



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce

Řízení elektrocentrály s asynchronním generátorem v ostrovním režimu

Control of genset with asynchronous generator in island mode

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management, Magisterský

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Hlinovský Vít CSc.

Bc. Petr Maňák

2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Petr Maňák**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Název tématu: **Řízení elektrocentrály s asynchronním generátorem v ostrovním režimu**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište chování asynchronního stroje v různých pracovních režimech
- 2) Navrhněte řídicí systém elektrocentrály
- 3) Navrhněte software pro řídicí část
- 4) Proveďte experimentální měření na elektrocentrále

Seznam odborné literatury:

- [1] CHAPMAN, S. Electric Machinery Fundamentals
- [2] MĚŘIČKA, J., HAMATA, V., VOŽENÍLEK, P. Elektrické stroje. Praha: ČVUT, 2000.
- [3] IANNUZZI, D., PAGANO, E., PIEGARI, L., VENERI, O., Generator operations of asynchronous induction machines connected to ac or dc active/passive electrical networks, University of Naples 80125, Italy

Vedoucí: Ing. Vít Hlinovský, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017



Ing. Jan Bauer, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2016

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Vítu Hlinovskému, CSc. za vedení, cenné rady a připomínky k diplomové práci.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

podpis

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá řízením elektrocentrály s asynchronním generátorem v ostrovním režimu. Cílem práce bylo navrhnout řídicí systém, což zahrnuje návrh hardwaru i softwaru pro mikrokontroléry. K realizaci byly použity vývojové desky Arduino. Jako komunikace mezi jednotlivými deskami byl použit CAN.

Abstract

This thesis deals with the control of genset with asynchronous generator in island mode. The goal of thesis was to design control system from hardware design to software for used microcontrollers. For realization were used Arduino development kits. As communication protocol was used CAN.

Klíčová slova:

Elektrocentrála, asynchronní generátor, řídicí systém, Arduino, CAN

Keywords:

Genset, asynchronous generator, control system, Arduino, CAN

Obsah

1	Úvod	1
2	Asynchronní stroj v různých pracovních režimech	2
2.1	Asynchronní stroj připojený k síti	2
2.2	Asynchronní stroj jako generátor v ostrovním režimu	4
3	Návrh konstrukce elektrocentrály.....	7
3.1	Výběr pohonné jednotky	7
3.2	Výběr elektrického generátoru	7
3.3	Uspořádání prvků elektrocentrály	8
3.4	Návrh budicí soustavy	8
3.4.1	Volba budicích kondenzátorů.....	8
3.4.2	Volba tlumivek	9
4	Návrh řídicího systému elektrocentrály.....	11
4.1	Sledování parametrů.....	11
4.2	Návrh struktury regulace	13
4.3	Komunikace mezi jednotlivými deskami	13
5	Návrh a realizace hardwaru	15
5.1	Použité vývojové desky a moduly	15
5.1.1	Mikrokontrolér hlavní řídicí desky.....	15
5.1.2	Mikrokontroléry na ostatních deskách	16
5.1.3	Modul na zprostředkování komunikace po sběrnici CAN	16
5.1.4	Modul na SD kartu	17
5.1.5	Modul reálného času.....	17
5.2	Hlavní řídicí deska.....	18
5.3	Regulátor rychlosti	19
5.3.1	Návrh přípravku na regulaci rychlosti.....	19
5.3.2	Vlastní realizace přípravku na regulaci rychlosti	20
5.3.3	Návrh řídicího obvodu regulace otáček.....	20
5.4	Deska měření.....	21
5.4.1	Zapojení měřícího obvodu proudu	22
5.4.2	Měřící obvody napětí.....	23
5.4.3	Měřící obvod frekvence.....	23
5.4.4	Měřící obvod napětí baterie.....	24
5.5	Zdroj napětí pro desku měření.....	24
5.6	Desky na spínání obvodů.....	26
5.6.1	Deska s relé na 230 V	26

5.6.2	Deska s relé na 12V	27
5.6.3	Deska spínání budiče	28
5.6.4	Centrální deska na řízení spínání	29
5.7	Regulátor buzení	30
5.8	Ovládací panel	31
5.9	Měření teploty	33
6	Návrh a realizace softwaru	34
6.1	Zpracování proměnných	34
6.2	Komunikace po CANu	35
6.3	Program hlavní řídicí desky	38
6.3.1	Komunikace přes UART	38
6.3.2	Datalogger	40
6.3.3	Časování	40
6.3.4	Výpočty	40
6.4	Program regulátoru rychlosti	41
6.4.1	Měření otáček	41
6.4.2	Regulace plynu	41
6.4.3	Regulace otáček	41
6.4.4	Regulace frekvence	42
6.4.5	Struktura regulátorů	42
6.4.6	Komunikace	43
6.5	Program desky měření	43
6.6	Program desky spínání	46
6.7	Program regulátoru buzení	46
6.7.1	Regulace budicího proudu	46
6.7.2	Regulace napětí	48
6.8	Program ovládacího panelu	49
6.8.1	Popis obrazovek	50
6.9	Program na měření teploty	52
7	Ovládací program na PC	53
7.1	Popis grafického prostředí	53
8	Kompletace a zapojení systému	56
8.1	Konstrukce bedny pro řídicí systém a rozvaděč	56
8.2	Zapojení silové části	58
9	Měření na elektrocentrále	61
9.1	Ověření funkce regulátoru plynu	61
9.2	Reakce regulátoru otáček	62

9.3	Závislost frekvence na otáčkách.....	63
9.4	Závislost indukovaného napětí na otáčkách.....	63
9.5	Průběh nabuzení a odbuzení.....	64
9.6	Měření oteplení motoru.....	65
9.7	Ověření funkce regulátoru napětí.....	65
9.8	Měření osciloskopem.....	66
10	Závěr.....	70
11	Seznam použité literatury.....	71
12	Seznam obrázků.....	72
13	Seznam tabulek.....	74
14	Seznam zkratk.....	74
15	Obsah přiloženého CD.....	74
16	Obrazová příloha.....	75

1 Úvod

Elektrocentrála je zařízení určené k výrobě elektrické energie v místě, kde není rozvodná síť nebo v případě výpadku napájení z rozvodné sítě. Zpravidla se skládá ze spalovacího motoru, který pohání elektrický generátor. U složitějších typů je nutná regulace napětí a frekvence.

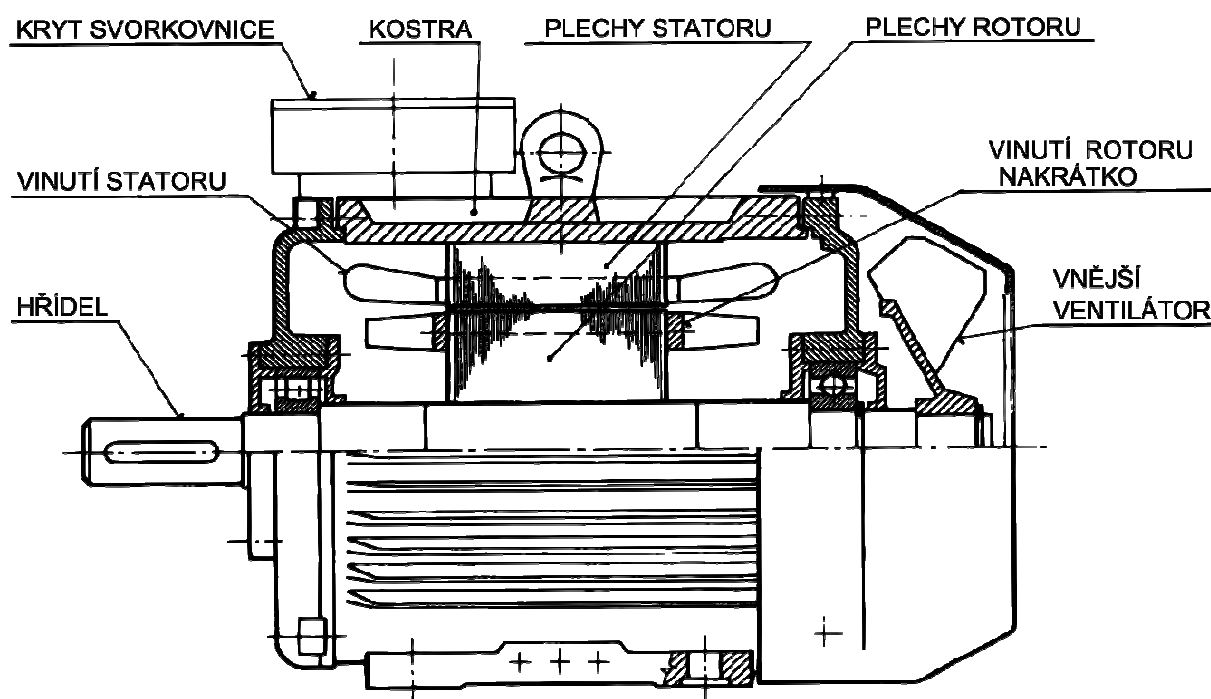
Asynchronní generátor je asynchronní stroj uveden do generátorického režimu. V ostrovní síti je k fungování asynchronního generátoru zapotřebí připojit paralelně ke generátoru kondenzátory. Asynchronní generátor je dostupnější, než synchronní stroj, jeho řízení je ovšem složitější.

Řídicí systém elektrocentrály je soubor zařízení, která slouží k udržení elektrických parametrů elektrocentrály ve stanovených mezích. Kromě toho slouží také k ovládání elektrocentrály uživatelem a k monitorování provozních stavů zařízení.

Cílem práce je navrhnout, realizovat a odzkoušet hardware a software, který bude zastávat funkci řídicího systému elektrocentrály. Systém by také měl umožnit interakci s obsluhou a sledování parametrů elektrocentrály. Jelikož stavbu elektrocentrály si financuji sám jako pokusný projekt, výběr komponent a řešení pro realizaci řídicího systému se bude odvíjet zejména od jejich ceny. Navržený systém by také měl umožnit budoucí rozšíření.

2 Asynchronní stroj v různých pracovních režimech

Asynchronní stroje jsou dnes nejvíce rozšířené jako motory. Díky své jednoduché konstrukci vyžadují méně údržby a jejich výroba je jednoduchá a tudíž levná. Nejrozšířenější jsou asynchronní motory s kotvou nakrátko. Tento typ neobsahuje kartáče, což zvyšuje spolehlivost stroje a snižuje náklady na údržbu. Stator tohoto typu stroje je skládaný z plechů, kde jsou v drážkách uložena vinutí, zpravidla trojfázová. Rotor je realizován nejčastěji jako klec odstříknutá z hliníku do rotorových plechů. Rotor může být i vinutý s vyvedenými konci vinutí na kroužky. U tohoto typu je možné při spouštění motoru měnit odpor rotorového vinutí a přizpůsobit tak charakteristiky motoru potřebám rozběhu. Asynchronní motor s kroužky ovšem není tak častý. Hřídel asynchronního stroje je uložena v ložiskách a na jedné straně bývá osazena ventilátorem, který zajišťuje chlazení stroje. Následující obrázek ukazuje řez asynchronním motorem s kotvou nakrátko. [1]



Obrázek 1 - Řez asynchronním motorem s kotvou nakrátko [2]

2.1 Asynchronní stroj připojený k síti

Jelikož rotor asynchronního stroje není připojen ke zdroji energie, proudy v něm vznikají v důsledku indukce. Proto je tento typ stroje anglicky označován jako induction machine, neboli indukční stroj. Přivedením napětí na vinutí statoru vznikne ve stroji točivé magnetické pole, které svým působením indukuje ve vinutí rotoru napětí, které vyvolá proudy. Vzájemné působení magnetického pole statoru a proudů rotoru vyvolá podle Lenzova zákona moment, který působí proti příčině svého vzniku. Jelikož je rotor volně uložen v ložiskách, dojde k jeho roztočení. [2]

Z výše uvedeného vyplývá, že asynchronní motor se nedokáže sám otáčet stejnou rychlostí jako točivé magnetické pole. Kdyby se rotor stroje otáčel rychlostí synchronní s magnetickým polem, nedocházelo by k indukování napětí do rotoru a tedy ani k vytvoření proudů a moment stroje by byl nulový. Asynchronní stroj tedy pracuje na otáčivé rychlosti blízké synchronní, avšak synchronní rychlosti nedosáhne. U asynchronních strojů je pro popis tohoto problému zavedena veličina skluz. Ten udává procentuální rozdíl pracovních otáček od otáček synchronních. Skluz je definován takto:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

,kde ω_1 je úhlová rychlost točivého magnetického pole definovaná jako:

