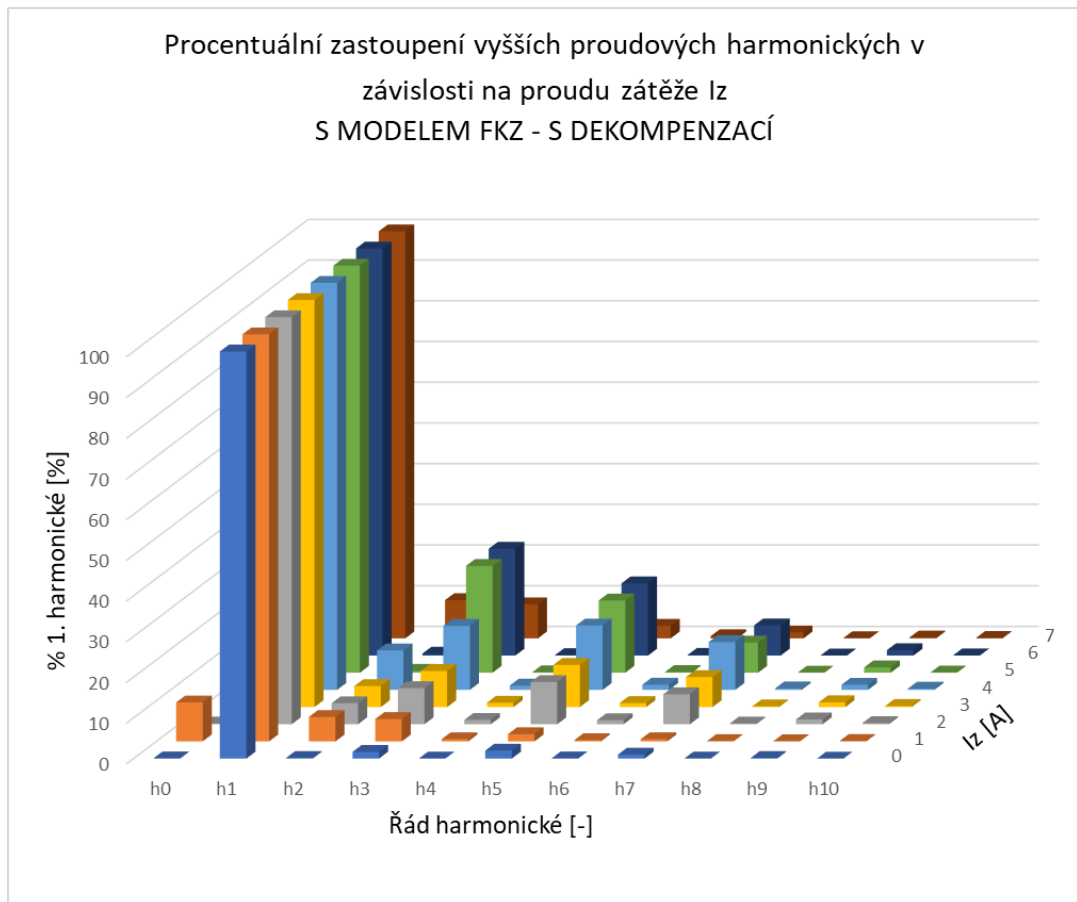


Obrázek 51: Podíl vyšších proudových harmonických produkovaných při regulaci pohonu pulzním měničem napětí – S MODELEM FKZ – BEZ DEKOMPENZACE

Na grafu je vidět razantní pokles lichých harmonických oproti předchozímu měření. Při nízkém zatěžovacím proudu je jejich zastoupení téměř nulové. S rostoucím proudem zátěže roste i úhel překrytí (doba komutace diod). Velikost úhlu překrytí má přímý vliv na generování vyšších harmonických, neboť dochází k vedení více diod usměrňovače, a tedy ke skokovému nárůstu proudu („zkratu sekundárního vinutí trakčního transformátoru“). Tento nesinusový odběr poté způsobuje vznik vyšších harmonických.

7.3.3 Regulace pohonu pulzním měničem napětí s připojeným modelem FKZ – s dekompenzační větví

V posledním měření byla připojena i dekompenzační větev. Opět byl sledován výskyt lichých proudových harmonických v bodě připojení „trakční transformovny“ k síti. Na obrázku 52 je uveden graf zobrazující procentuální zastoupení těchto vyšších harmonických síťového kmitočtu.



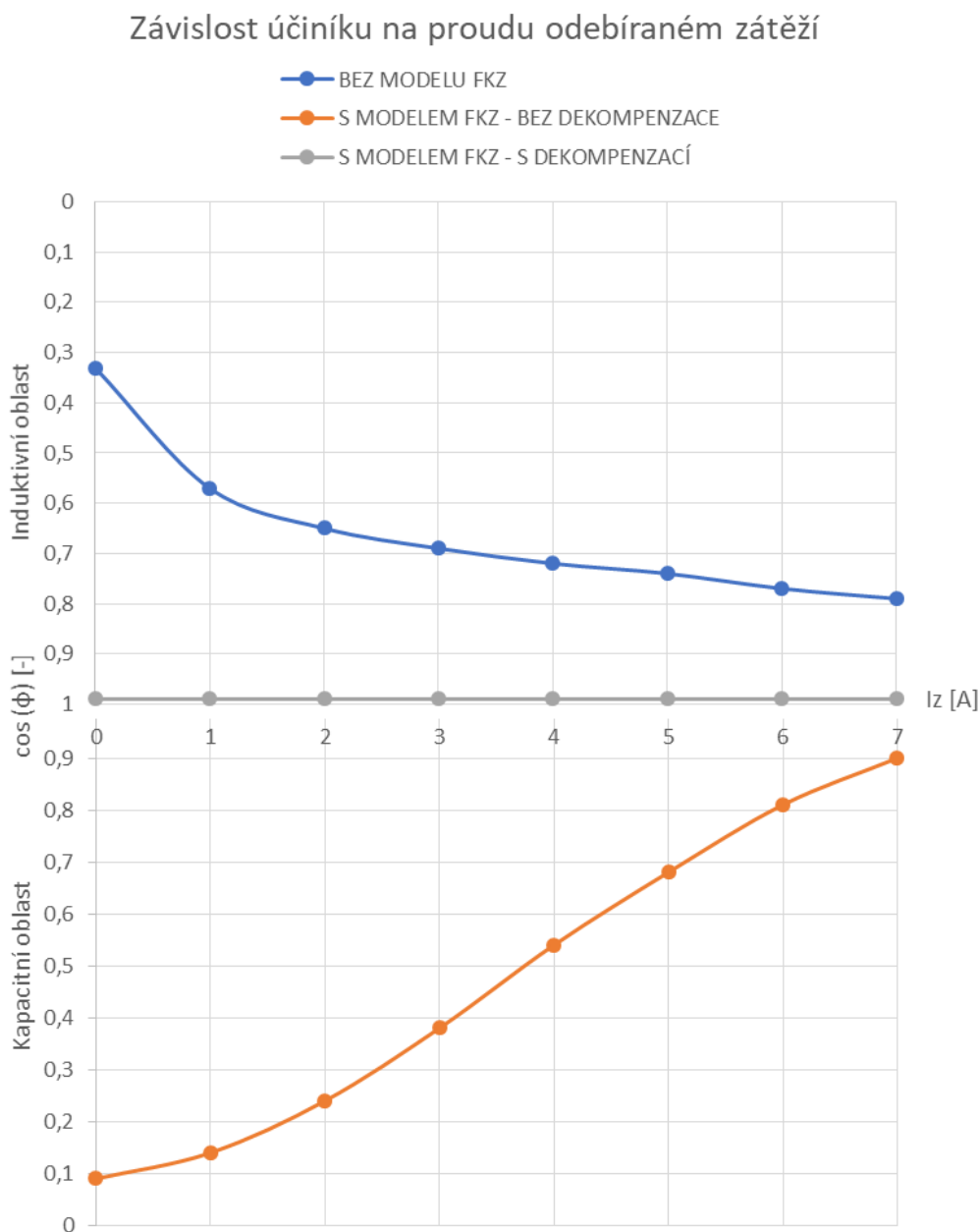
Obrázek 52: Podíl vyšších proudových harmonických produkovaných při regulaci pohonu pulzním měničem napětí – S MODELEM FKZ – S DEKOMPENZACÍ

Na grafu je opět patrný pokles lichých harmonických oproti předchozí měřené variantě (obrázek 51). To je způsobeno celkovým vyšším odebíraným činným výkonem sestavy jako celku. Dekompenzační tlumivce byl totiž z důvodů rozebranych v pododdíle 7.2.1 *Chování indukčnosti (L_{dek}) při fázovém řízení* předřazen odpor, který zapříčinil nárůst odebíraného činného výkonu. Jelikož výkonový analyzátor vztahuje velikosti vyšších harmonických k velikosti 1. harmonické, jeví se to, jako by došlo k jejich poklesu. Jejich absolutní hodnota by však měla zůstat stejná, jako u předchozího měření, což ostatně více či méně potvrzují i velikosti proudů sledovaných harmonických (3., 5., 7.), které byly z procentuálního

zastoupení dopočítány. Hodnoty těchto proudů jsou uvedeny v přílohách J, K a L spolu s naměřenými hodnotami.