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f}{p}$$

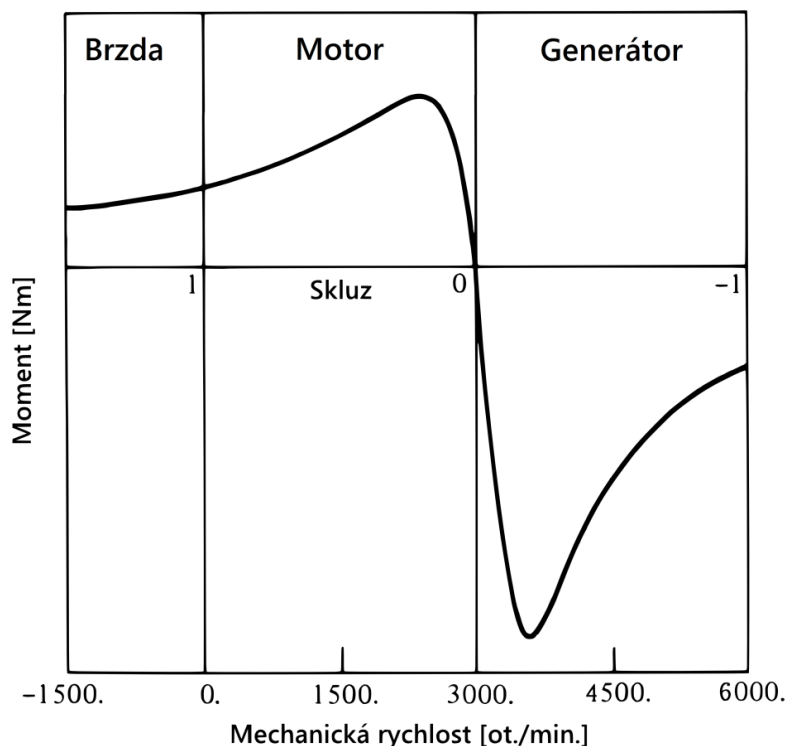
,kde f je frekvence napájecího napětí a p je počet pólových dvojic stroje. Dále ω je úhlová rychlost rotoru, n_1 jsou synchronní otáčky a n jsou otáčky rotoru. Jelikož lze vyrobit stroj s nejmenším počtem pólových dvojic 1 (dvoupólový stroj), nelze při napájecím kmitočtu 50Hz dosáhnout vyšších otáček než 3000 ot./min. Dalšími možnostmi jsou otáčky 1500 ot./min pro stroj se dvěma pólovými dvojicemi (čtyřpólový stroj) a 1000 ot./min pro $p = 3$ (šestipólový stroj). Analogicky lze zkonstruovat stroje s ještě vyšším počtem pólů a nižšími otáčkami. [2]

Podle skluzu lze rozlišovat tři základní oblasti provozu asynchronního stroje. Nejběžnější je oblast skluzu od 0 do 1, kde asynchronní stroj pracuje jako motor. Nulový skluz odpovídá synchronním otáčkám a skluz 1 odpovídá stojícímu rotoru. Stroj v této oblasti spotřebovává elektrickou energii a přeměňuje ji na mechanickou. Pokud dojde k roztočení rotoru proti směru točení magnetického pole, skluz bude větší než 1 a asynchronní stroj začne pracovat jako brzda. V tomto případě spotřebovává elektrickou energii i mechanickou energii z hřídele. Naopak pokud bude rotor stroje vnější silou urychlován nad synchronní otáčky, skluz začne být záporný a asynchronní stroj začne pracovat jako generátor. V tomto případě přeměňuje přivedenou mechanickou energii na energii elektrickou a dodává do sítě činný výkon. Asynchronní generátor připojený k síti ovšem i nadále spotřebovává ze sítě jalovou energii. [2]

Tabulka 1 - Pracovní oblasti asynchronního stroje [2]

Oblast	Skluz	Otáčky
Motor	$1 > s > 0$	$0 \leq n < n_1$
Brzda	$1 < s < +\infty$	$n < 0$
Generátor	$-\infty < s < 0$	$n > n_1$

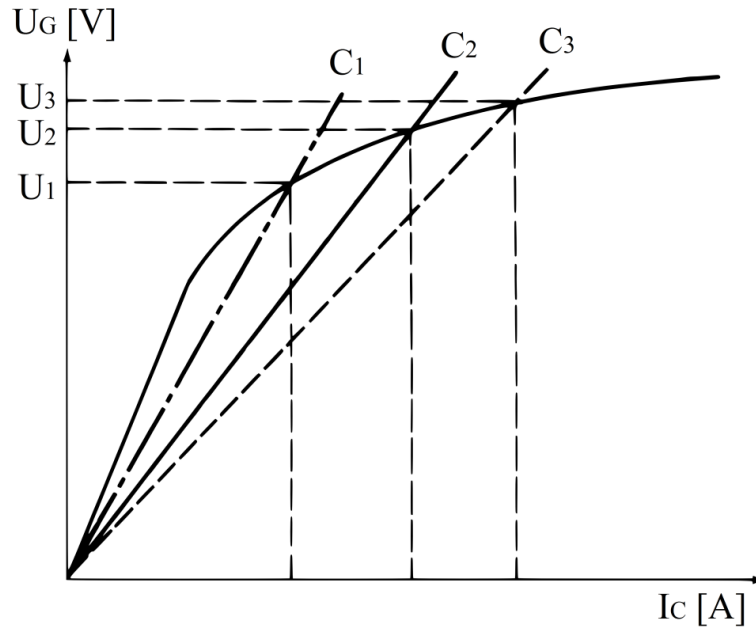
Výše popsané pracovní oblasti jsou vidět i na obrázku 2, kde je vynesena momentová charakteristika asynchronního stroje. Osa otáček byla upravena, aby odpovídala dvoupólovému stroji napájenému ze sítě o frekvenci 50 Hz.



Obrázek 2 - Momentová charakteristika asynchronního stroje [1]

2.2 Asynchronní stroj jako generátor v ostrovním režimu

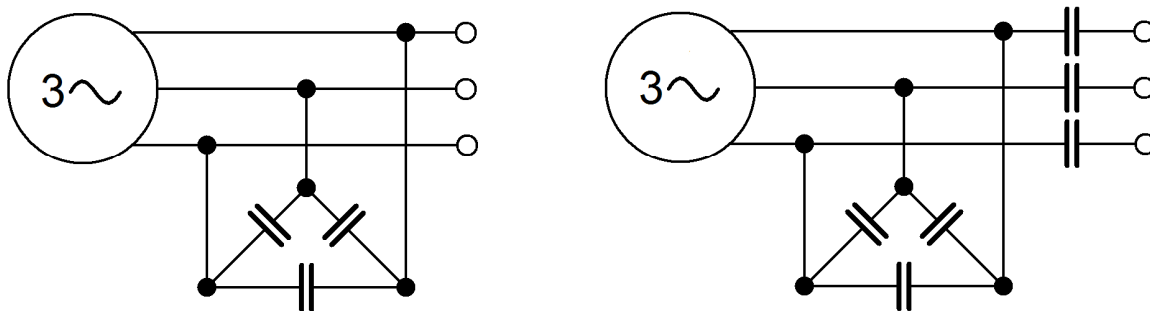
Asynchronní stroj lze provozovat jako generátor i v ostrovním režimu. Pro tento režim provozu je ovšem nutné, aby ke generátoru byly připojeny paralelně kondenzátory, které dodají potřebnou jalovou energii jak na vytvoření magnetického pole ve vinutích generátoru, tak pro zátěž. Podmínkou pro nabuzení asynchronního generátoru je remanentní magnetismus stroje. Remanentní magnetismus začne po roztočení rotoru ve statorových vinutích indukovat určité malé napětí, které vyvolá kapacitní proud tekoucí do kondenzátorů. Tento proud zvýší indukované napětí, což ještě zvýší proud. Tento proces probíhá tak dlouho, dokud napětí nedosáhne ustáleného stavu. Ustálený stav nastane ve chvíli, kdy se magnetizační charakteristika stroje protne s voltampérovou charakteristikou kondenzátorů. [1]



Obrázek 3 - Nabuzení asynchronního generátoru [1]

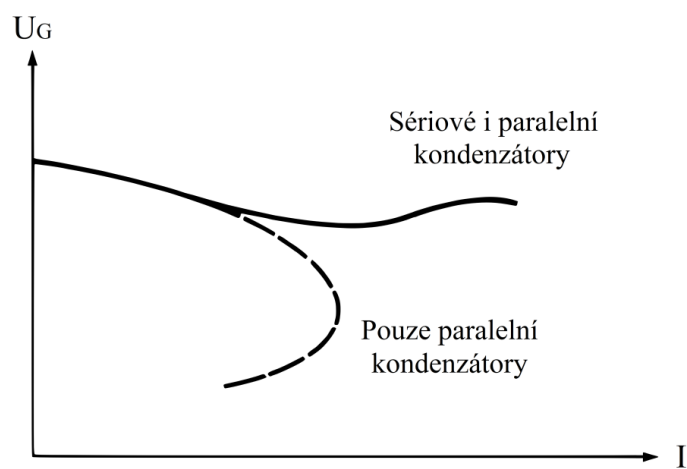
Na obrázku 3 je vidět magnetizační křivka stroje a voltampérové charakteristiky kondenzátorů různé kapacity ($C_1 < C_2 < C_3$). Při použití kondenzátorů příliš malé kapacity nedojde k protnutí charakteristik a generátor se nenabudí. Magnetizační křivku asynchronního stroje lze získat při provozu stroje v motorickém režimu bez zátěže. Měří se závislost proudu satorovým vinutím v závislosti na napájecím napětí. [1]

Hlavní nevýhodou asynchronního generátoru je jeho silná závislost výstupního napětí na zátěži. Zejména jedná-li se o zátěž induktivního charakteru. Kondenzátory v tomto případě musí dodávat jalovou energii jak pro generátor, tak pro zátěž a generátor se tím odbuzuje. Proto je těžké asynchronním generátorem roztočit indukční motor. Při zatěžování zátěží odporového charakteru je pokles napětí menší. Asynchronní generátor je svou zatěžovací charakteristikou podobný dynamu s paralelním buzením. Při příliš velkém zatížení poklesne napětí na svorkách generátoru, tím se sníží kapacitní proud a generátor se začne odbuzovat, což může způsobit až ztrátu napětí na výstupu. Výhodou této vlastnosti je vyšší odolnost generátoru proti přetížení. Následující obrázek ukazuje standardní zapojení asynchronního generátoru a kondenzátorů. [1]



Obrázek 4 – Zapojení asynchronního generátoru a kondenzátorů [1]

Pro zmírnění problému s poklesem napětí se někdy využívá zapojení kondenzátorů sériové i paralelně. Teoretické závislosti výstupního napětí na zatížení generátoru ukazuje obrázek 5.



Obrázek 5 - Voltampérová charakteristika pro různá zapojení kondenzátorů [1]

3 Návrh konstrukce elektrocentrály

Elektrocentrálu jsem se rozhodl realizovat jako pokusný projekt. Mým cílem bylo co nejlevněji postavit zdroj energie, který by dokázal zásobovat elektrickou energií nejdůležitější spotřebiče v domácnosti. Prvky elektrocentrály jsem navrhoval s ohledem na možnosti budoucího rozšíření. Mezi taková rozšíření patří například pohon elektrocentrály na dřevoplyn nebo přidání tepelných výměníků pro kogeneraci. S možnostmi dalších rozšíření počítá i mnou navržený řídicí systém.