7.3.4 Porovnání naměřených údajů

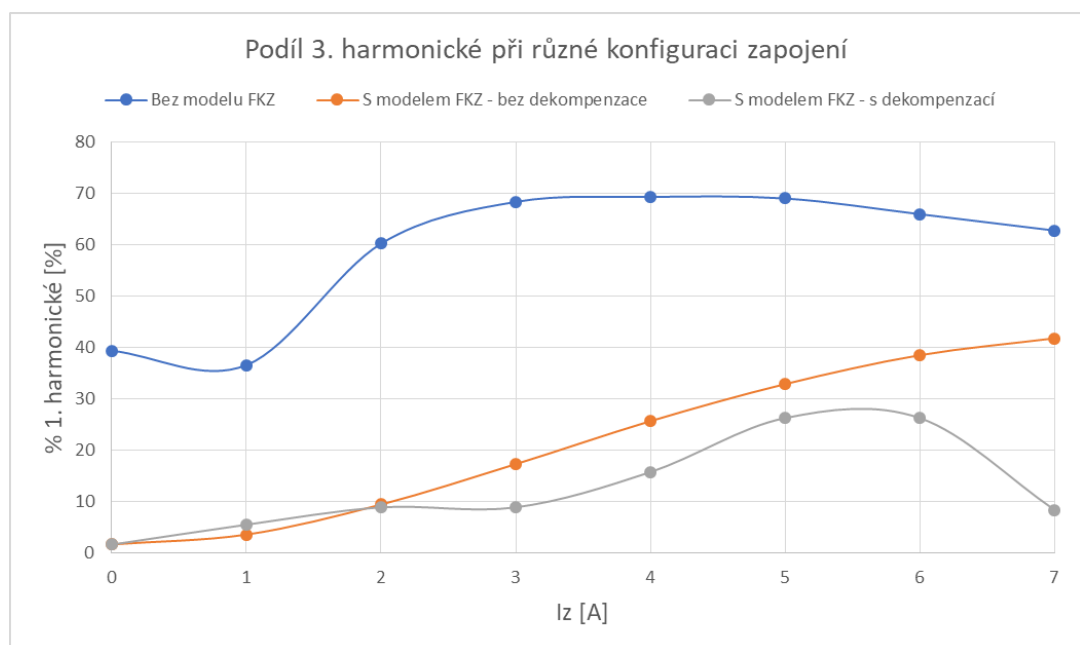
V tomto pododdíle jsou porovnány údaje získané při provedených měřeních. Obrázek 53 ukazuje závislost účinníku na proudu odebíraném zátěží. V grafu jsou vyneseny křivky pro všechny tři varianty provedených měření.



Obrázek 53 Závislost účinníku na proudu zátěže při různých konfiguracích zapojení

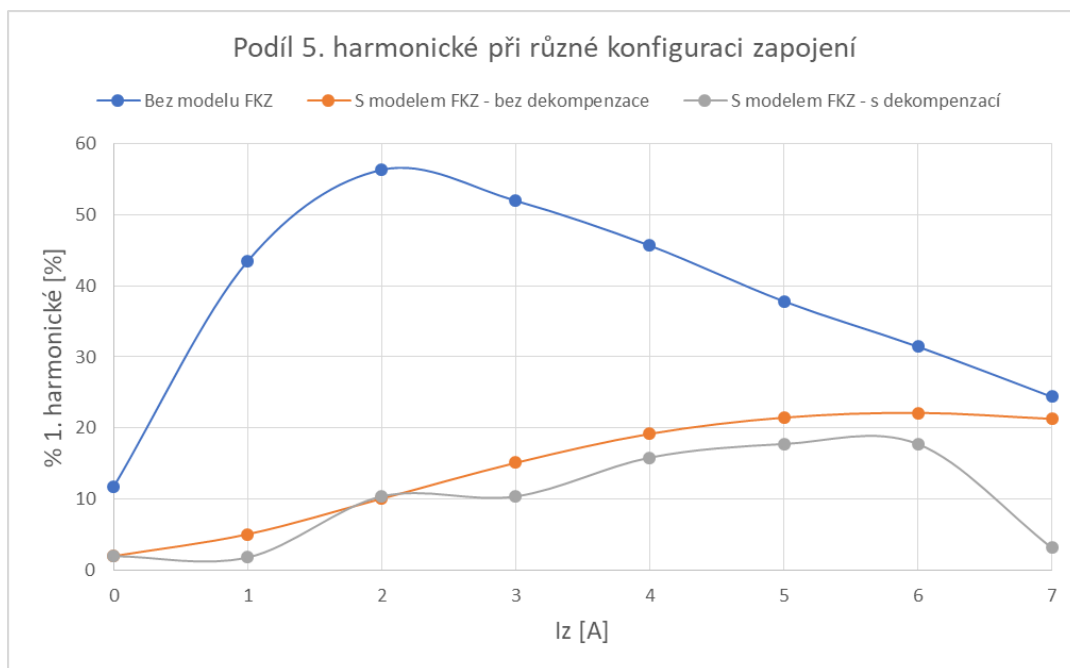
Modrá křivka znázorňuje účinník při měření bez připojeného modelu FKZ. Účinník se pohybuje v induktivní oblasti, avšak dosahuje velice špatných hodnot 0,3 – 0,8. Oranžová křivka představuje účinník při měření s připojenými kompenzačními větvemi. Je vidět, že kompenzační kapacity kompenzují induktivní jalový výkon, což je požadováno. Avšak při nízkých zatěžovacích proudech dochází k překompenzování a účinník se vlivem toho pohybuje v kapacitní oblasti v rozmezí 0,1 – 0,9. Šedá křivka představuje variantu, kdy je připojena i dekompenzační větev. Díky fázovému řízení dekompenzační indukčnosti se podařilo dosáhnout konstantní hodnoty účinníku 0,95 v induktivní oblasti.

Na dalších obrázcích (54, 55, 56) je uvedeno porovnání podílů 3., 5. a 7. harmonické v závislosti na zatěžovacím proudu a konfiguraci zapojení.



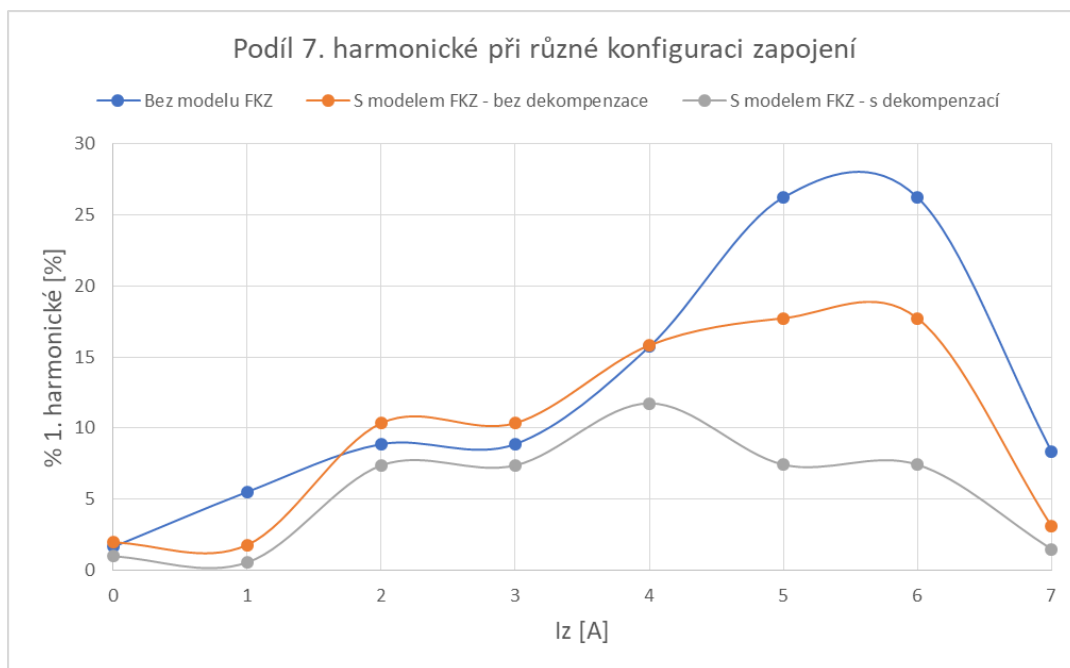
Obrázek 54 Závislost 3. harmonické na proudu zátěže při různých konfiguracích zapojení

Na obrázku je patrný razantní pokles 3. harmonické po připojení filtračních LC větví (oranžová křivka).



Obrázek 55 Závislost 5. harmonické na proudu zátěže při různých konfiguracích zapojení

Opět je viditelný pokles, tentokrát 5. harmonické, vlivem připojení filtračních větví. Další obrázek uvádí porovnání 7. harmonické. Zde už účinek není tak markantní, přesto k poklesu dochází.



Obrázek 56 Závislost 7. harmonické na proudu zátěže při různých konfiguracích zapojení

Lze tedy konstatovat, že sestrojený model FKZ splňuje body stanovené v teoretické části práce.

Na obrázcích 57, 58, 59 jsou oscilogramy, které ukazují průběhy napětí a proudu na svorkách trakční transformovny (t.t.), proud odebíraný pulzním měničem a proudy jednotlivých LC větví. Řídicí úhel byl ve všech případech nastaven na 80° . Proud zátěže byl nastaven na 0; 3,5 a 7 A.

CH1 – Napětí na svorkách t.t.

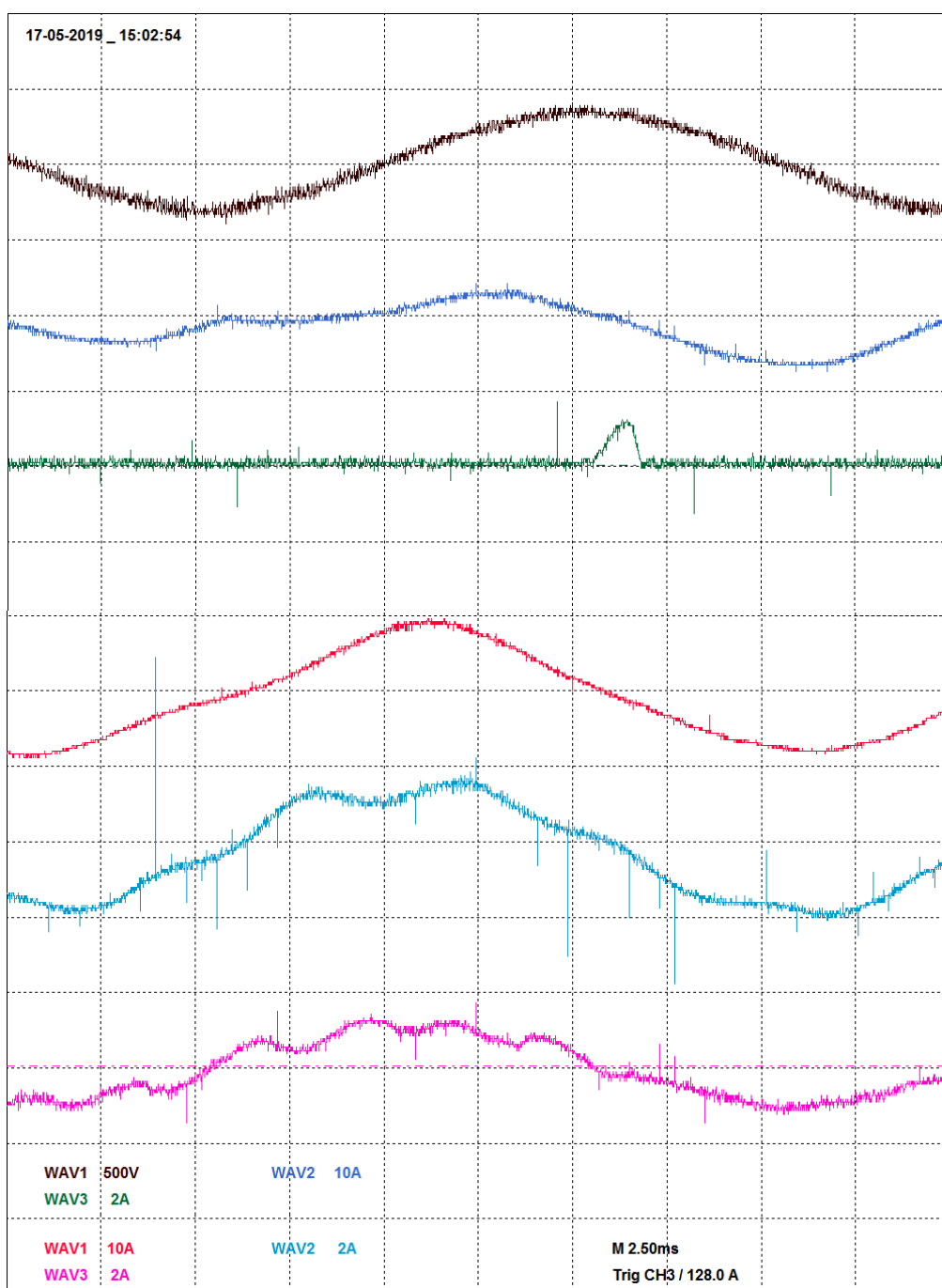
CH2 - Proud na svorkách t.t.

CH3 – Proud pulzním měničem

CH4 - Proud LC větví 3. harmonické

CH5 - Proud LC větví 5. harmonické

CH6 - Proud LC větví 7. harmonické



Obrázek 57 Průběhy napětí a proudů v jednotlivých částech obvodu – $I_z = 0$ A

CH1 – Napětí na svorkách t.t.

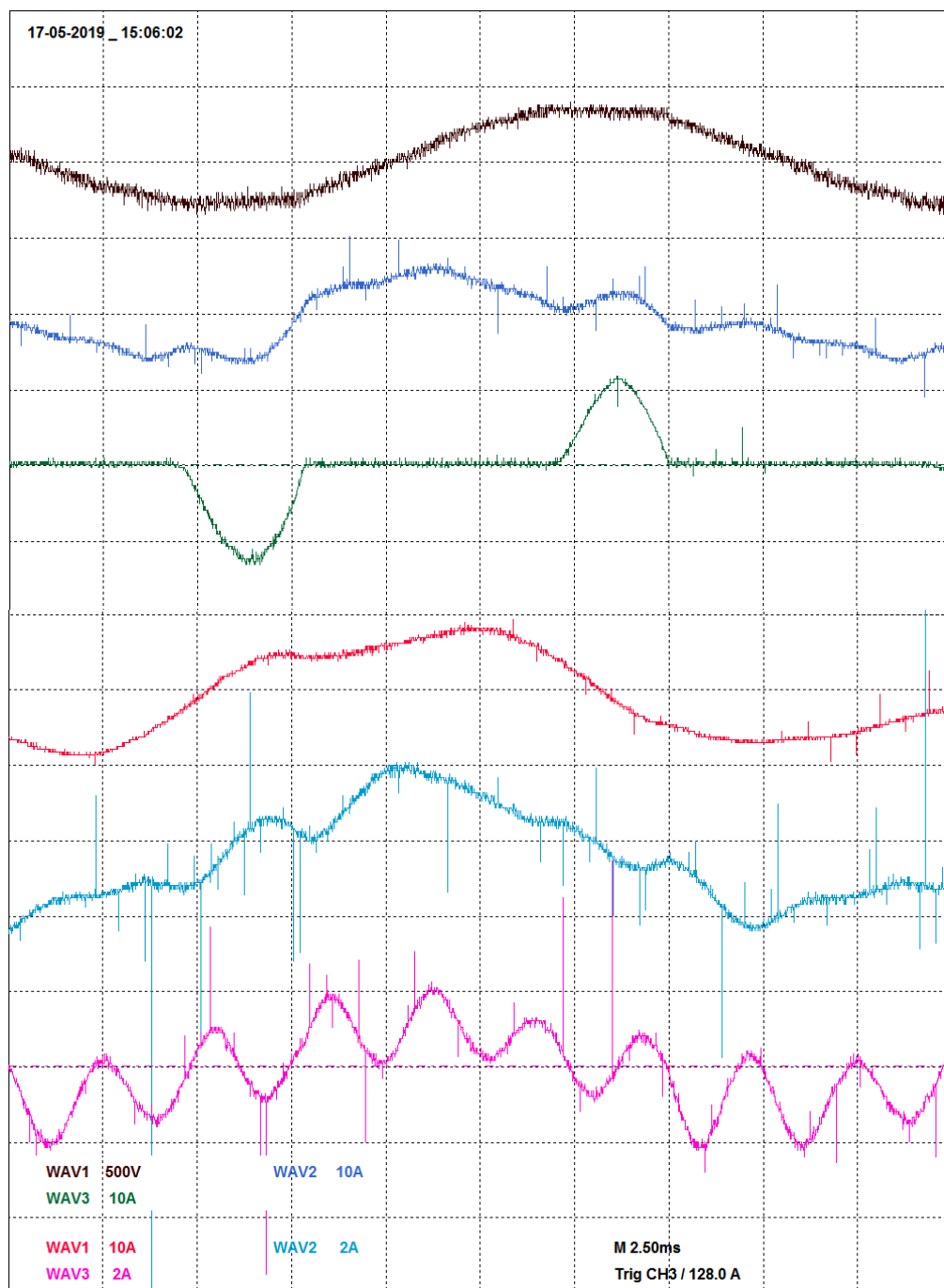
CH2- Proud na svorkách t.t.

CH3 – Proud pulzním měničem

CH4 - Proud LC větví 3. harmonické

CH5 - Proud LC větví 5. harmonické

CH6 - Proud LC větví 7. harmonické



Obrázek 58 Průběhy napětí a proudů v jednotlivých částech obvodu – $I_z = 3,5 \text{ A}$

CH1 – Napětí na svorkách t.t.

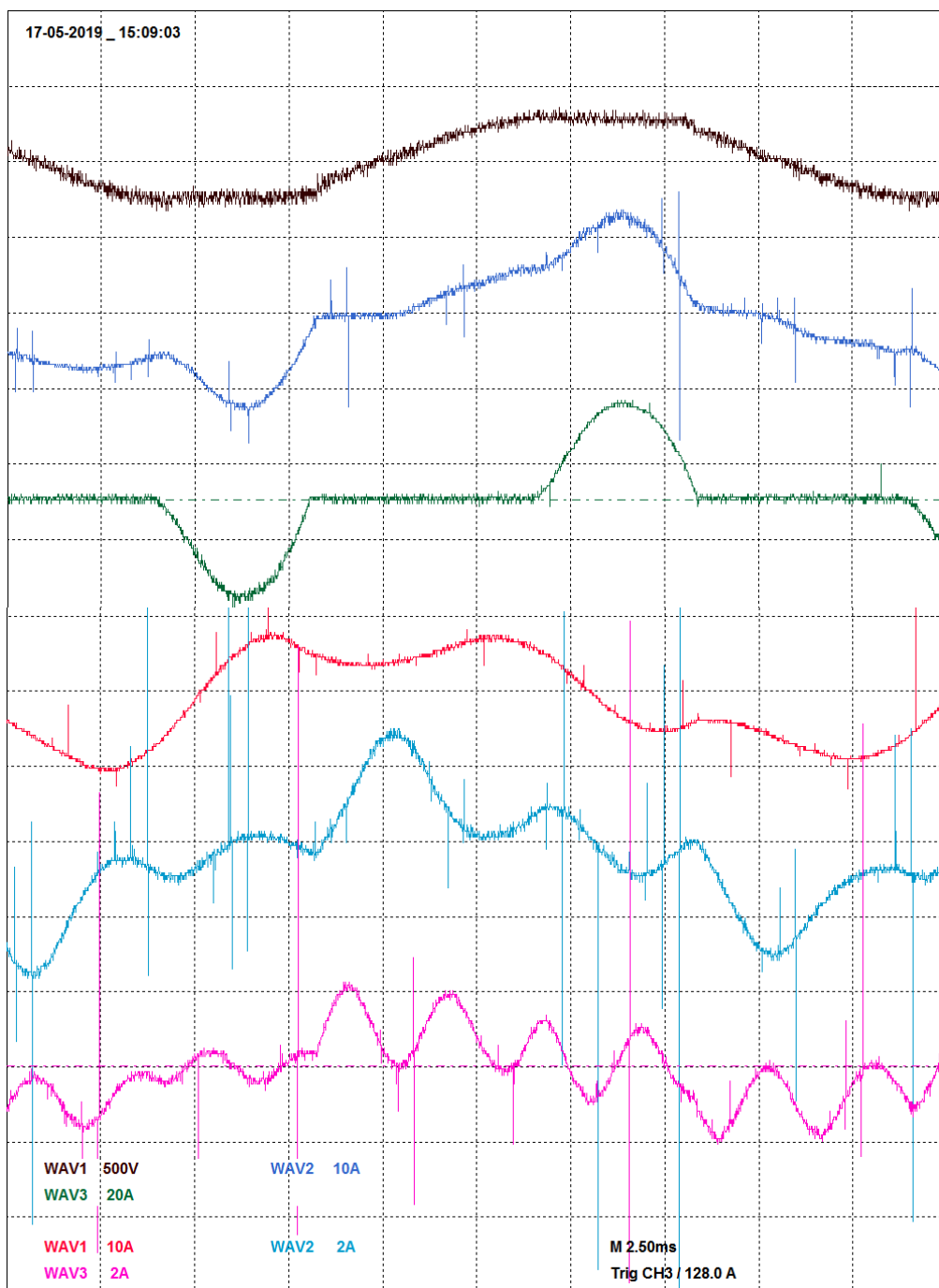
CH2- Proud na svorkách t.t.