3.1 Výběr pohonné jednotky

K pohonu generátoru elektrocentrály jsem vybral spalovací motor z vozidla Škoda Favorit. Jedná se o zážehový, čtyřválcový motor s karburátorem. Objem motoru je 1289cm^3 a maximální výkon, který je schopen dodat je 42 kW při 5000 ot./min. To je pro účel malé elektrocentrály více než dostatečné. Motor s karburátorem a klasickým rozdělovačem byl zvolen pro své jednodušší řízení, na rozdíl od motoru se vstřikováním a elektronickým zapalováním, který by vyžadoval řídicí počítač. Výkon motoru je pro účely malé elektrocentrály až nadbytečný, ovšem sehnat malý motor, ideálně o výkonu 10kW se mi za rozumné peníze nepodařilo. Zároveň jsem chtěl použít zážehový motor, protože v budoucnu bych rád provedl experiment s pohonem elektrocentrály na dřevoplyn, na který je potřeba zážehový motor. Vznětový by bylo potřeba složitě upravovat. Dalším aspektem návrhu bylo zvolit jmenovité otáčky, jak podle charakteristiky spalovacího motoru, tak podle synchronních otáček generátoru. U dieselového pohonu by bylo optimum 1500 ot./min ovšem zážehový motor má pracovní oblast ve vyšších otáčkách, což je také lepší pro pohon na dřevoplyn. Proto byly zvoleny pracovní otáčky 3000 ot./min. Při těchto otáčkách dokáže motor dodat výkon 28 kW.[9]

3.2 Výběr elektrického generátoru

Nejvhodnější na výrobu elektrické energie by bylo použít synchronní alternátor. Bohužel koupit alternátor dostatečného výkonu za rozumné peníze se mi nepodařilo a tak jsem se rozhodl použít asynchronní motor s kotvou nakrátko. Sehnat asynchronní motor je vzhledem k jeho rozšířenosti jednoduché. Nakonec jsem zvolil elektromotor MEZ s následujícími štítkovými hodnotami:

Tabulka 2 - Štítkové hodnoty použitého asynchronního stroje

P = 10 kW	S1	50 Hz
ISOL B		Δ 380 V
		20,7 A
90 kg		2940 ot./min.
$\cos \varphi = 0,85$		

Pro účely elektrocentrály bude motor zapojen místo do trojúhelníka do hvězdy, aby mohly být na generátor připojeny jednofázové spotřebiče. Při motorovém běhu se touto změnou zapojení sníží výkon na $1/3$. To ovšem pro ověření funkce a prvotní testy bude stačit. Pro využití plného výkonu generátoru by bylo zapotřebí ze zapojení trojúhelník udělat zapojení do hvězdy. K tomu by byl zapotřebí transformátor s odpovídajícími parametry a konfigurací vinutí. Takovýto transformátor by však byl v porovnání se zbytkem elektrocentrály velice drahý. Navíc by také značně zvýšil váhu celého zařízení. [2]

3.3 Uspořádání prvků elektrocentrály

Celé zařízení je usazeno na pojízdném podvozku, aby bylo možno jej přemísťovat. Spalovací motor je umístěn na konstrukci svařené ze železných profilů. Asynchronní generátor je také umístěn na konstrukci z profilů a jeho polohu je možné přesně nastavovat pomocí šroubů. Tím se dá přesně nastavit osa hřídele asynchronního generátoru a hřídel spalovacího motoru. Ze spalovacího motoru byla odstraněna převodovka. Spalovací motor je s asynchronním generátorem spojen pomocí pružné spojky, tudíž případné menší vychýlení osy by nemělo vadit.

3.4 Návrh budicí soustavy

Jak bylo popsáno v předchozí kapitole, asynchronní generátor v ostrovním režimu potřebuje pro svoji funkci jalovou energii. Tu lze dodat pomocí kondenzátorů připojených ke generátoru. Rozhodl jsem se pro zapojení pouze paralelních kondenzátorů. Problém nastane, pokud bude k elektrocentrále připojena induktivní zátěž. Kondenzátory budou muset v tomto případě dodat jalovou energii jak do generátoru, tak do zátěže. Aby bylo možno regulovat množství dodané jalové energie, rozhodl jsem se budicí soustavu realizovat jako kondenzátory s paralelně připojenými tlumivkami, jejichž proud je regulován pomocí triaků. Budicí soustava tak bude fungovat na principu kompenzace jalového výkonu. Kondenzátory by tedy měly být o něco větší, než je potřeba pro samotný generátor, aby mohly dodávat jalovou energii nejen generátoru, ale i zátěži. [3]

3.4.1 Volba budicích kondenzátorů

Pro přesný výpočet budicí kapacity by bylo zapotřebí znát mnoho parametrů použitého asynchronního stroje, jako jsou rozptylové reaktance nebo odpor vinutí rotoru [4]. Tyto parametry jsem k dispozici neměl a jejich měření by bylo obtížné. Velikost budicí kapacity je také zapotřebí měnit podle charakteru zátěže. Rozhodl jsem se proto určit potřebnou velikost kondenzátorů jednodušším, ale méně přesným způsobem. Velikost budicích kondenzátorů jsem zvolil na základě následujících úvah. Vypočetl jsem jalový proud, který stroj odebírá ze sítě při motorovém chodu, a z tohoto proudu jsem dále dopočetl velikost kondenzátoru, který daný proud dodá při síťovém napětí a kmitočtu.

Štítkové hodnoty, které jsou uvedeny pro zapojení asynchronního motoru do trojúhelníka a napětí 380V, jsem přepočítal na zapojení do hvězdy. Přepojením vinutí motoru z trojúhelníka do hvězdy poklesne síťový proud 3x, z toho jsem vypočetl proud při zapojení do hvězdy:

$$I_Y = \frac{I_\Delta}{3} = \frac{20,7}{3} = 6,9 \text{ A}$$

Dále jsem z účinníku $\cos\varphi$ vypočetl jalový proud, který motor odebírá při provozu ze sítě. Tento proud bude zároveň proud, který budou muset dodávat kondenzátory při generátorickém provozu v ostrovním režimu.

$$I_C = I_Y \cdot \sin(\varphi) = 6,9 \cdot 0,527 = 3,64 \text{ A}$$

Dále jsem z jalového proudu, požadovaného napětí generátoru 230 V a požadované frekvence 50 Hz dopočítal potřebnou velikost kondenzátorů. Výpočet jsem provedl pomocí vzorců reaktance kondenzátoru $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ a Ohmova zákona $U_C = I_C \cdot X_C$, z těchto rovnic jsem vyjádřil vztah pro velikost kondenzátoru, při zapojení kondenzátorů do hvězdy

$$C_Y = \frac{I_C}{\omega \cdot U_C} = \frac{3,64}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 230} = 50,4 \text{ } \mu\text{F}$$

Pro zapojení kondenzátorů do trojúhelníka stačí třetinová kapacita.

$$C_\Delta = \frac{C_Y}{3} = \frac{50,4}{3} = 16,8 \text{ } \mu\text{F}$$

Pro konečnou realizaci jsem se rozhodl použít zapojení kondenzátorů do hvězdy. Zvolil jsem tedy kapacitu kondenzátoru 50 μF . Zapojení do hvězdy jsem zvolil kvůli větší bezpečnosti. Kondenzátory, které jsem použil, jsou motorové kondenzátory na jmenovité napětí 400 V. Jelikož by při ladění regulátorů mohlo náhodou dojít k překročení tohoto napětí, zapojil jsem kondenzátory do hvězdy, kde budou běžně namáhány pouze 230 V. Zároveň budou i namáhány menším proudem, což by mělo prodloužit jejich životnost.

3.4.2 Volba tlumivek

Tlumivky bylo zapotřebí navrhnout tak, aby dokázaly vykompenzovat kapacitní proud vyvolaný kondenzátory. Vzhledem k tomu, že tlumivky na proud přes 3 A jsou již poměrně velké a hlavně drahé, rozhodl jsem se místo přesných výpočtů a nákupu využít něco dostupnějšího. Tlumivky jsem se rozhodl vyrobit z transformátorů z mikrovlnných trub, které by podle své velikosti a výkonu mohly být tím, co potřebuji. Vzhledem k tomu, že na sekundárním vinutí transformátoru je vysoké napětí, rozhodl jsem se sekundární vinutí z bezpečnostních důvodů odstranit a ponechat pouze primární vinutí. Pro provedení této operace bylo nutné rozříznout svary transformátorových plechů

a po odstranění sekundárního vinutí jádro znovu sešroubovat dohromady. Indukčnost jsem měřil síťovou metodou, tedy připojením tlumivky do sítě 230 V 50 Hz a ze změřeného proudu jsem vypočetl indukčnost. Jelikož se mi nepodařilo sehnat tři stejné transformátory, musel jsem vyřešit problém jejich rozdílných indukčností. Ty se pohybovaly od 162 mH do 225 mH. Rozdílné indukčnosti jsem dorovnal změnou vzduchové mezery tlumivek s větší indukčností. Tím jsem trochu zvětšil jejich odebíraný proud a dosáhl jsem rovnoměrnosti indukčností všech tří tlumivek. Vzduchovou mezeru jsem zvětšil pomocí několika listů papíru vložených do jádra tlumivky. Výsledná indukčnost všech tlumivek je přibližně 155 mH. Takovýmito indukčnostmi teče při síťovém napětí a kmitočtu proud 4,75 A, což je sice více, než je pro kompenzaci kapacitního proudu potřeba, ovšem díky jednoduchosti a dostupnosti tohoto řešení jsem se je rozhodl použít. Nevýhodou transformátorů z mikrovlnné trouby jsou také jejich vyšší ztráty, především díky tomu, že plechy jsou na okrajích svařeny, což zvyšuje ztráty vířivými proudy.

4 Návrh řídicího systému elektrocentrály

Úkolem řídicího systému elektrocentrály je zajistit chod spalovacího motoru a zajistit regulaci jeho otáček, řídit budicí soustavu asynchronního generátoru a sledovat jeho elektrické parametry. Dále musí řídicí systém zajistit interakci zařízení s obsluhou.

Řídicí systém jsem se rozhodl realizovat jako soubor několika oddělených zařízení vybavených mikrokontrolérem. Každé z těchto zařízení bude mít na starosti nějakou dílčí činnost a budou spolu vzájemně komunikovat. Zařízení jsou následující:

- a) Hlavní deska má za úkol zprostředkovávat komunikaci s PC, dopočítávat dílčí proměnné (např. výkon a vyrobenou energii), ukládat data na SD kartu, monitorovat parametry elektrocentrály a v případě nebezpečí ji zastavit.
- b) Regulátor rychlosti má za úkol měřit otáčky spalovacího motoru a regulovat je na požadovanou hodnotu pomocí regulace škrticí klapky. Zahrnuje také regulátor frekvence.
- c) Deska měření má za úkol měřit elektrické parametry elektrocentrály, jako jsou napětí a proudy v jednotlivých fázích, frekvence a napětí baterie.
- d) Deska spínání má za úkol spínat dvě sady relé, jedny na 12 V DC, druhé na 230 V AC a zajišťovat připínání a odpínání budicí soustavy generátoru.
- e) Regulátor buzení má za úkol regulovat budicí proud generátoru pomocí triakové regulace a udržovat napětí generátoru na žádané hodnotě.
- f) Ovládací panel má za úkol informovat o stavech elektrocentrály a umožnit základní ovládání i bez připojeného PC.
- g) Měření teploty má za úkol měřit teplotu spalovacího motoru a je do budoucna rozšiřitelné na monitorování tepelných výměníků kogenerace.

Kromě těchto zařízení budou v systému i zařízení bez mikrokontroléru, jako například zdroj napětí pro desku měření nebo desky s relé a odpojovač buzení.

4.1 Sledování parametrů

Pro zajištění chodu elektrocentrály bude potřeba sledovat vybrané parametry, jako jsou otáčky, frekvence, napětí atd. Tyto parametry budou v systému reprezentovány proměnnými, které budou některé desky měřit a některé s nimi pracovat. Jelikož se jedna proměnná bude nacházet v programech několika desek, rozhodl jsem se zavést jednotné názvy těchto proměnných. Jedná se však pouze o proměnné sledující stavy elektrocentrály. Nejedná se o pomocné proměnné, kterých je v každém programu mnoho. Následující tabulka ukazuje názvy, popis a jednotku proměnných, které monitorují nebo nastavují fyzikální veličiny elektrocentrály.

Tabulka 3 - Proměnné pro sledování fyzikálních veličin elektrocentrály

Název proměnné	Popis	Jednotka
RPM_akt	Aktuální otáčky spalovacího motoru	ot./min.
RPM_zad	Žádané otáčky spalovacího motoru	ot./min.
GAS_akt	Aktuální plyn	%
GAS_zad	Žádaný plyn	%
F_akt	Aktuální frekvence	Hz
F_zad	Žádaná frekvence	Hz
U1	Napětí fáze L1	V
U2	Napětí fáze L2	V
U3	Napětí fáze L3	V
I1	Proud fáze L1	A
I2	Proud fáze L2	A
I3	Proud fáze L3	A
Ubat	Napětí baterie	V
U_akt	Aktuální napětí pro regulaci	V
U_zad	Žádané napětí pro regulaci	V
ACind	Otevření triaků regulujících proud indukčnostmi	%
S1	Zdánlivý výkon fáze L1	kVA
S2	Zdánlivý výkon fáze L2	kVA
S3	Zdánlivý výkon fáze L3	kVA
Scelk	Celkový zdánlivý výkon	kVA
kVAh	Vyrobené voltampérhodiny	kVAh
Vyuziti	Procento využití elektrocentrály	%
TmotTep	Teplota motoru	°C
TmotChl	Teplota chladiče	°C

V programech jsou již nadefinovány i proměnné, které zde nejsou zmíněny a které nejsou v programu používány, ovšem je s nimi počítáno do budoucna. Jedná se například o činné a jalové výkony pro situaci, kdy by byl vylepšen modul měření a dokázal měřit i tyto veličiny. V programu jsou také připraveny proměnné pro monitorování kogenerace, jako jsou teploty před a za výměníky, a průtoky jednotlivými výměníky.

Dále jsou v systému proměnné, které nesledují přímo fyzikální veličiny, ale stavy jednotlivých zařízení elektrocentrály nebo stavy a parametry regulátorů. Jejich názvy a popis ukazuje následující tabulka. Tyto proměnné nemají jednotku a kromě konstant PID regulátorů jsou to proměnné dvoustavové, tedy zapnuto nebo vypnuto.