CH3 – Proud pulzním měničem

CH4 - Proud LC větví 3. harmonické

CH5 - Proud LC větví 5. harmonické

CH6 - Proud LC větví 7. harmonické



Obrázek 59 Průběhy napětí a proudů v jednotlivých částech obvodu – $I_z = 7 \text{ A}$

Z průběhů proudů LC větvemi je patrné, jak s rostoucím zatížením pulzního měniče napětí narůstají i rušivé proudy tekoucí filtračními větvemi. I přesto dochází k deformaci celkového odebíraného proudu i napětí na svorkách trakční transformovny.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo početně navrhnout prvky modelu FKZ do podmínek laboratoří a realizovat toto zařízení po stránce elektrické, softwarové i mechanické. Mezi další cíle patřilo model oživit, proměřit jeho parametry a ověřit funkčnost.

Za účelem získání vstupních dat pro provedení výpočtů bylo třeba provést několik měření. Jednalo se o měření řízení pohonu pulzním měničem napětí (pro zjištění zpětných vlivů této regulace na veřejnou elektrickou síť) a měření na transformátoru užívaném k simulacím regulací pohonů (měření na krátko a na prázdno - pro zjištění náhradních parametrů).

Na základě zjištěných parametrů laboratorní „trakční transformovny“ byly provedeny výpočty, které nakonec vedly k určení kapacit a indukčností modelu FKZ. Podle těchto vypočtených hodnot byly vytipovány konvenční motorové kondenzátory, ze kterých byly následně složeny kapacity jednotlivých větví. K těmto vytipovaným kapacitám byly poté zpětně dopočítány indukčnosti tak, aby byly filtry naladěny na hodnoty harmonických základního kmitočtu, které má zařízení FKZ eliminovat. Z hlediska vlastností by bylo vhodné použít tlumivky vzduchové. Avšak tyto tlumivky se nepodařilo zajistit, proto byly použity tlumivky s železným jádrem ze zásob KEEZ.

Pro částečné ověření výpočtů bylo provedeno kontrolní měření, kde byla z dostupných součástek laboratoře postavena provizorní větev 3. harmonické. Schéma měřicího pracoviště je uvedeno v příloze C. Naměřená data (viz příloha E) ukazují pokles procentuálního zastoupení⁶ 3. harmonické proudu z průměrných 61 % (bez filtru) na 17 % (s filtrem). Bylo tedy ověřeno, že výpočty jsou správné.

Následovalo navržení elektrické části modelu, především řídicí jednotky, která má za úkol pomocí fázové regulace řídit velikost dekompenzační tlumivky. Souběžně také probíhal návrh řídicího SW. Proto byl postaven nejprve prototyp na nepájivém poli, kde byly na bezpečném napětí testovány dílčí části zapojení i algoritmů.

Po odladění jedné větve SW (režimu „ručního řízení“) a stěžejních obvodových zapojení (navázání triaku na MCU, detekce průchodu napětí nulou) byla navržena a vyrobena deska plošných spojů. Následovalo osazení všech součástek, oživení a nastavení řídicí jednotky v laboratoři. Nakonec byl nahrán řídicí SW.

⁶ Procentuální zastoupení vůči 1. harmonické základního kmitočtu, která představuje 100 %. Dosahuje-li 3. harmonická 61 % znamená to, že proud 3. harmonické dosahuje hodnoty 61 % proudu 1. harmonické.

Dále byl proveden návrh silového zapojení a mechanické konstrukce celého zařízení. Následovala výroba šasi, zapojení silových obvodů a zapojení řídicí jednotky. Opět následovalo postupné oživení a testování vyrobeného zařízení.

Podařilo se docílit funkčnosti modelu v „ručním režimu“ (regulace dekompenzační indukčnosti potenciometrem) a v režimu „blokováno“. V „automatickém režimu“ není model schopen dosáhnout plného otevření triaku a tedy dekompenzace účinníku na požadovanou hodnotu. Bylo zjištěno, že dochází k četnějšímu výskytu pulzů signalizujících průchod proudu nulou než jednou za půlperiodu. Jelikož řídicí jednotka měří čas mezi průchody napětí a proudu nulou, vyhodnocuje, že již kompenzuje na požadovanou hodnotu časového rozdílu (požadovaná hodnota je 0), což ve skutečnosti není pravda. Původ těchto falešných průchodů lze hledat v celkovém odebíraném proudu (například na obrázku 58 – proud na svorkách trakční transformovny), který je snímán proudovým senzorem. Tento proud je totiž deformovaný a není sinusový. Obvody, které mají detekovat průchod proudu nulou proto nepracují správně a vyhodnocují falešné průchody. Možné řešení tohoto problému by mohlo být hledáno v úpravě řídicího SW. Ten by obsahoval algoritmus, který by po zaznamenání průchodu nulou ignoroval další průchody po dobu jedné půlperiody. Otázkou však zůstává, jak rozpoznat ten správný průchod nulou.

Pro otestování vyrobeného modelu FKZ bylo znovu sestaveno celé měřicí pracoviště. Schéma zapojení je uvedeno v příloze I, v příloze M je k vidění fotografie tohoto pracoviště. Tentokrát však místo větve 3. harmonické již bylo zapojeno kompletní vyrobené filtračně-kompenzační zařízení. Následovalo provedení několika měření (měření bez připojeného modelu FKZ, měření s připojeným modelem FKZ – bez dekompenzační větve a měření s připojeným modelem FKZ – s dekompenzační větví). Naměřené hodnoty byly vyneseny do grafů a spolu s výsledky, které z nich vyplývají, jsou postupně popsány v kapitole *7 Laboratorní zkoušky modelu FKZ*.

Z naměřených hodnot i grafů vyplývá, že navržený model filtračně-kompenzačního zařízení je funkční. Grafy ukazují pokles procentuálního zastoupení 3. harmonické proudu z průměrných 59 % (bez modelu FKZ) na 20 % (s modelem FKZ). U 5. harmonické je pokles z průměrných 38 % na 15 %, a u 7. harmonické z průměrných 16 % na 7 %.

Bylo tedy ověřeno, že navržený a zrealizovaný model FKZ významně omezuje zpětné vlivy regulace střídavých pohonů, a že regulací dekompenzační indukčnosti je docíleno udržení účinníku v mezích stanovených distributorem elektrické energie.

Seznamy

Seznam použité literatury

ASM Series - Current Sensor for 50/ 60 Hz. In: *Tme.eu* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/4bf379646b30b1f30becba759f9411ed/asm_series.pdf

CNY17F – Phototransistor, 2005. In: *Tme.eu* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/2f394b67f86c021e1508e89d181fd514/cny17f.pdf>

Filtračně kompenzační stanice, 2018. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Filtra%C4%8Dn%C4%9B_kompenza%C4%8Dn%C3%AD_stanice#Popis_funkce_a_zapojen%C3%AD_FKZ

HLAVA, Karel a Pavel ŠEDIVÝ, 2004. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení*. Pardubice: Univerzita Pardubice. ISBN 80-7194-637-0.

JENÍČEK, Petr, 2009a. Přibližné výpočty vzduchových cívek. *Radioamatérská dílna* [online]. Česká republika: volny.cz. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <http://pjenicek.sweb.cz/radio/clanky/vypoctcivky1.html#Liter>

JENÍČEK, Petr, 2009b. Optimální rozměry jednovrstvových cívek. *Radioamatérská dílna* [online]. Česká republika: volny.cz. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <http://pjenicek.sweb.cz/radioprevzate/optcivk1.html>

KUBÁČ, Petr, 2017. Poznámka k usměrňovačům. *Nekorektní blog Petra Kubáče* [online]. 2011-. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://petr-kubac.blog.cz/1708/poznamka-k-usmernovacum>

SRPASSIVES. CBB60 AC motor capacitor. In: *TME Electronic Components* [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: https://www.tme.eu/cz/Document/1f6350e5db2c5e4ac79d0609de793b5b/SR_PASSIVES-CBB60-A-B-C-D-E.pdf

HANKOVEC, David, 2002-2019. Univerzální stmívač. *Dhservis* [online]. 2002-. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://dhservis.cz/dalsi/stmivac.htm#0>