Tabulka 4 - Proměnné sledující stavy zařízení a regulátorů

Název proměnné	Popis
MotorBezi	Říká, zda je motor v chodu nebo je zastaven
BuzeniZapnuto	Říká, zda je připojen budič
VystupSepnut	Říká, zda je sepnut výstupní stykač
Zapalovani	Stav sepnutí relé zapalování
Vetrak	Stav sepnutí chladicího ventilátoru
Odpojovac	Stav odpojovače volnoběhu
Alternator	Stav buzení alternátoru
regGAS	Stav regulátoru plynu
regRPM	Stav regulátoru otáček
regF	Stav regulátoru frekvence
regU	Stav regulátoru napětí
regAC	Stav regulátoru triaků
KP_RPM	Konstanta P regulátoru otáček
KI_RPM	Konstanta I regulátoru otáček
KD_RPM	Konstanta D regulátoru otáček
KP_F	Konstanta P regulátoru frekvence
KI_F	Konstanta I regulátoru frekvence
KD_F	Konstanta D regulátoru frekvence
KP_U	Konstanta P regulátoru napětí
KI_U	Konstanta I regulátoru napětí
KD_U	Konstanta D regulátoru napětí

4.2 Návrh struktury regulace

Protože jsem se celý systém rozhodl realizovat jako několik oddělených zařízení, každé s jiným účelem, bylo nutné rozmyslet, jak a kde budou realizovány regulátory. Prvním byl regulátor plynu, ten bude společně s regulátorem otáček a frekvence v jedné desce, a sice v desce regulátoru rychlosti. Tato deska bude regulovat plyn na žádanou hodnotu, dále regulovat otáčky spalovacího motoru, které bude tato deska i měřit. Regulace frekvence má ten problém, že měření aktuální frekvence bude probíhat v desce měření. Regulace frekvence bude tedy závislá na kvalitní a rychlé komunikaci mezi jednotlivými deskami. Dalším regulátorem bude triakový regulátor proudu tlumivkami, nad kterým bude nadřazený regulátor napětí. Oba tyto regulátory budou v jedné desce. I zde bude potřeba vyřešit problém s komunikací, jelikož aktuální napětí bude měřeno v desce měření.

4.3 Komunikace mezi jednotlivými deskami

Dalším důležitým krokem při návrhu celého systému bylo vyřešit komunikaci mezi jednotlivými deskami. Jak bylo popsáno výše, některé regulátory budou přijímat aktuální hodnotu regulované veličiny z jiné desky. Bude proto zapotřebí zajistit komunikaci mezi deskami takovou, aby

dokázala dostatečně rychle a bez chyb přenášet měřená data. Pro tyto účely jsem se rozhodl využít CAN (Controller Area Network).

Tento komunikační protokol byl vytvořen pro použití v automobilové technice firmou BOSCH. Jedná se o sériovou komunikační sběrnici, která byla navržena pro vysoké komunikační rychlosti (až 1Mbit/s) a vysokou spolehlivost. Na sběrnici může být připojen teoreticky neomezený počet uzlů. Samotný protokol CAN 2.0 zajišťuje sledování sběrnice pro umožnění vysílání, vysílání zpráv podle jejich priority a je k dispozici kontrola chyb přenosu pomocí kontrolního součtu. Struktura zprávy obsahuje identifikační bity, které zároveň plní funkci určování priority zprávy. Dále zpráva obsahuje samotná data a kontrolní součet. Pro použití pro řídicí systém je výhodný vysoký počet uzlů a možnost jejich dalšího přidávání. Dále je výhodou odesílání zpráv podle priority, kdy důležité údaje pro regulátory mohou být odesílány s vyšší prioritou, než například teploty. Nevýhodou je složitější řízení sběrnice, nicméně na trhu jsou dostupné moduly, které komunikační protokol obsahují. [6]

5 Návrh a realizace hardwaru

Výše zmíněné součásti řídicího systému jsem realizoval jako jednotlivé plošné spoje. Výhodou rozdělení systému na jednotlivé plošné spoje je snadnější možnost oprav nebo úprav jednotlivých součástí v případě potřeby. Nevýhodou tohoto přístupu je potřeba řešit komunikaci mezi jednotlivými součástmi a s tím spojená vyšší spotřeba komunikačních modulů. Kromě výše zmíněných součástí, které jsou vybaveny mikrokontrolérem, obsahuje řídicí systém i plošné spoje bez mikrokontroléru, jako je například zdroj napětí pro operační zesilovače, desky s relé a desky se svorkovnicemi. Kompletní schémata, výkresy plošných spojů a rozmístění součástek jsou k dispozici v příloze na CD.

5.1 Použité vývojové desky a moduly

Pro účely řízení jsem se rozhodl využít mikrokontroléry Atmel na vývojových deskách Arduino. Jedná se o open source vývojovou platformu, jejíž součástí je i vývojové prostředí, které obsahuje i volně dostupné knihovny na ovládání periférií mikrokontroléru a některých externích modulů. To značně zrychluje vývoj programů. Vzhledem k jejich dobré dostupnosti, nízké ceně a faktu, že s nimi již mám zkušenost z bakalářské práce, se jejich použití jevílo jako optimální.

5.1.1 Mikrokontrolér hlavní řídicí desky

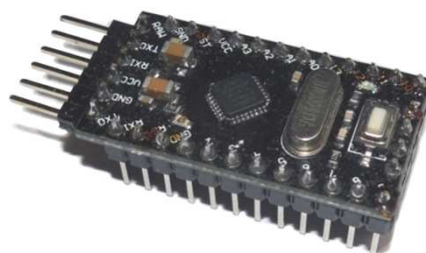
Na hlavní řídicí desce je použita vývojové deska Arduino Mega2560. Je vybavena mikrokontrolérem od firmy Atmel ATmega2560. Jedná se o osmibitový mikrokontrolér pracující s taktovací frekvencí 16 MHz. Disponuje 256 KB flash paměti, 8 KB operační paměti a 4 KB EEPROM. Tato vývojová deska je navíc vybavena dalším mikrokontrolérem na komunikaci s PC. Ten zprostředkovává komunikaci přes USB pomocí virtuálního COM portu. Přes tento mikrokontrolér je zároveň programován hlavní mikrokontrolér ATmega2560. Stejný komunikační port je využit při komunikaci s ovládacím programem na počítači. Mikrokontrolér je dále vybaven čtyřmi sériovými komunikačními kanály UART, jedním hardwarovým SPI a I2C sběrnici. [7]



Obrázek 6 - Arduino Mega 2560

5.1.2 Mikrokontroléry na ostatních deskách

Na ostatních deskách řídicího systému jsou použity také vývojové desky Arduino, avšak jedná se o menší a levnější typy, než je typ použitý na hlavní řídicí desce. Jedná se o Arduino Pro Mini 168 nebo Arduino Pro Mini 328. Tyto vývojové desky jsou osazeny osmibitovými mikrokontroléry od firmy Atmel. Konkrétně typy ATmega168 a ATmega328. Tyto disponují pamětí o velikosti 16 respektive 32 KB flash paměti, což pro menší programy stačí. Nevýhoda těchto vývojových desek je, že potřebují připojit externí programovací obvod při nahrávání programu. To je však vyváženo jejich cenou, která je necelých 40 Kč za kus. Tyto mikrokontroléry mají také méně periférií než vyšší verze použitá na hlavní řídicí desce. [8]



Obrázek 7 - Arduino Pro Mini

5.1.3 Modul na zprostředkování komunikace po sběrnici CAN

Všechny dílčí komponenty řídicího systému spolu vzájemně komunikují pomocí sběrnice CAN. Na obsluhu komunikace po sběrnici CAN jsem se rozhodl použít hotové moduly s mikrokontrolérem MCP2515. Tento modul komunikuje s nadřazeným mikrokontrolérem po sběrnici SPI. Použitý modul sám sleduje komunikaci na sběrnici a zachycené zprávy ukládá do dvou bufferů, jejichž naplnění signalizuje vyvoláním nízké úrovně na pinu přerušení. To zachytí nadřazený mikrokontrolér, přes sběrnici SPI přečte obsah bufferů a zpracuje příchozí zprávy. Na odesílání zpráv

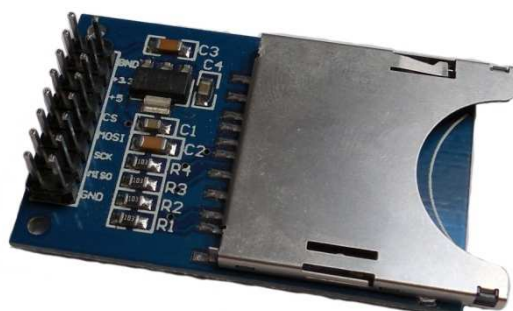
má modul k dispozici tři buffery pro odchozí zprávy, které jsou odesílány podle důležitosti, co nejdříve to dovolí stav sběrnice. Kontrolér MCP2515 podporuje specifikaci CAN 2.0B s maximální rychlostí až 1 MB/s. Celkem je v řídicím systému použito 7 těchto modulů. [14]



Obrázek 8 - Modul MCP2515 CAN

5.1.4 Modul na SD kartu

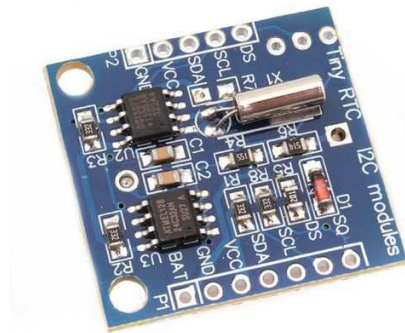
Na hlavní řídicí desce je implementována funkce dataloggeru, který ukládá měřená data na SD kartu. K tomuto účelu byl použit hotový modul na připojení SD karty. Tento modul propojuje SD kartu s mikrokontrolérem pomocí sběrnici SPI. SD karta potřebuje ke své práci napětí 3.3V. Modul tedy musí být připojen k mikrokontroléru přes úroňový převodník.



Obrázek 9 - Modul SD karty

5.1.5 Modul reálného času

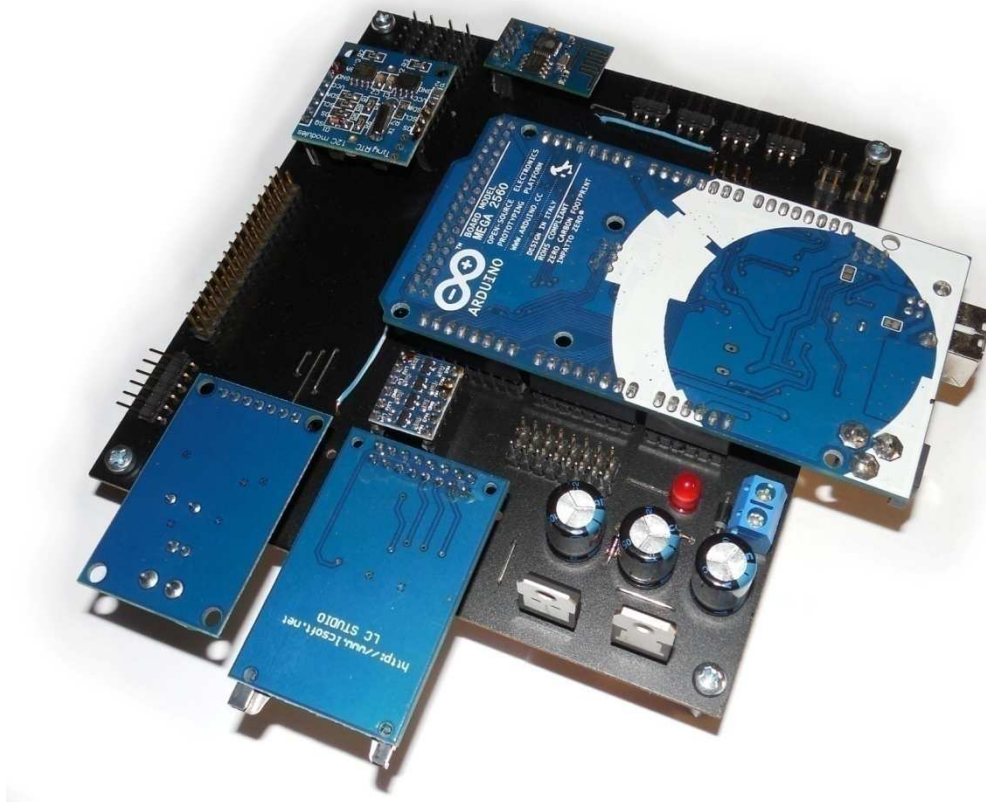
Pro funkci dataloggeru je zapotřebí znát aktuální čas a datum. K tomu je využit modul reálného času (anglicky Real Time Clock – RTC) s obvodem DS1307. Tento obvod dokáže udržovat ve své paměti informace o aktuálním čase a datu. Data odesílá do nadřazeného mikrokontroléru přes sběrnici I2C. Dokáže odesílat aktuální sekundy, minuty, hodiny, dny v měsíci a dny v týdnu, měsíc a aktuální rok. K udržení informace i při výpadku hlavního napájení je modul vybaven záložní lithiovou baterií, která zajišťuje aktuální čas i po dobu co je řídicí systém odpojen od baterie elektrocentrály. [15]