SMÉKAL, František, Miroslav HORÁLEK a Miroslav BÁRTA, 1983. *Zařízení pro měření účinníku*. ČSSR. 239283 G01R 25/00. Uděleno 15.5.1985. Zapsáno 23.8.1983.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Principiální zapojení vybraných modelů vozidel střídavé trakce s odbočkovou regulací, tyristorovou regulací a pulzním měničem napětí.....	11
Obrázek 2: Principiální zapojení moderního vozidla střídavé trakce.....	11
Obrázek 3: Principiální schéma FKZ používaného SŽDC.....	13
Obrázek 4: Principiální schéma modelu FKZ navrhnutého v této práci.....	13
Obrázek 5: Výkonový trojúhelník.....	14
Obrázek 6: Zjednodušené náhradní schéma transformátoru.....	15
Obrázek 7: Štítek transformátoru.....	15
Obrázek 8: Průběh reaktance (impedance) X_{TNS} v závislosti na frekvenci (Filtračně-kompenzační stanice, 2018).....	18
Obrázek 9: Provedení vybraných kondenzátorů (SRPassives).....	23
Obrázek 10: Nákres jednovrstvé vzduchové cívky.....	28
Obrázek 11: Nákres vícevrstvé vzduchové cívky.....	29
Obrázek 12: Zapojení silové části.....	32
Obrázek 13: Elektrické zapojení modelu FKZ.....	33
Obrázek 14: Blokové schéma řídicí části.....	34
Obrázek 15: Zapojení symetrického napájení.....	35
Obrázek 16: Zapojení lineárního stabilizátoru.....	35
Obrázek 17: Detekce průchodu napájecího napětí nulou.....	36
Obrázek 18: Zapojení obvodu detekce průchodu napětí nulou.....	36
Obrázek 19: Převodní charakteristika proudového transformátoru ASM-020 (ASM Series - Current Sensor for 50/ 60 Hz).....	37
Obrázek 20: Zapojení proudového transformátoru a aktivního usměrňovače s OZ.....	38
Obrázek 21: Zapojení obvodu detekce průchodu proudu nulou.....	39
Obrázek 22: Zapojení přepínače automatického/ručního režimu řízení.....	40
Obrázek 23: Zapojení potenciometru pro ruční řízení.....	40
Obrázek 24: Zapojení obvodu pro spínání výkonového triaku.....	41
Obrázek 25: Návrh řídicí jednotky v programu EAGLE.....	42
Obrázek 26: Vyrobena a osazená řídicí jednotka – popis.....	42
Obrázek 27: Princip fázového řízení.....	44
Obrázek 28: Vývojové diagramy řídicího algoritmu.....	45
Obrázek 29: Synchronizační a řídicí pulzy – $\alpha = 180^\circ$	46

Obrázek 30: Synchronizační a řídicí pulz – $\alpha = 180^\circ$ - DETAIL	46
Obrázek 31: Výkres - bokorys	49
Obrázek 32: Výkres - čelní panel	50
Obrázek 33: Potisk - čelní panel	50
Obrázek 34: Výkres - zadní panel.....	51
Obrázek 35: Potisk - zadní panel	51
Obrázek 36: Fotografie vyrobeného šasi	52
Obrázek 37: Fotografie vyrobeného modelu FKZ – pohled zepředu	53
Obrázek 38: Fotografie vyrobeného modelu FKZ – pohled zezadu.....	53
Obrázek 39: Průběh proudů jednotlivými LC větvemi.....	55
Obrázek 40: Závislost účinníku na řídicím úhlu triaku	56
Obrázek 41: Závislost výkonů na řídicím úhlu triaku	57
Obrázek 42: Proud dekompenzační tlumivkou – řídicí úhel 120°	58
Obrázek 43: Proud dekompenzační tlumivkou – řídicí úhel 100°	58
Obrázek 44: Proud dekompenzační tlumivkou – řídicí úhel 80°	59
Obrázek 45: Proud dekompenzační tlumivkou – řídicí úhel 65°	59
Obrázek 46: Proud odebíraný modelem FKZ – řídicí úhel 120°	60
Obrázek 47: Proud odebíraný modelem FKZ – řídicí úhel 100°	61
Obrázek 48: Proud odebíraný modelem FKZ – řídicí úhel 80°	61
Obrázek 49: Proud odebíraný modelem FKZ – řídicí úhel 65°	62
Obrázek 50: Podíl vyšších proudových harmonických produkovaných při regulaci pohonu pulzním měničem napětí – BEZ MODELU FKZ.....	63
Obrázek 51: Podíl vyšších proudových harmonických produkovaných při regulaci pohonu pulzním měničem napětí – S MODELEM FKZ – BEZ DEKOMPENZACE.....	64
Obrázek 52: Podíl vyšších proudových harmonických produkovaných při regulaci pohonu pulzním měničem napětí – S MODELEM FKZ – S DEKOMPENZACÍ	65
Obrázek 53 Závislost účinníku na proudu zátěže při různých konfiguracích zapojení	66
Obrázek 54 Závislost 3. harmonické na proudu zátěže při různých konfiguracích zapojení ...	67
Obrázek 55 Závislost 5. harmonické na proudu zátěže při různých konfiguracích zapojení ...	68
Obrázek 56 Závislost 7. harmonické na proudu zátěže při různých konfiguracích zapojení ...	68
Obrázek 57 Průběhy napětí a proudů v jednotlivých částech obvodu – $I_z = 0$ A.....	69
Obrázek 58 Průběhy napětí a proudů v jednotlivých částech obvodu – $I_z = 3,5$ A.....	70
Obrázek 59 Průběhy napětí a proudů v jednotlivých částech obvodu – $I_z = 7$ A.....	71

Seznam rovnic

Rovnice 1: Výpočet hodnoty kompenzačního výkonu	14
Rovnice 2: Výpočet poměrného napětí nakrátko.....	15
Rovnice 3: Výpočet náhradní indukčnosti trakčního transformátoru	16
Rovnice 4: Výpočet náhradní reaktance trakčního transformátoru	16
Rovnice 5: Základní vztah pro výpočet jalového výkonu	16
Rovnice 6: Výpočet celkové kompenzační kapacity	16
Rovnice 7: Výpočet dekompenzační indukčnosti.....	17
Rovnice 8: Rovnice celkové kompenzační kapacity	18
Rovnice 9: Rovnice celkové vstupní reaktance trakční napájecí stanice.....	19
Rovnice 10: Thomsonův vztah	19
Rovnice 11: Výpočet kapacity větve 7. harmonické	21
Rovnice 12: Thomsonův vztah – vyjádřená indukčnost 7. harmonické	21
Rovnice 13: Přepočtení kompenzačního výkonu dle zvolených kondenzátorů.....	24
Rovnice 14: Thomsonův vztah – vyjádřená indukčnost.....	25
Rovnice 15: Přepočtení dekompenzační indukčnosti	26
Rovnice 16: Amplitudový zákon	26
Rovnice 17: Proudové dimenzování dekompenzační indukčnosti	27
Rovnice 18: Výpočet jednovrstvé vzduchové cívky.....	28
Rovnice 19: Ověření výpočtu jednovrstvé cívky vzhledem k výrobě	29
Rovnice 20: Výpočet vícevrstvé vzduchové cívky.....	29
Rovnice 21: Ověření výpočtu vícevrstvé cívky vzhledem k výrobě	30
Rovnice 22: Výpočet délky navíjeného drátu vícevrstvé cívky	30

Seznam tabulek

Tabulka 1: Tabulka vstupních parametrů pro výpočet LC větví	20
Tabulka 2: Tabulka vypočítaných hodnot prvků LC větví	20
Tabulka 3: Tabulka vypočítaných kapacit filtračních větví.....	22
Tabulka 4: Tabulka zvolených kapacit filtračních větví.....	23
Tabulka 5: Tabulka vybraných parametrů zvolených kondenzátorů (SRPassives).....	23
Tabulka 6: Tabulka vypočítaných indukčností filtračních větví	25
Tabulka 7: Tabulka vypočítaných indukčností a jejich proudové dimenzování	27
Tabulka 8: Složení indukčností jednotlivých větví.....	31
Tabulka 9: Tabulka vstupních parametrů optotranzistoru CNY17F-4 (CNY17F – Phototransistor, 2005).....	39
Tabulka 10: Tabulka použitých periférií	47
Tabulka 11: Tabulka použitých IO pinů	47
Tabulka 12: Naměřené parametry filtračních LC větví	54
Tabulka 13: Vliv řízení dekompenzační indukčnosti	55

Seznam příloh

Příloha A: Tyristorový regulátor skutečného FKZ – Trakční napájecí stanice Svitavy, autor Ing. Petr Sýkora	80
Příloha B: Venkovní provedení skutečného FKZ – Trakční napájecí stanice Ostrov nad Ohří, autor Ing. Jindřich Kašpar – Elektrizace železnic Praha.	81
Příloha C: Zapojení pracoviště pro měření zpětných vlivů pulzního měniče napětí	82
Příloha D: Pulzní měnič napětí – Bez filtru	83
Příloha E: Pulzní měnič napětí – S filtrem 3. harmonické.....	84
Příloha F: Kompletní schéma zapojení řídicí části – část 1	85
Příloha G: Kompletní schéma zapojení řídicí části – část 2	86
Příloha H: Zapojení pracoviště pro měření parametrů kompenzačních LC větví	87
Příloha I: Zapojení pracoviště pro ověření funkce modelu FKZ	88
Příloha J: Naměřené hodnoty - regulace pulzním měničem napětí bez připojeného modelu FKZ.....	89
Příloha K: Naměřené hodnoty - regulace pulzním měničem napětí s připojeným modelem FKZ – bez dekompenzační větve.....	90
Příloha L: Naměřené hodnoty - regulace pulzním měničem napětí s připojeným modelem FKZ – s dekompenzační větví	91
Příloha M: Fotografie měřícího pracoviště	92