Obrázek 10 – Modul reálného času

5.2 Hlavní řídicí deska

Hlavní řídicí deska je osazena vývojovou deskou Arduino Mega 2560. Ta zajišťuje komunikaci s PC přes sériový port po sběrnici USB. Dále je hlavní řídicí deska vybavena modulem pro komunikaci po sběrnici CAN, na které probíhá komunikace mezi jednotlivými komponenty řídicího systému. Deska je dále vybavena funkcí dataloggeru, který ukládá měřená data na SD kartu. Modul SD karty i CAN modul jsou připojeny k mikrokontroléru přes sběrnici SPI. SD karta ovšem pro svou funkci potřebuje napětí 3.3 V a CAN modul pracuje na úrovni 5 V. Mezi modul s SD kartou a Arduino je tedy vložen úrovnňový převodník. Datalogger dále pro svou funkci využívá modul reálného času, který poskytuje informace o aktuálním čase a datu. Deska je napájena z hlavního bateriového rozvodu elektrocentrály o napětí 12 V a z něj jsou přes lineární stabilizátory napětí zmenšeny na 5 V a 3.3 V. Na desce jsou dále vyvedeny i nepoužité periferie jako je UART a vstupně výstupní piny pro případné budoucí použití. K dispozici je i WiFi modul, který by v budoucnu mohl zajišťovat komunikaci s PC, nebo odesílání aktuálních dat elektrocentrály do webového prohlížeče. Na dva digitální výstupy jsou také připojeny LED diody, které na předním panelu zobrazují stav řídicího systému.



Obrázek 11 - Hlavní řídicí deska

5.3 Regulátor rychlosti

Jednou ze základních funkcí řídicího systému je regulace otáček spalovacího motoru. Na otáčkách spalovacího motoru je závislé jak napětí, tak frekvence asynchronního generátoru. Řízení otáček a výkonu spalovacího motoru se provádí pomocí škrticí klapky. Ta je standardně ovládána pomocí Bowdenova kabelu, který je přímo připojen k plynovému pedálu. Pro účel elektrocentrály je ovšem nutné otáčky regulovat bez obsluhy a pokud možno je držet na konstantní hodnotě. Proto jsem se rozhodl vyrobit přípravek, který bude schopen tahat za lanko plynu podle potřeby regulátoru otáček a frekvence.

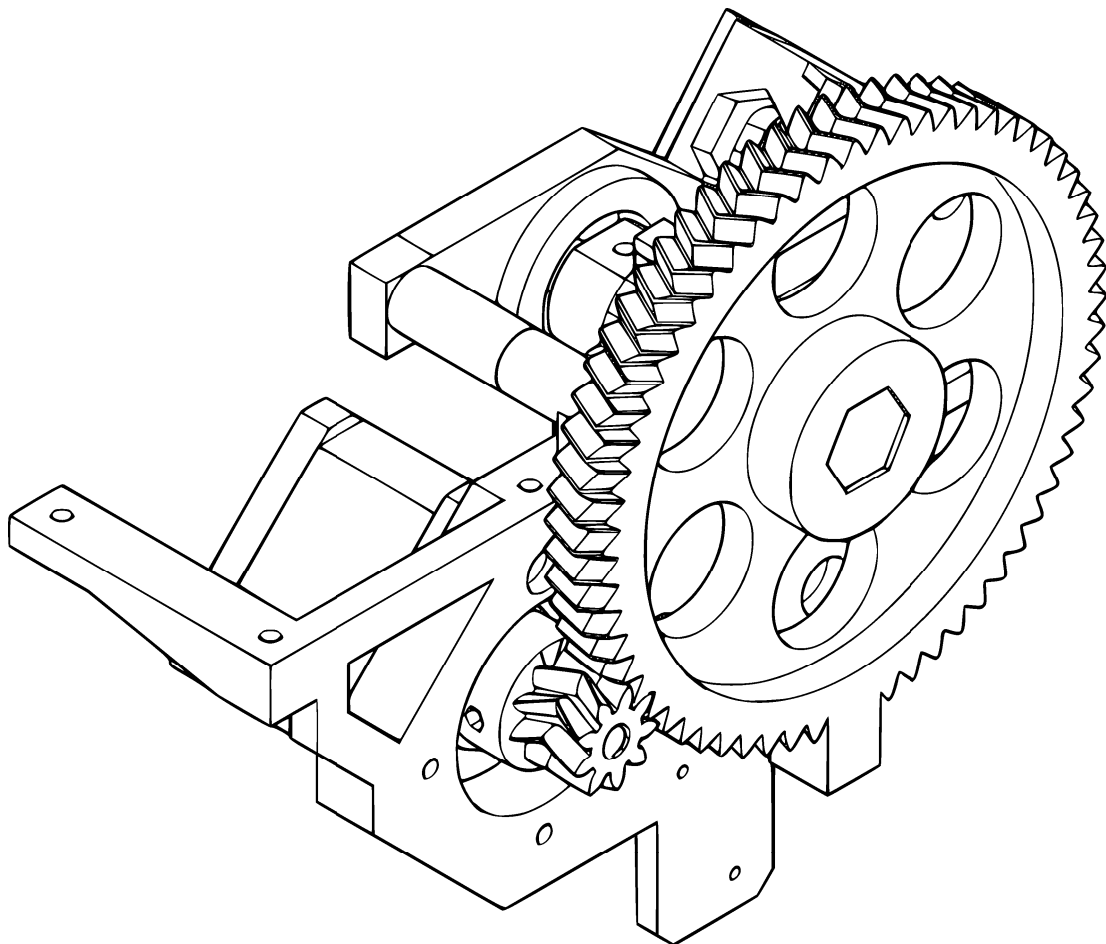
5.3.1 Návrh přípravku na regulaci rychlosti

K regulaci škrticí klapky připadalo v úvahu několik možných řešení. Nejelegantnější by bylo použít dostatečně silný servomotor přímo připojený k plynovému lanku. Bohužel servomotor, který byl dostatečně silný na překonání odporu pružiny škrticí klapky, stál okolo 2500 Kč. Proto jsem se rozhodl pro méně elegantní, ale levnější řešení. Použil jsem malý krokový motor s převodem z ozubených kol. Motor je dále řízen Pololu driverem, což je zapojení s obvodem A4988, které je přímo určeno k řízení malých krokových motorů. Použití krokového motoru má však i své nevýhody, a sice rychlost změny polohy škrticí klapky je při použití krokového motoru s převodem malá, což

může být problém, když je elektrocentrála v přechodném stavu a je třeba rychle měnit pozici škrticí klapky. Motor s ozubenými koly byl připevněn na přípravek vytištěný na 3D tiskárně. [11]

5.3.2 Vlastní realizace přípravku na regulaci rychlosti

K ovládní škrticí klapky jsem použil motor od firmy Microcon, konkrétně typ SX17-1005. Jedná se o dvoufázový hybridní krokový motor se statickým momentem 0,5 Nm při proudu 1 A. Motor má 200 kroků na otočku, což odpovídá $1,8^\circ$ na jeden krok. Pololu driver navíc umožňuje řídit motor až se šestnácti mikrokroky, což zpřesňuje řízení. Motor je dále přes ozubená kola s převodem 1 : 9 připojen na navíjecí šroub. Poloměr navíjecího šroubu byl určen z pracovního rozsahu pohybu lanka plynu. Lanko se od minimálního po maximální otevření škrticí klapky posune o 3,5 cm. Navíjecí šroub tuto vzdálenost navine přibližně na 1/2 otáčky. Velké ozubené kolo je navíc opatřeno výstupkem, který při minimálním plynu sepne koncový spínač a řídicí obvod si tak dokáže nastavit nulovou polohu. Poloha maximálního plynu je nastavena softwarově. [10]

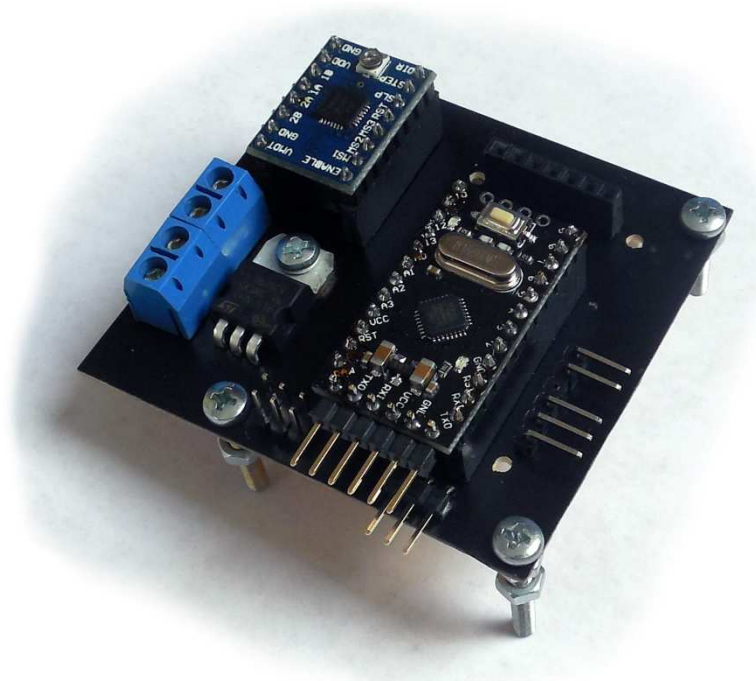


Obrázek 12 - Mechanismus na regulaci škrticí klapky

5.3.3 Návrh řídicího obvodu regulace otáček

Dále bylo třeba navrhnout obvod, který bude v elektrocentrále zastávat funkci regulátoru rychlosti a frekvence. K tomuto účelu jsem navrhl plošný spoj, který obsahuje řídicí mikrokontrolér,

Pololu driver a konektory k připojení napájení, Hallovy sondy na měření otáček, koncového spínače, konektor na připojení krokového motoru a CAN modul pro komunikaci se zbytkem systému. Jako mikrokontrolér jsem použil vývojovou desku Arduino Pro Mini s mikrokontrolérem Atmel ATmega168. Úkolem mikrokontroléru je pomocí Hallovy sondy měřit otáčky spalovacího motoru a pomocí PID regulátoru regulovat polohu škrticí klapky tak, aby aktuální otáčky byly rovné žádaným otáčkám. Žádané otáčky přijímá regulátor z hlavní řídicí desky nebo od regulátoru frekvence, který je také implementován v mikrokontroléru. Řízení polohy krokového motoru probíhá pomocí Pololu driveru. Ten přijímá od mikrokontroléru impulsy jako signál k provedení kroku a pomocí logické úrovně na vstupním pinu DIR se mění směr otáčení. Výhodou použití driveru je, že sám umí řídit krokový motor v režimu až 16 mikrokroků, což sníží vytížení mikrokontroléru. Obvod a krokový motor je napájen z 12 V sítě elektrocentrály.

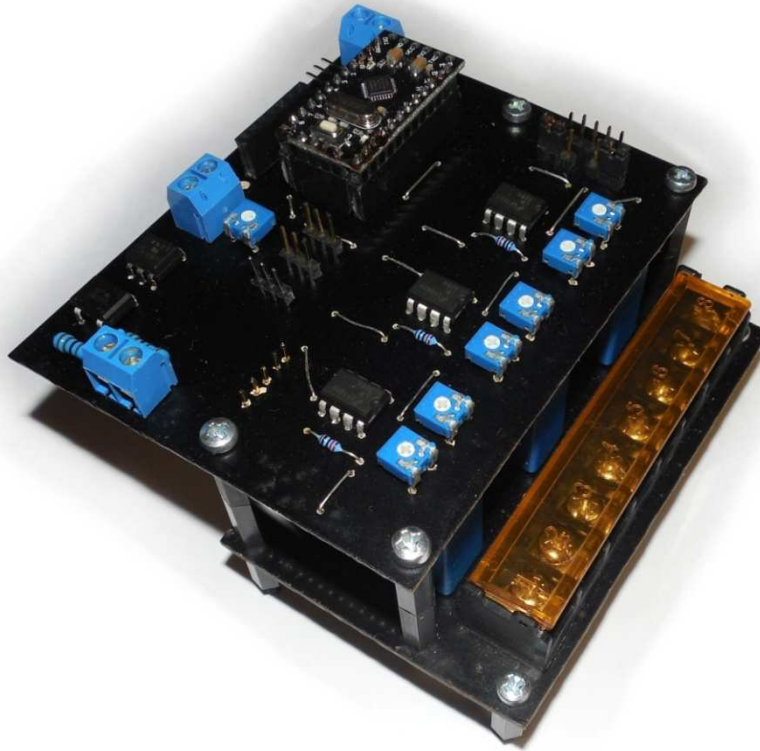


Obrázek 13 - Plošný spoj regulátoru otáček

5.4 Deska měření

Pro účely regulace a provozu elektrocentrály bude zapotřebí měřit napětí a proudy v jednotlivých fázích generátoru a frekvenci. K tomu jsem sestavil jednu funkční jednotku. Skládá se ze spodní části, kde jsou umístěna čidla na měření proudu od firmy LEM. Jedná se o převodníky proudu LEM LAH 50-P s převodním poměrem 1:2000. Jejich proudový výstup je potřeba na měřicím odporu převést na napětí a toto napětí pomocí operačních zesilovačů správně škálovat a posunout tak, aby jejich výstup mohl být v celém rozsahu přiveden na AD převodník mikrokontroléru, jehož rozsah je od 0 do 5 V. Na měření napětí byly použity 3 samostatné moduly s měřicím transformátorem napětí, které mají operační zesilovač a škálování vyřešeno již v sobě. Výstupy modulů jsou připojeny k AD

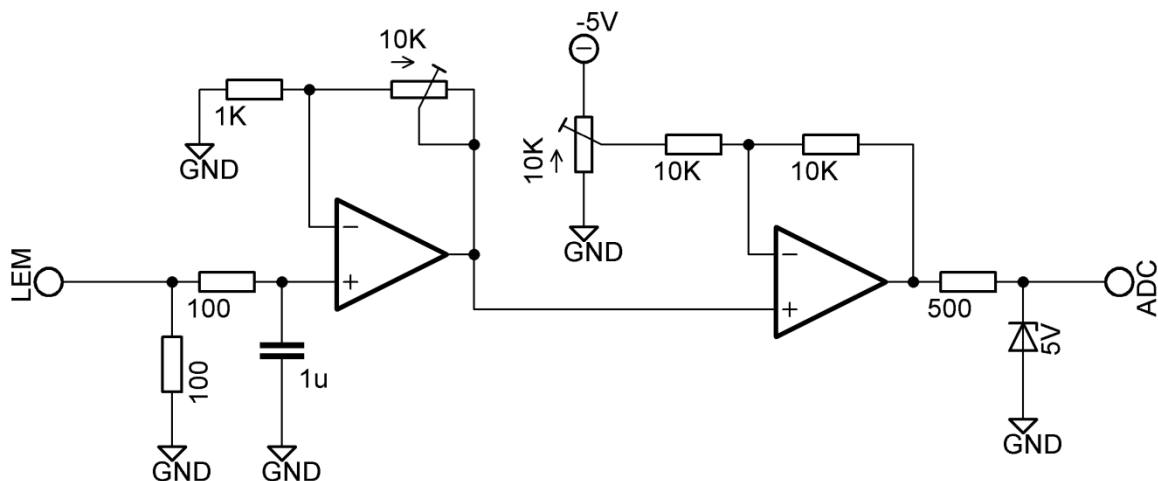
převodníkům mikrokontroléru. Dále tato deska umožňuje měřit frekvenci výstupního napětí generátoru a napětí palubní bateriové sítě elektrocentrály. Pro napájení operačních zesilovačů a LEMů je ovšem potřeba oboupolaritní zdroj napětí. Pro LEMy je zapotřebí ± 12 V a pro operační zesilovače ± 5 V. Pro tyto účely byl zkonstruován zdroj, který bude popsán dále. [12]



Obrázek 14 - Deska měření

5.4.1 Zapojení měřícího obvodu proudu

Proud ve třech fázích je měřen třemi čidly proudu LEM. Ty pracují na principu Hallova jevu a zajišťují galvanické oddělení měřeného proudového obvodu od obvodů s mikrokontrolérem. LEMy jsou napájeny napětím ± 12 V a jejich výstup má proudový charakter. Proud vytváří na odporu 100Ω napětí, které dále prochází filtrem a následně je pomocí dvou operačních zesilovačů posunuto tak, aby nulový proud odpovídal 2,5 V na vstupu AD převodníku mikrokontroléru. Druhý operační zesilovač zajišťuje správné nastavení rozsahu tak, aby byl AD převodník co nejlépe využit. Toto zapojení je stejné pro všechny tři fáze. Operační zesilovače jsou napájeny napětím ± 5 V. Zapojení obsahuje i dolní propust pro potlačení rušení a ochranu vstupu AD převodníku. [12]



Obrázek 15 - Schéma zapojení měření proudu

5.4.2 Měřící obvody napětí

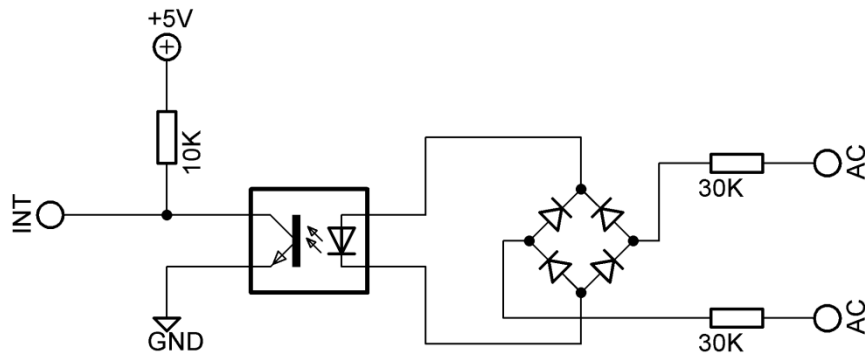
Na měření napětí jsem využil hotové moduly s měřicím transformátorem napětí, který zajišťuje galvanické oddělení. Moduly jsou tři, pro každou fázi generátoru jeden. Měří fázové napětí v rozsahu do 250 V střídavých. Výstupem těchto modulů je napětí posunuté tak, aby 0 V odpovídalo 2,5 V na vstupu do AD převodníku. Pomocí trimru je možné nastavit zesílení signálu tak, aby byl co nejlépe využit rozsah AD převodníku. Tyto moduly jsou propojeny s deskou měření a jejich výstupy jsou připojeny na vstupy AD převodníku.



Obrázek 16 - Modul s měřicím transformátorem napětí

5.4.3 Měřící obvod frekvence

Pro měření frekvence je zapotřebí detekovat průchod napětí nulou. K tomu jsem využil jednoduchý obvod, který střídavé napětí přes diodový můstek usměrní a usměrněné napětí, tedy dvě kladné půlvlny, uzemňují přes optotranzistor vstupní pin přerušení mikrokontroléru. V něm je pak pomocí čítače změřena doba mezi jednotlivými průchody napětí nulou a z naměřené doby je dopočítána frekvence. [5]



Obrázek 17 - Schéma zapojení měření frekvence [5]

5.4.4 Měřicí obvod napětí baterie

Deska měření také umožňuje měřit napětí palubní bateriové sítě elektrocentrály. Měření tohoto malého napětí je realizováno pouze pomocí nastavitelného odporového děliče, jehož výstup je přiveden na AD převodník. Dělič je nastaven na maximální rozsah 20 V, přestože v palubní síti objevuje napětí do 15 V.

5.5 Zdroj napětí pro desku měření

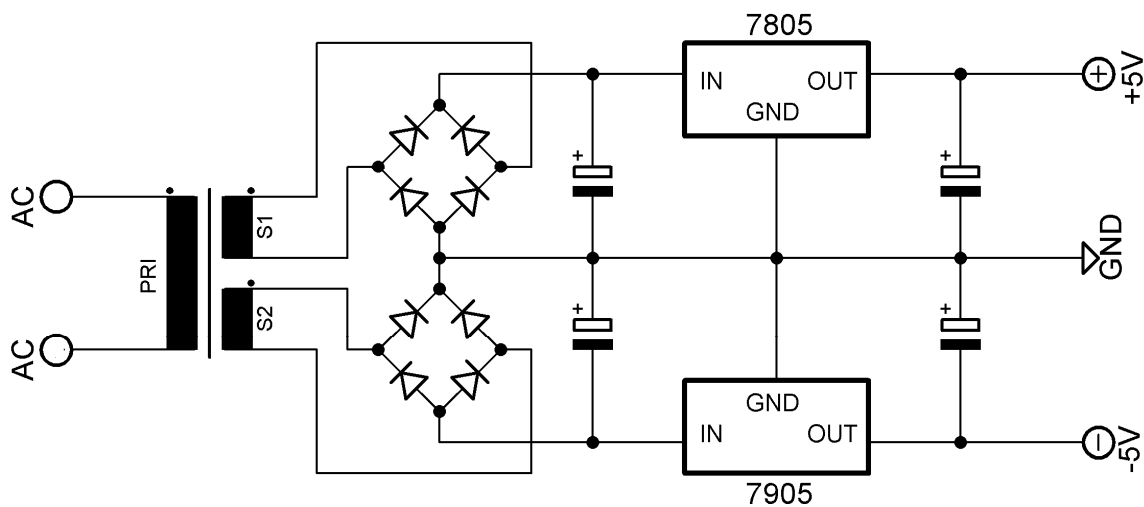
Pro napájení desky měření je zapotřebí napětí obou polarit, tedy ± 12 V a ± 5 V. LEMy jsou napájeny ± 12 V a operační zesilovače vyžadují ± 5 V. Vzhledem k tomu, že napětí baterie je pouze +12 V, rozhodl jsem se využít samotné napětí generované asynchronním generátorem. Nevýhoda toho řešení je, že měření proudu není k dispozici, dokud se generátor nenabudí na jmenovité napětí. To ovšem nevadí, jelikož výstup do zátěže se spíná až po dosažení jmenovitého napětí. Měření napětí pro regulátor buzení funguje z bateriové sítě, tudíž k chybě regulace napětí by nemělo dojít.

Na stavbu zdroje jsem se rozhodl využít transformátor se dvěma sekundárními vinutími, jejichž výstupy jsem usměrnil pomocí Graetzových můstků. Usměrněná a vyhlazená napětí jsem spojil do série a jejich střed jsem připojil na společnou zem. Z těchto dvou napětí jsem pomocí lineárních stabilizátorů vytvořil napětí +12 V, +5 V, -5 V a -12 V. Na všech čtyřech větvích jsou vyhlazovací kondenzátory, které zajišťují stabilitu výstupního napětí. Transformátor má výkon 8 VA a každé ze sekundárních vinutí má jmenovité napětí 12 V střídavých a proud 0,33 A. Celý zdroj je připojen na fázi L1 generátoru.



Obrázek 18 - Zdroj ± 12 V a ± 5 V

Následující obrázek ukazuje zjednodušené schéma napájecího zdroje. Na schématu je pouze jedna větev a to ± 5 V. Větev ± 12 V vypadá analogicky, s tím rozdílem, že jsou použity regulátory na výstupní napětí $+12$ V a -12 V. Transformátor, usměrňovače a první vyhlazovací kondenzátory jsou společné pro obě větve. U regulátorů jsou také umístěny blokovací kondenzátory 100 nF a regulátory jsou překlenuty zpětnými diodami, aby v případě výpadku napájení před regulátorem nebylo na výstupu regulátoru vyšší napětí, než na vstupu. Každá větev má také diodu, signalizující funkci dané větve, a která také slouží jako minimální zátěž pro regulátory.