Přílohy

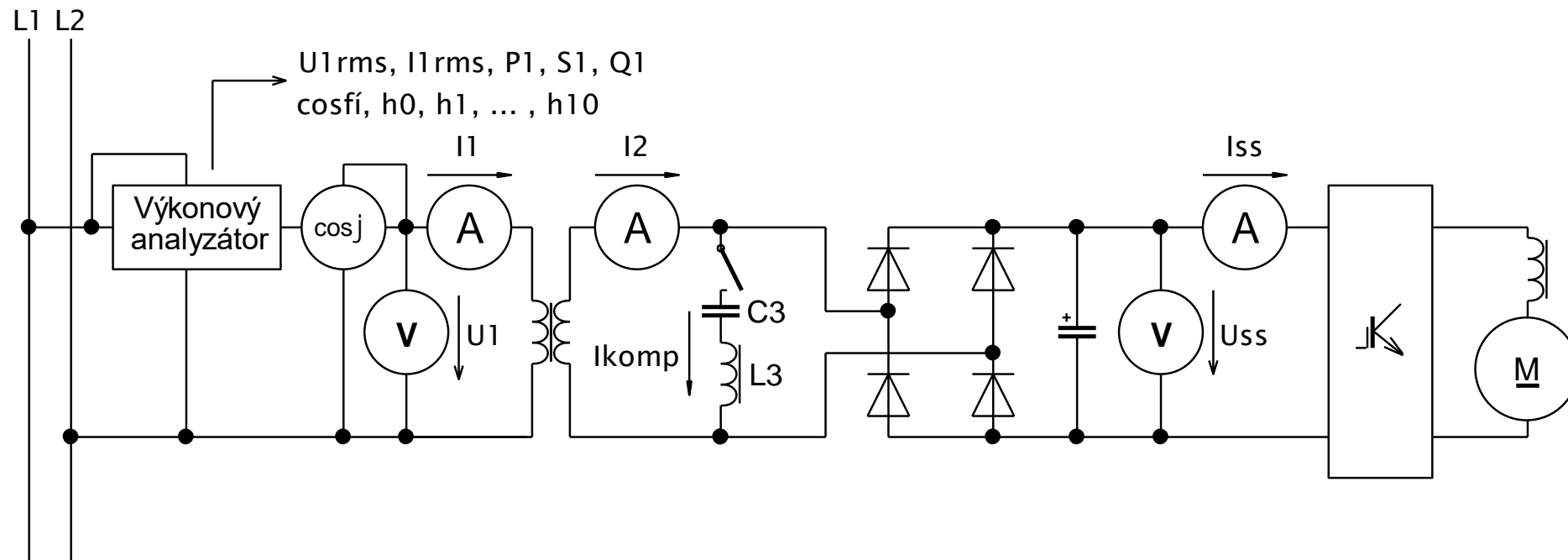
**Příloha A: Tyristorový regulátor skutečného FKZ – Trakční napájecí stanice Svitavy,
autor Ing. Petr Sýkora**



Příloha B: Venkovní provedení skutečného FKZ – Trakční napájecí stanice Ostrov nad Ohří, autor Ing. Jindřich Kašpar – Elektrizace železnic Praha.



Příloha C: Zapojení pracoviště pro měření zpětných vlivů pulzního měniče napětí⁷



⁷ Naměřené veličiny z příloh D a E jsou ve schématu vyznačeny.

Příloha D: Pulzní měnič napětí – Bez filtru⁸

BEZ FILTRU										
Iss [A]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Měřicí přístroje										
I1 [A]	0,2	0,2	0,3	1	1,5	2,3	3,1	4,1	5,2	-
U1 [V]	380	380	380	380	380	380	380	380	380	375
cos (φ) L [-]	0,75	0,82	0,91	0,95	0,96	0,97	0,97	0,975	0,98	0,98
I2 [A]	0,1	0,2	0,5	1	2,4	3,6	5	6,7	8,5	10,2
Uss [V]	335	330	325	320	310	305	300	290	280	275
Iss [A]	0,2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ikomp [A]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Analyzátor – všechny harmonické										
U1rms [V]	388	387	387	387	387	387	386	385	385	385
I1rms [A]	0,146	0,218	0,49	0,97	1,54	2,28	3,12	4,13	5,23	6,54
P1 [W]	33	55	122	244	400	617	874	1188	1550	1996
S1 [VA]	57	84	193	376	597	880	1205	1590	2010	2517
Q1 [VAr]	46	64	150	285	442	629	833	1057	1280	1533
cos (φ) L [-]	0,58	0,65	0,63	0,65	0,67	0,7	0,72	0,75	0,77	0,79
Analyzátor – první harmonická										
U1rms [V]	388	387	387	387	387	387	386	385	385	385
I1rms [A]	0,14	0,18	0,35	0,66	1,07	1,64	2,33	3,2	4,15	5,35
P1 [W]	33	54	121	242	399	615	875	1191	1556	2007
S1 [VA]	53	71	133	255	413	633	899	1222	1596	2059
Q1 [VAr]	42	45	55	76	106	151	208	274	350	457
cos (φ) L [-]	0,61	0,77	0,9	0,95	0,96	0,97	0,97	0,974	0,975	0,975
Proudové harmonické [% 1. harmonické proudu I1rms]										
h0	0,8	0,81	0,61	0,27	0,44	0,14	0,5	0,22	0,23	0,07
h1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
h2	2,4	6,2	0,99	3,3	0,8	0,67	0,6	0,4	0,57	0,65
h3	32,3	25,5	55,5	70,1	75,2	75,5	74,1	71,8	68,6	65,16
h4	1,2	2,2	2,09	3,6	1,45	0,7	1,2	0,67	0,46	0,67
h5	12,7	37,38	59,1	62,6	58,7	52,7	45,6	38,9	31,9	25,56
h6	0,52	2,6	2,3	2,9	1,3	0,59	0,77	0,5	0,26	0,18
h7	2,4	26,9	44,1	42,1	34,4	25,8	17,5	11,1	6,36	4,77
h8	1,1	2,4	2,6	3,1	0,8	0,8	0,5	0,45	0,2	0,13
h9	4,7	26,4	33,9	26,1	16,4	9,24	6,1	5,99	6,5	5,42
h10	0,8	2,2	2,37	1,3	0,4	0,57	0,2	0,19	0,14	0,22
Proudy 3., 5. a 7. harmonické, přepočtené na sekundární stranu										
I_3harm [A]	0,1	0,1	0,3	0,8	1,3	2,1	2,9	3,8	4,7	5,8
I_5harm [A]	0,0	0,1	0,3	0,7	1,0	1,4	1,8	2,1	2,2	2,3
I_7harm [A]	0,0	0,1	0,3	0,5	0,6	0,7	0,7	0,6	0,4	0,4

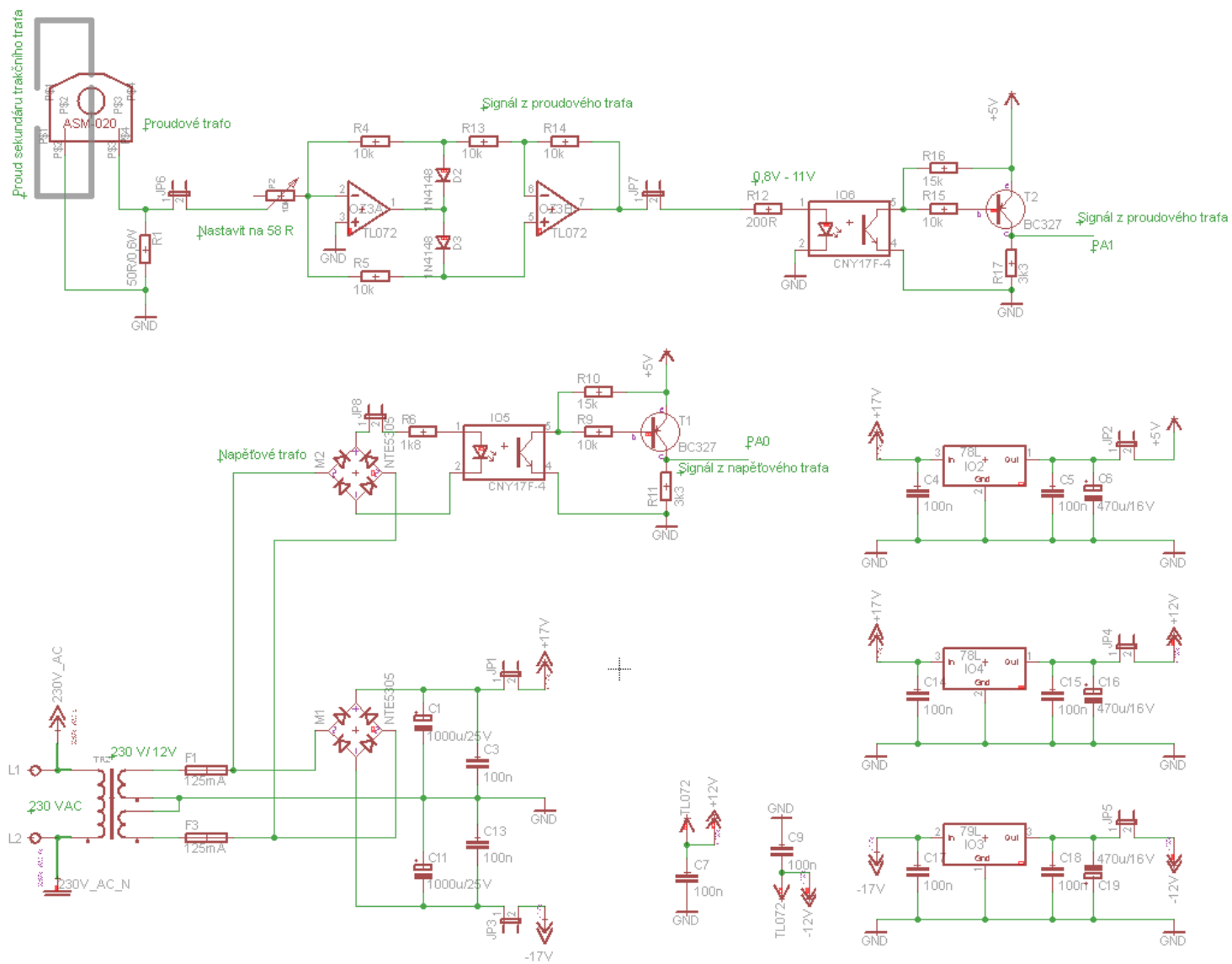
⁸ Důležité hodnoty jsou zvýrazněny červenou barvou.

Příloha E: Pulzní měnič napětí – S filtrem 3. harmonické⁹

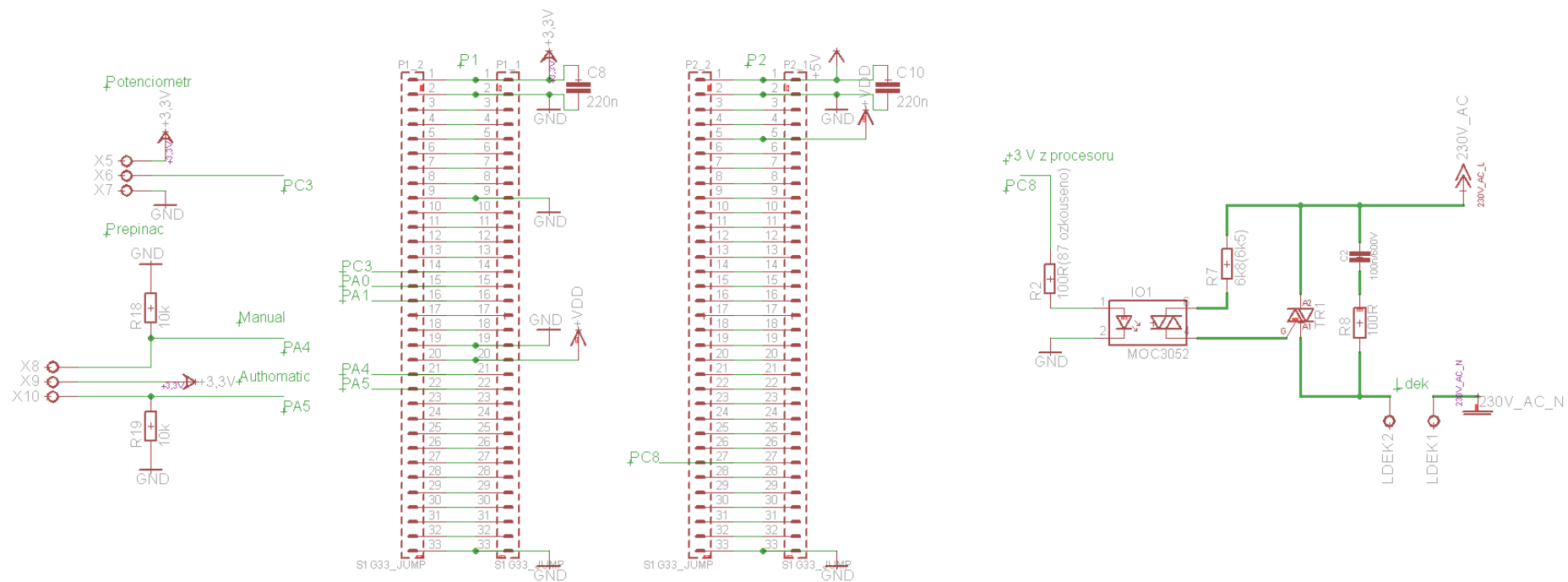
S FILTREM 3. HARMONICKÉ 85uF/ 13 mH								
Iss [A]	0	1	2	3	4	5	6	7
Měřicí přístroje								
I1 [A]	4,4	4,4	4,4	4,4	4,6	4,6	4,85	-
U1 [V]	390	390	390	390	390	390	390	385
cos (φ) C [-]	-	-	-	-	-	0,45	0,56	0,67
I2 [A]	7,4	7,4	7,4	7,3	7,4	7,1	8	8,7
Uss [V]	340	340	330	325	320	315	310	300
Iss [A]	0	1	2	3	4	5	6	7
Ikomp [A]	7,5	7,4	7,4	7,3	7,3	7,3	7,4	7,6
Analyzátor – všechny harmonické								
U1rms [V]	395	390	394	390	390	390	390	390
I1rms [A]	4,4	4,4	4,39	4,39	4,32	4,58	4,83	4,9
P1 [W]	1762	2001	2704	3794	5380	7644	10162	12902
S1 [VA]	1741	1737	1733	1730	1704	1802	1903	1927
Q1 [VAr]	-1732	-1725	-1710	-1690	-1616	-1630	-1609	-1430
cos (φ) C [-]	0,1	0,1	0,16	0,21	0,31	0,42	0,53	0,67
Analyzátor – první harmonická								
U1rms [V]	390	390	390	390	390	390	390	390
I1rms [A]	4,37	4,37	4,35	4,32	4,32	4,4	4,59	4,9
P1 [W]	1770	1992	2701	3780	5376	7642	10182	12914
S1 [VA]	1730	1720	1716	1702	1702	1732	1807	1926
Q1 [VAr]	-1721	-1700	-1697	-1662	-1615	-1555	-1492	-1428
cos (φ) C [-]	0,1	0,1	0,16	0,22	0,32	0,44	0,56	0,67
Proudové harmonické [% 1. harmonické proudu I1rms]								
h0	0,14	0,27	0,14	0,23	0,05	0,004	0,13	0,24
h1	100	100	100	100	100	100	100	100
h2	0,36	0,34	0,3	0,56	0,47	0,55	0,5	0,45
h3	10,2	10,7	12,4	14,61	17,3	20,58	24,38	28,19
h4	0,3	0,31	0,37	0,47	0,4	0,38	0,37	0,46
h5	1,6	2,11	4,4	7,7	12,22	17	20,65	22,79
h6	0,1	0,1	0,11	0,2	0,21	0,14	0,17	0,38
h7	0,4	0,99	3,22	5,58	7,69	9,02	9,45	9,95
h8	0,04	0,08	0,13	0,22	0,23	0,12	0,22	0,1
h9	0,2	0,86	2,4	3,49	3,96	3,54	2,97	2,58
h10	0,05	0,1	0,14	0,18	0,1	0,07	0,15	0,11
Proudy 3., 5. a 7. harmonické, přepočtené na sekundární stranu								
I_3harm [A]	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,5	1,9	2,3
I_5harm [A]	0,1	0,2	0,3	0,6	0,9	1,2	1,6	1,9
I_7harm [A]	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,7	0,7	0,8

⁹ Důležité hodnoty jsou zvýrazněny červenou barvou.

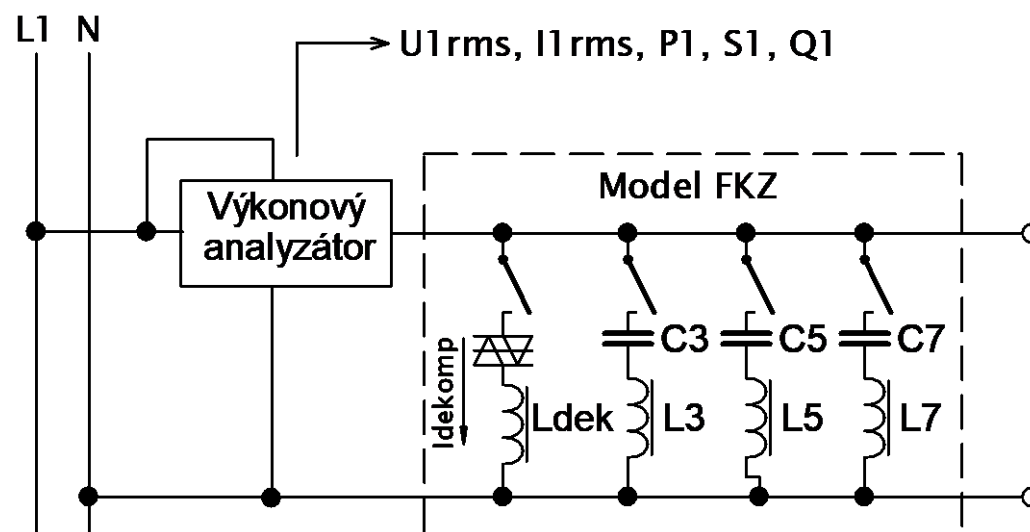
Příloha F: Kompletní schéma zapojení řídicí části – část 1



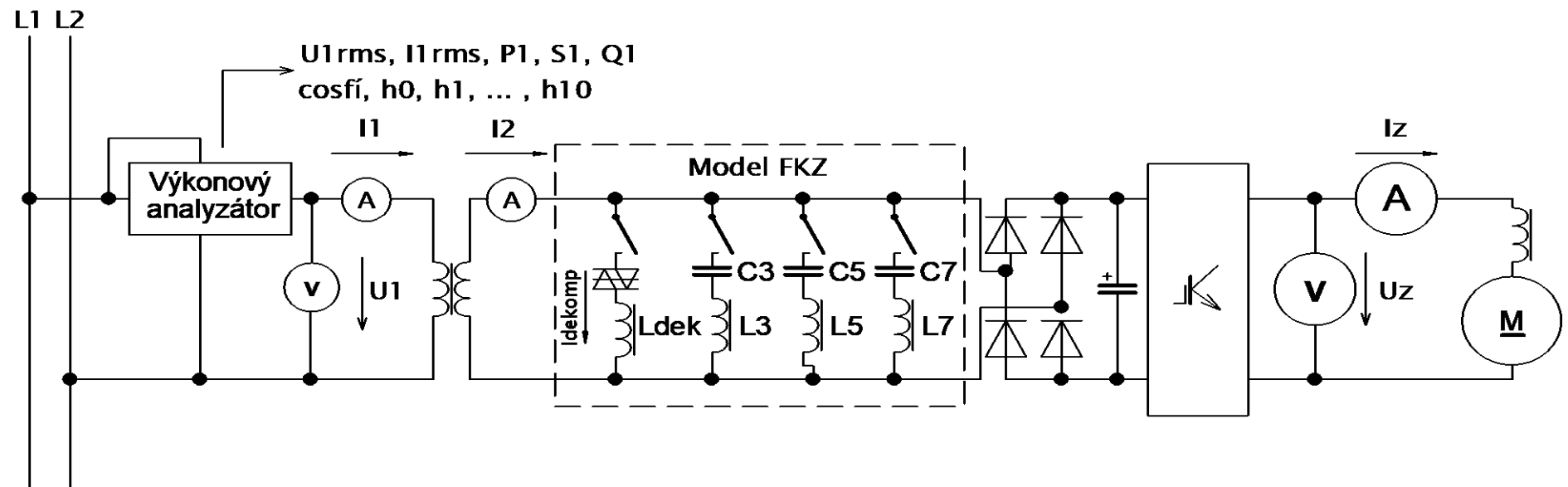
Příloha G: Kompletní schéma zapojení řídicí části – část 2



Příloha H: Zapojení pracoviště pro měření parametrů kompenzačních LC větví



Příloha I: Zapojení pracoviště pro ověření funkce modelu FKZ ¹⁰



¹⁰ Naměřené veličiny z příloh J, K a L jsou ve schématu vyznačeny.