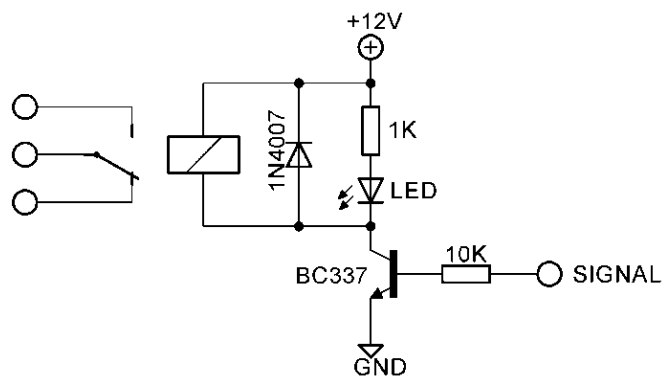
Obrázek 19 - Zjednodušené schéma zdroje pro napájení desky měření

5.6 Desky na spínání obvodů

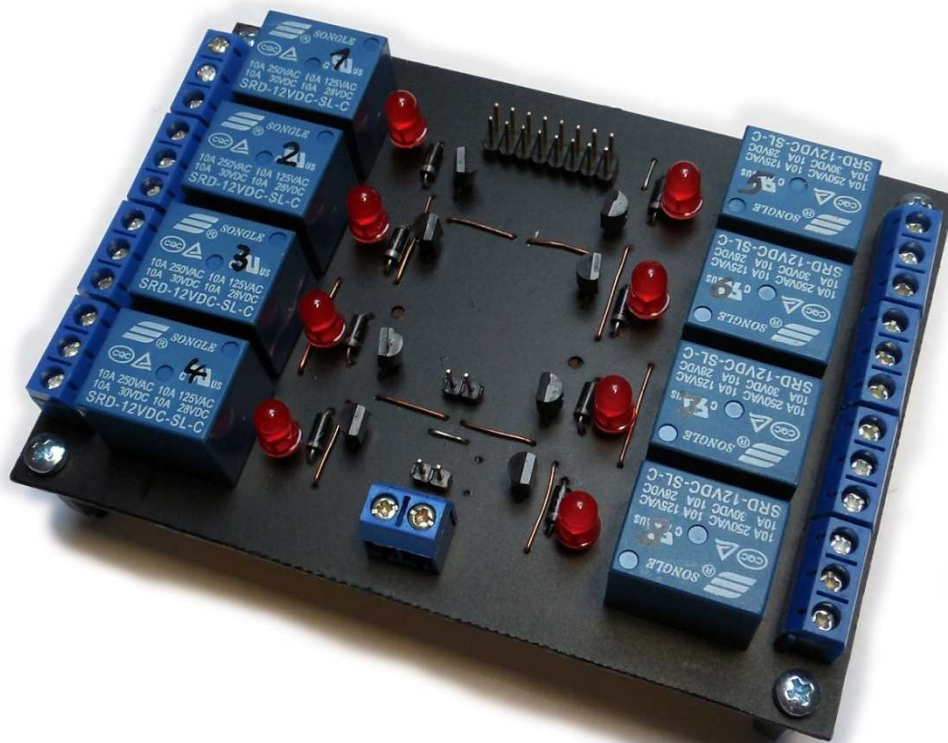
Pro účely řízení elektrocentrály je zapotřebí mít k dispozici řadu spínacích prvků. Desky zajišťující spínání jsou v systému čtyři. Samostatná je deska s osmi relé na 230 V střídavých, deska s osmi relé na 12 V stejnosměrných, deska spínání budiče a všechny jsou řízeny centrální deskou s mikrokontrolérem, která všem říká, co má být sepnuto.

5.6.1 Deska s relé na 230 V

Tato deska je zatím využita pouze na spínání cívky výstupního stykače. Je zde hlavně kvůli budoucímu rozšiřování elektrocentrály a případné kogeneraci, kde by mohla spínat ventily nebo čerpadla, popřípadě jiné spotřebiče na 230 V. Na desce je umístěno 8 relé s přepínacím kontaktem na 230 V. Cívka relé je na 12 V stejnosměrných, což je napětí baterie elektrocentrály. Cívka relé je spínána tranzistorem, jehož báze je připojena na řídicí signál od mikrokontroléru. Cívka relé je překlenuta zpětnou diodou, aby nedošlo k proražení tranzistoru při vypnutí vlivem indukčnosti vinutí. Každé relé má také paralelně zapojenou LED diodu na signalizaci sepnutí. Na následujícím obrázku je zapojení jednoho relé. Ostatní relé jsou zapojena stejně.



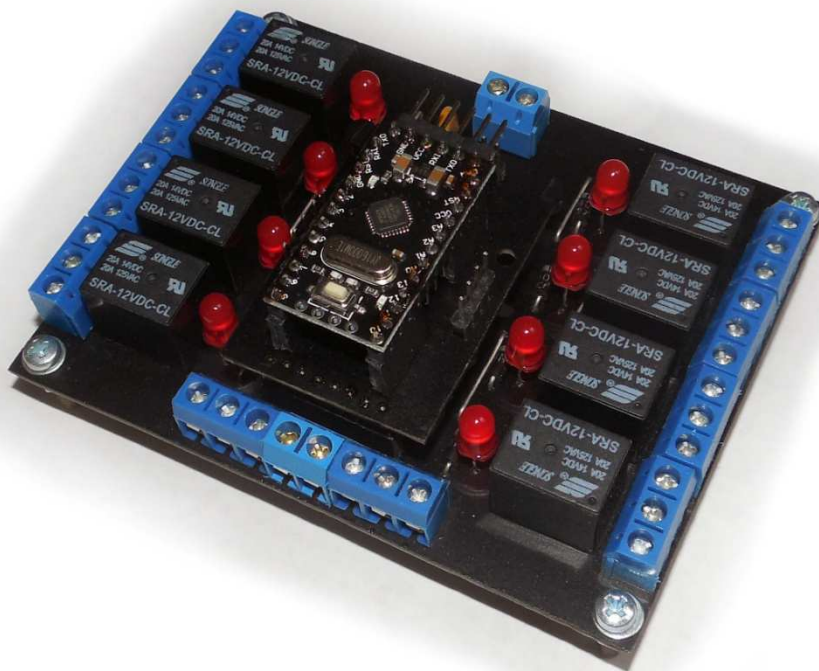
Obrázek 20 - Zapojení spínacího obvodu relé



Obrázek 21 - Deska s relé na 230 V

5.6.2 Deska s relé na 12V

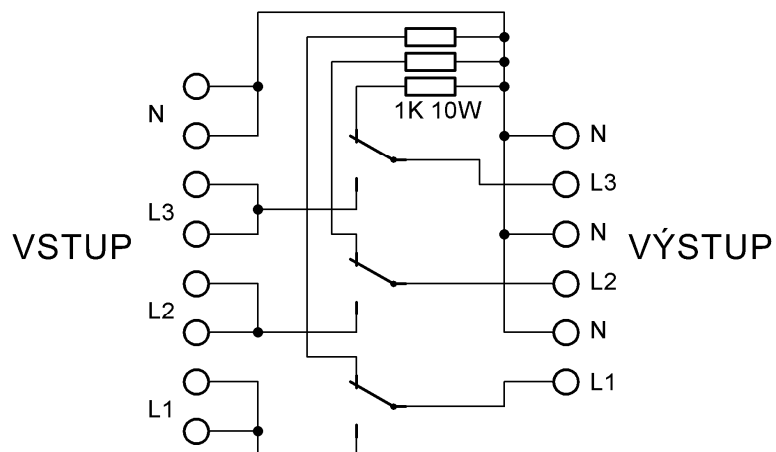
Tato deska slouží ke spínání všech 12 V spotřebičů elektrocentrály. Jedná se o spínání startovací cívky, zapalování, odpojovač volnoběhu, buzení alternátoru na spalovacím motoru a ventilátoru chladiče. Relé jsou dimenzována až na 14 V a 20 A a jedná se o relé s jedním přepínacím kontaktem. Spínací cívka je stejně jako v předchozím případě na 12 V stejnosměrných. Zapojení je tedy stejné jako na desce s relé 230 V.



Obrázek 22 - Deska s relé na 12 V

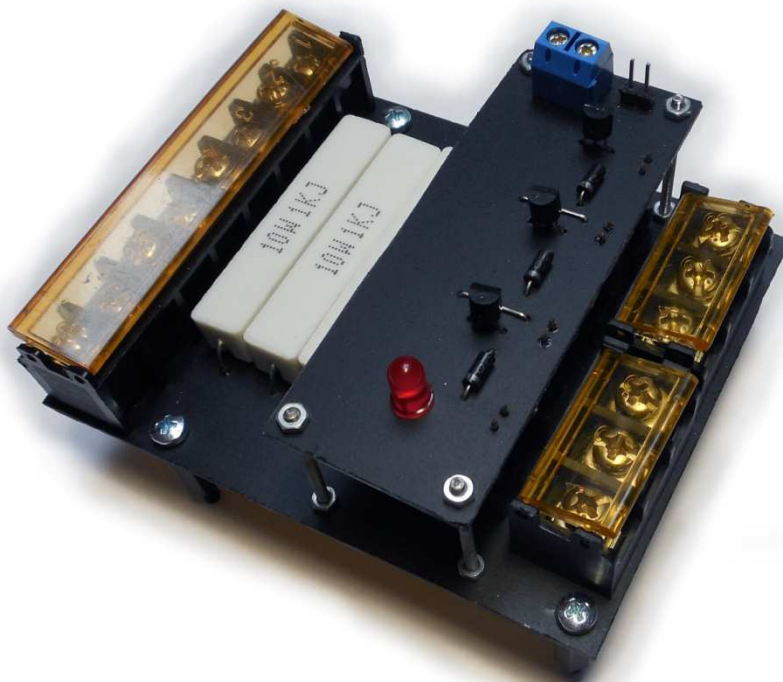
5.6.3 Deska spínání budiče

Pro nabuzení asynchronního generátoru je zapotřebí připojit k němu paralelně kondenzátory. Bylo tedy zapotřebí vymyslet spínací systém s relé, který by byl schopný sepnout najednou všechny tři fáze, a zároveň bylo nutné zajistit vybití kondenzátorů při odpojení. K tomu jsem navrhl plošný spoj, kde jsou tři relé na 230 V střídavých spínané jedním signálem. Ovšem zde je využit i kontakt relé, který je ve vypnutém stavu spojený. Přes tento kontakt se po odpojení od generátoru všechny tři kondenzátory připojí přes výkonové odpory k nulovému vodiči a odvede se z nich zbytkový náboj, aby byl rozvaděč bezpečný i po odpojení. Kondenzátory a zbytek budiče jsou k desce připojeni pomocí svorkovnic. Na následujícím obrázku je schéma zapojení silové částí desky spínání budiče. Spínací cívka relé je zapojena stejně, jako na předchozích deskách.



Obrázek 23 - Schéma zapojení silové části spínání budiče

Obvody pro spínání relé jsou na samostatné desce umístěné nad relé. Cívky relé jsou s obvody tranzistorů propojeny pomocí dlouhých kolíkových lišt. Toto zapojení bylo zvoleno, aby na spodním plošném spoji nebyly příliš blízko silové obvody a obvody spínání.



Obrázek 24 - Deska spínání budiče

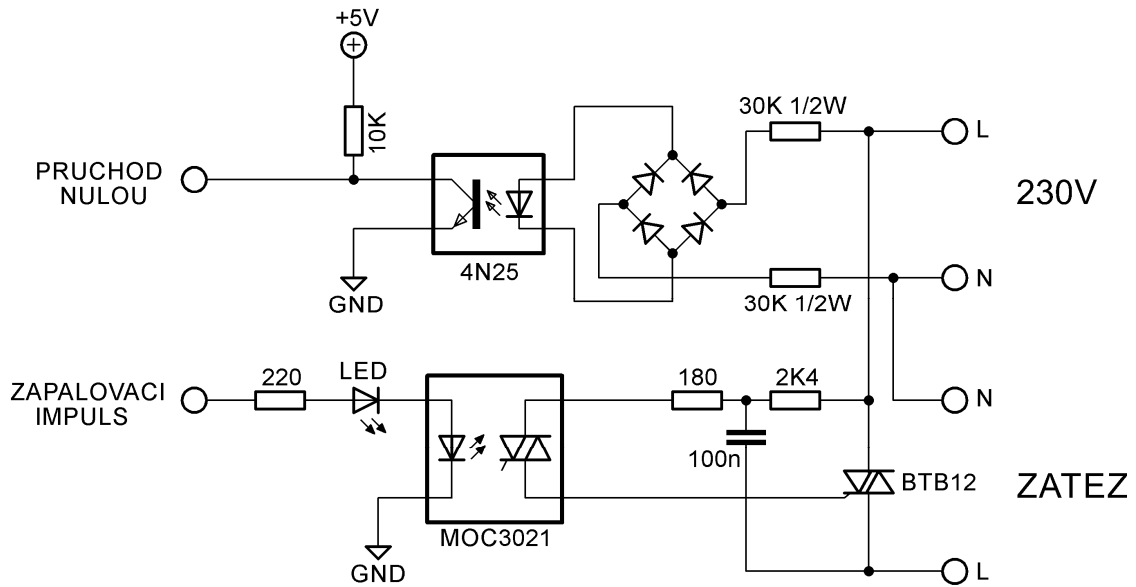
5.6.4 Centrální deska na řízení spínání

Všechny tři předchozí desky jsou řízeny touto deskou, která je vybavena mikrokontrolérem Arduino Pro Mini 168. K mikrokontroléru je přes sběrnici SPI připojen CAN modul, který zajišťuje komunikaci se zbytkem systému. Vzhledem k tomu, že bylo zapotřebí spínat 16 relé a budič

a vývojová deska má po připojení CAN modulu již pouze 12 použitelných výstupů, rozhodl jsem se spínání relé realizovat pomocí posuvných registrů 4094. Ty fungují tak, že binární data přijímají sériově a převedou je na výstupy paralelně. Posuvné registry jsou zde zapojeny dva v sérii, přičemž každý z nich má 8 paralelních výstupů. Každý posuvný registr tedy spíná jednu desku s osmi relé. Výhodou tohoto zapojení je, že na spínání šestnácti relé stačí 4 výstupy mikrokontroléru. Spínání budiče je řešeno pomocí tranzistoru a samostatného výstupního pinu mikrokontroléru.