Příloha J: Naměřené hodnoty - regulace pulzním měničem napětí bez připojeného modelu FKZ¹¹

BEZ MODELU FKZ								
Iz [A]	0	1	2	3	4	5	6	7
Měřicí přístroje								
I1 [A]	-	-	1	1,9	2,7	3,9	5	6,4
U1 [V]	383	380	380	380	380	380	380	380
I2 [A]	-	-	1	2,2	4,8	6,6	8,4	10,8
Uz [V]	0,2	1,4	2,8	4,4	5,6	7	8,2	11,6
Iz [A]	0,1	1	2	3	4	5	6	7
Udekomp [V]	0	0	0	0	0	0	0	0
Idekomp [A]	0	0	0	0	0	0	0	0
Analyzátor – všechny harmonické								
U1rms [V]	384	383	383	383	381	381	380	380
I1rms [A]	0,34	0,54	1,15	2,05	2,87	4,02	5,1	6,53
P1 [W]	42	117	288	541	788	1145	1497	1960
S1 [VA]	129	207	442	783	1096	1535	1949	2482
Q1 [VAr]	122	170	334	564	762	1020	1247	1514
cos (φ) L [-]	0,33	0,57	0,65	0,69	0,72	0,74	0,77	0,79
cos (φ) C [-]	-	-	-	-	-	-	-	-
Analyzátor – první harmonická								
U1rms [V]	388	384	384	384	381	381	380	380
I1rms [A]	0,31	0,44	0,85	1,52	2,117	3,16	4,11	5,39
P1 [W]	42	117	288	543	788	1152	1499	1963
S1 [VA]	119	170	324	581	832	1205	1,56	2035
Q1 [VAr]	112	122	152	207	263	252	433	545
cos (φ) L [-]	0,35	0,69	0,88	0,93	0,95	0,956	0,96	0,964
cos (φ) C [-]	-	-	-	-	-	-	-	-
Proudové harmonické [% 1. harmonické proudu I1rms]								
h0	0,32	0,28	0,23	0,13	0,09	0,00	0,05	0,00
h1	100	100	100	100	100	100	100	100
h2	0,09	0,07	0,08	0,15	0,13	0,06	0,02	0,00
h3	39,34	36,55	60,17	68,29	69,24	68,95	65,9	62,72
h4	0,11	0,10	0,09	0,16	0,08	0,06	0,05	0,05
h5	11,74	43,5	56,35	51,99	45,68	37,84	31,45	24,38
h6	0,13	0,10	0,09	0,12	0,05	0,05	0,03	0,04
h7	1,45	28,44	33,98	25,13	17,38	10,08	6,00	4,52
h8	0,06	0,08	0,08	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
h9	2,83	22,9	18,66	8,60	5,20	5,82	6,23	5,55
h10	0,07	0,04	0,07	0,05	0,00	0,02	0,00	0,02
Proudy 3., 5. a 7. harmonické přepočtené na sekundární stranu								
I_3harm [A]	0,2	0,3	0,9	1,7	2,4	3,6	4,5	5,6
I_5harm [A]	0,1	0,3	0,8	1,3	1,6	2,0	2,2	2,2
I_7harm [A]	0,0	0,2	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4

¹¹ Důležité hodnoty jsou zvýrazněny červenou barvou.

Příloha K: Naměřené hodnoty - regulace pulzním měničem napětí s připojeným modelem FKZ – bez dekompenzační větve¹²

S MODELEM FKZ - BEZ DEKOMPENZACE								
Iz [A]	0	1	2	3	4	5	6	7
Měřicí přístroje								
I1 [A]	4,3	4,2	4,2	4,4	4,6	5,1	5,7	6,7
U1 [V]	380	380	380	380	380	380	380	380
I2 [A]	7,8	7,7	7,7	7,9	8,2	8,9	9,8	11,5
Uz [V]	0,2	1,4	2,8	4,4	5,6	7	8,2	11,6
Iz [A]	0,1	1	2	3	4	5	6	7
Ukomp [V]	-	-	-	-	-	-	-	-
Ikomp [A]	0	0	0	0	0	0	0	0
Analyzátor – všechny harmonické								
U1rms [V]	380	379	380	380	379	379	379	375
I1rms [A]	4,3	4,28	4,33	4,44	4,7	5,13	5,8	6,8
P1 [W]	151	226	388	626	908	1222	1608	2073
S1 [VA]	1632	1623	1640	1684	1770	1934	2184	2550
Q1 [VAr]	-1624	-1609	-1594	-1564	-1531	-1501	-1477	-1480
cos (φ) L [-]	-	-	-	-	-	-	-	-
cos (φ) C [-]	0,09	0,14	0,24	0,37	0,51	0,63	0,73	0,81
Analyzátor – první harmonická								
U1rms [V]	380	379	380	380	379	379	379	375
I1rms [A]	4,29	4,28	4,26	4,31	4,45	4,74	5,29	6,15
P1 [W]	151	227	388	626	907	1222	1611	2086
S1 [VA]	1630	1625	1622	1633	1984	1786	1989	2307
Q1 [VAr]	-1623	-1607	-1576	-1507	-1417	-1306	-1163	-986
cos (φ) L [-]	-	-	-	-	-	-	-	-
cos (φ) C [-]	0,09	0,14	0,24	0,38	0,54	0,68	0,81	0,9
Proudové harmonické [% 1. harmonické proudu I1rms]								
h0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03
h1	100	100	100	100	100	100	100	100
h2	0,15	0,10	0,11	0,07	0,13	0,07	0,08	0,08
h3	1,67	3,59	9,43	17,29	25,65	32,85	38,47	41,75
h4	0,09	0,10	0,05	0,03	0,08	0,05	0,08	0,04
h5	1,96	5,04	10,05	15,09	19,18	21,46	22,13	21,28
h6	0,04	0,08	0,06	0,02	0,05	0,00	0,00	0,00
h7	0,91	3,80	8,56	10,81	10,79	9,16	6,41	3,58
h8	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,03	0,03	0,01
h9	0,15	1,33	2,09	1,45	0,55	1,5	2,61	3,03
h10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
Proudy 3., 5. a 7. harmonické přepočtené na sekundární stranu								
I_3harm [A]	0,1	0,3	0,7	1,2	1,9	2,6	3,4	4,3
I_5harm [A]	0,1	0,4	0,7	1,1	1,4	1,7	2,0	2,2
I_7harm [A]	0,1	0,3	0,6	0,8	0,8	0,7	0,6	0,4

¹² Důležité hodnoty jsou zvýrazněny červenou barvou.

Příloha L: Naměřené hodnoty - regulace pulzním měničem napětí s připojeným modelem FKZ – s dekompenzační větví¹³

S MODELEM FKZ - S DEKOMPENZACÍ								
Iz [A]	0	1	2	3	4	5	6	7
Měřicí přístroje								
I1 [A]	3,4	3,2	3,7	4,2	4,8	5,7	6,4	8
U1 [V]	375	375	375	375	375	375	375	373
I2 [A]	6	6	6,2	7	8,2	9,5	10,4	13,8
Uz [V]	0,2	1,4	2,8	4,4	5,6	7	8,2	11,6
Iz [A]	0,1	1	2	3	4	5	6	7
Ukomp [V]	200	200	200	190	190	170	170	170
Ikomp [A]	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8	8	8
Analyzátor – všechny harmonické								
U1rms [V]	375	375	375	375	375	375	375	370
I1rms [A]	3,4	3,3	3,68	4,2	5,04	7,8	6,39	8,33
P1 [W]	1033	1073	1267	1436	1719	1962	2167	2821
S1 [VA]	1245	1219	1369	1564	1875	2139	2365	3070
Q1 [VAr]	695	578	514	618	747	850	946	1210
cos (φ) L [-]	0,83	0,88	0,92	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
cos (φ) C [-]	-	-	-	-	-	-	-	-
Analyzátor – první harmonická								
U1rms [V]	375	375	375	375	374	373	372	370
I1rms [A]	2,78	2,88	3,43	3,87	4,66	5,31	5,88	7,72
P1 [W]	10351	1074	1269	1437	1721	1965	2171	2829
S1 [VA]	1035	1075	1273	1440	1730	1968	2175	2844
Q1 [VAr]	29	39	97	84	180	107	126	292
cos (φ) L [-]	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
cos (φ) C [-]	-	-	-	-	-	-	-	-
Proudové harmonické [% 1. harmonické proudu I1rms]								
h0	0,05	9,57	0,18	0,19	7,31	0,40	0,40	12,82
h1	100	100	100	100	100	100	100	100
h2	0,16	6,00	5,17	5,17	9,71	0,47	0,47	9,41
h3	1,64	5,51	8,88	8,88	15,74	26,25	26,25	8,38
h4	0,01	0,55	1,07	1,07	1,07	0,13	0,13	0,95
h5	1,95	1,78	10,36	10,36	15,83	17,74	17,74	3,11
h6	0,05	0,32	0,99	0,99	1,30	0,19	0,19	0,54
h7	0,97	0,55	7,38	7,38	11,75	7,43	7,43	1,48
h8	0,02	0,09	0,19	0,19	0,38	0,04	0,04	0,07
h9	0,14	0,05	1,19	1,19	1,28	1,32	1,32	0,24
h10	0,00	0,11	0,27	0,27	0,31	0,07	0,07	0,11
Proudy 3., 5. a 7. harmonické přepočtené na sekundární stranu								
I_3harm [A]	0,1	0,3	0,5	0,6	1,2	2,3	2,6	1,1
I_5harm [A]	0,1	0,1	0,6	0,7	1,2	1,6	1,7	0,4
I_7harm [A]	0,0	0,0	0,4	0,5	0,9	0,7	0,7	0,2

¹³ Důležité hodnoty jsou zvýrazněny červenou barvou.

Příloha M: Fotografie měřícího pracoviště