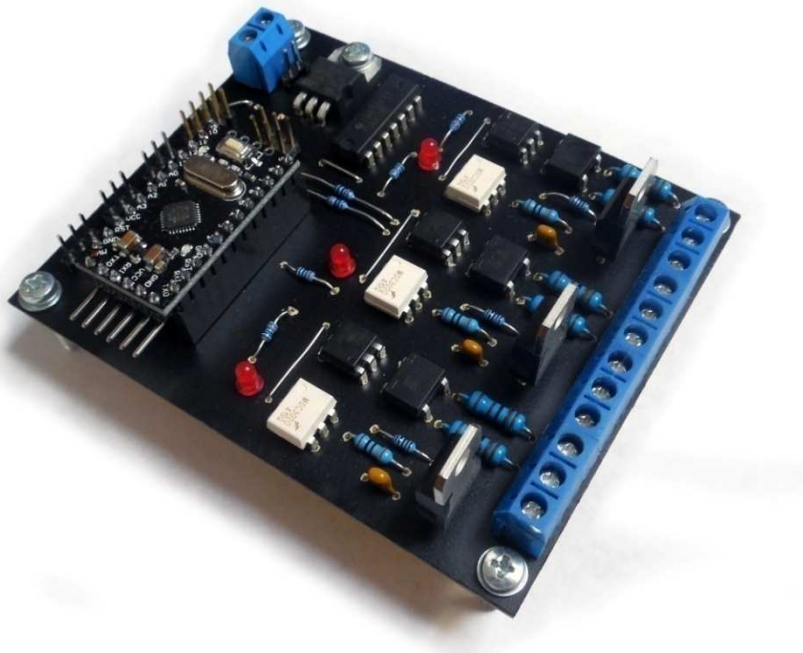
5.7 Regulátor buzení

Pro nabuzení asynchronního generátoru je zapotřebí, aby jeho vinutími protékal magnetizační proud. Ten má induktivní charakter. Zdrojem tohoto proudu tedy musí být kondenzátor. Problém nastává, když je zapotřebí tento proud regulovat. Spínání kondenzátoru ve střídavé síti má za následek proudové rázy, proto je výhodnější spínat indukčnosti, jejichž proud se odečítá od proudu kondenzátory. K regulaci induktivního proudu jsem se rozhodl postavit třífázový triakový regulátor. Reálně se jedná o tři jednofázové triakové regulátory, které jsou řízeny všechny stejným úhlem sepnutí. Jedná se tedy o fázové řízení. Principem tohoto typu řízení je sepnout triak až určitou dobu od průchodu napětí nulou. Sepnutí ihned po průchodu nulou odpovídá úhlu otevření 0° a sepnutí na konci půlperrody odpovídá 180° . Pokud jsou jako zátěž zapojeny indukčnosti, je rozsah řízení omezen pouze na 90° až 180° . Obvod tedy nejprve musí detekovat průchod napětí nulou a od něj odpočítat požadovaný čas, který odpovídá úhlu sepnutí, než vyše zapínací signál pro triak. Jelikož se na jednom plošném spoji nachází síťové napětí a řídicí obvody, musí zde být galvanické oddělení. Detekce průchodu nulou probíhá přes optotranzistor 4N25 a spínání hlavního triaku probíhá přes menší optotriak MOC 3021. Hlavní triak BTB12 má jmenovitý proud 12 A, přičemž s použitými indukčnostmi by pracovní proud neměl překročit 5 A. Na následujícím obrázku je schéma zapojení spínací části jedné fáze. [5]



Obrázek 25 - Schéma zapojení jedné fáze triakového regulátoru [5]

Deska regulátoru buzení je dále vybavena konektorem pro připojení CAN modulu, který zajišťuje komunikaci se zbytkem systému. Napájení je zajištěno z palubní sítě 12 V a pomocí lineárního regulátoru je sníženo na 5 V.



Obrázek 26 - Triakový regulátor výkonu

5.8 Ovládací panel

Pro účely obsluhy elektrocentrály bylo zapotřebí vyrobit jednoduchý ovládací panel, který by umožnil základní ovládání elektrocentrály v případě, že by nebyla připojena k PC. K tomuto účelu jsem vyrobil panel, který je umístěn vně hlavní bedny, ve které je umístěn řídicí systém. Na panelu

vlevo je informační LCD displej. Jedná se o displej se čtyřmi řádky, kde každý řádek má 20 znaků. Na displeji se zobrazují jednotlivé obrazovky s rozdílnými informacemi, jako například aktuální napětí a proudy nebo nastavení regulátorů elektrocentrály. Pod displejem jsou čtyři barevná tlačítka. Modré, zelené, žluté a červené. Tlačítka mají funkce přidělené vždy podle konkrétní obrazovky. Vpravo od tlačítek je joystick určený k navigaci mezi jednotlivými obrazovkami. Nad ním je potenciometr a inkrementální čidlo, které jsou určené k zadávání žádaných hodnot pro regulátory. V pravé části ovládacího panelu je maticová klávesnice o šestnácti tlačítkách, která je zatím určena pouze pro rychlou navigaci mezi obrazovkami. Pro zadávání hodnot pomocí klávesnice bohužel nezbylo místo v paměti mikrokontroléru. Pod klávesnicí jsou dvě LED diody informující o stavu elektrocentrály. Zelená znamená, že je vše v pořádku, červená znamená problém.

Deska ovládacího panelu je vybavena vývojovou deskou Arduino Pro Mini 328. Vzhledem k velkému počtu tlačítek a jiných vstupních periférií jsem musel z důvodu nedostatku vstupů využít multiplexaci vstupů. Pomocí posuvného registru, který je připojen pouze pomocí signálů DATA a CLOCK je generován posunující se impuls, který je pak přes tlačítka a klávesnici přiváděn na 4 vstupní piny mikrokontroléru. Inkrementální čidlo je připojeno na samostatné piny. Potenciometr a joystick jsou přivedeny na analogové vstupy. Displej je připojen přes sběrnici I2C. Deska je také vybavena CAN modulem, který zajišťuje komunikaci se zbytkem systému a zachytává zprávy s proměnnými, jejichž hodnoty se zobrazují na displeji. Na následujícím obrázku je zobrazeno rozložení ovládacího pultu.



Obrázek 27 - Ovládací panel

5.9 Měření teploty

Tato deska zatím slouží pouze k měření teploty spalovacího motoru a k měření teploty chladicí kapaliny za chladičem. V budoucnu by ovšem měla měřit více teplot, zejména ve spojení s kogenerací, kde by měřila teploty před a za výměníky a také průtoky kapaliny jednotlivými výměníky. Jako mikrokontrolér je použito Arduino Pro Mini 168. K měření teploty jsem se rozhodl použít čidla DS18B20. Jedná se o digitální teploměry s programovatelným rozlišením 9 až 12 bitů. Čidla komunikují po sběrnici 1-Wire a na jedné sběrnici může být několik čidel, přičemž každé má unikátní adresu. Teploměry měří teplotu v rozsahu -55°C až 125°C s přesností $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ v rozsahu od -10°C do 85°C . Tyto parametry jsou pro provozní měření teploty motoru dostatečné. Na měření průtoku je v plánu použít průtokoměry, kde četnost pulzů odpovídá průtoku. Výstupy průtokoměrů jsou tedy přivedeny na piny přerušení mikrokontroléru. Deska je také vybavena CAN modulem, který odesílá naměřená data do zbytku systému. [13]

6 Návrh a realizace softwaru

V řídicím systému je celkem 7 desek, které obsahují mikrokontrolér, a každý z nich vyžaduje pro svou funkci program. Ve všech případech se jedná o mikrokontroléry Arduino, tudíž bylo ke psaní programů využito vývojové prostředí Arduino IDE. V následujících odstavcích budou zjednodušeně popsány principy činnosti jednotlivých programů v mikrokontrolérech. Popsat všechny programy do detailu vzhledem k jejich délce přes několik tisíc řádek by bylo velice náročné. Navíc některé části programů, jako například zpracování komunikace po CANu jsou téměř shodné pro všechny desky. Všechny programy jsou k dispozici v příloze na CD. K jejich otevření je zapotřebí mít nainstalováno vývojové prostředí Arduino IDE.

6.1 Zpracování proměnných

Jak bylo popsáno dříve, některé proměnné se vyskytují v programech několika desek. Pro pořádek byly tyto proměnné jednotně pojmenovány. V programové části ovšem zbývá vyřešit problém, jak s proměnnými pracovat. Mikrokontroléry umožňují pracovat s proměnnými pomocí různých datových typů. Tyto datové typy se liší jak rozsahem a přesností uchovávaných čísel, tak svými nároky na paměť. Cílem bylo vymyslet způsob práce s proměnnými tak, aby rozsah a přesnost stačily pro potřeby elektrocentrály a zároveň aby proměnné nezabíraly zbytečně mnoho paměti. Následující tabulka ukazuje použitelné datové typy, jejich rozsahy a počet bitů, které zabírají.

Tabulka 5 - Použitelné datové typy

Datový typ	Velikost	Rozsah	
Boolean	8 bitů	false	true
Byte	8 bitů	0	255
Unsigned int	16 bitů	0	65535
Int	16 bitů	-32768	32767
Unsigned long	32 bitů	0	4,294,967,295
Long	32 bitů	-2,147,483,648	2,147,483,647
Float	32 bitů	$-3,4028235 \cdot 10^{38}$	$3,4028235 \cdot 10^{38}$

I když některé proměnné budou mít desetinná místa, pro ušetření paměti je na jejich uchování použit celočíselný datový typ. Toho je dosaženo tak, že proměnná je vynásobena 10, 100 nebo 1000 a poslední čísla v proměnné fungují jako desetiny. Na toto je nutné myslet v programech všech desek, kde je proměnná použita. Například napětí 232,18 V se v systému zpracovává jako integer bez znaménka (unsigned int) o hodnotě 23218. Pro účely ukládání dataloggeru nebo zobrazování na displej jsou v některých deskách proměnné převáděny na float, kde je číslo zpracováváno i s desetinnou čárkou. Proměnné jsou v programech definovány jako globální proměnné. Následující tabulka ukazuje přiřazení datových typů proměnným, počet desetinných míst a předpokládaný rozsah proměnné.

Tabulka 6 - Datové typy proměnných a jejich rozsahy

Název proměnné	Datový typ	Desetinná místa	Jednotka	Předpokládaný rozsah	
RPM_akt	Unsigned int	0	ot./min	0	6000
RPM_zad	Unsigned int	0	ot./min	1000	4000
GAS_akt	Unsigned int	1	%	0	1000
GAS_zad	Unsigned int	1	%	0	1000
F_akt	Unsigned int	2	Hz	0	10000
F_zad	Unsigned int	2	Hz	0	10000
U1	Unsigned int	2	V	0	30000
U2	Unsigned int	2	V	0	30000
U3	Unsigned int	2	V	0	30000
I1	Unsigned int	2	A	0	1000
I2	Unsigned int	2	A	0	1000
I3	Unsigned int	2	A	0	1000
Ubat	Unsigned int	2	V	0	2000
U_akt	Unsigned int	2	V	0	30000
U_zad	Unsigned int	2	V	0	23000
ACind	Unsigned int	1	%	0	1000
S1	Unsigned int	3	kVA	0	10000
S2	Unsigned int	3	kVA	0	10000
S3	Unsigned int	3	kVA	0	10000
Scelk	Unsigned int	3	kVA	0	30000
kVAh	Unsigned long	3	kVAh	0	
Vyuziti	Unsigned int	1	%	0	1000
TmotTep	Int	1	°C	-500	1500
TmotChl	Int	1	°C	-500	1500

Pro většinu proměnných byl využit datový typ Unsigned int, jeho rozsah je dostatečný pro většinu proměnných a zabírá 16 bitů, což jsou 2 bajty. Do jedné zprávy přes CAN se tedy vejdu až 4 tyto proměnné. Pro proměnnou vyrobené energie není uveden maximální rozsah, jelikož se jedná o veličinu, která se integruje po dobu chodu elektrocentrály. Při hodně dlouhém chodu tedy proměnná nemusí stačit. V praxi by však elektrocentrála musela vyrobit přes 4 GVAh, což se nejspíše nestane. Ostatní proměnné bez jednotky, jako jsou stavy regulátorů nebo konstanty regulátorů jsou uloženy jako boolean, respektive unsigned int pro konstanty.

6.2 Komunikace po CANu

Sběrnici CAN využívají ke komunikaci všechny desky s mikrokontrolérem. Komunikace po sběrnici probíhá pomocí definovaných rámců, které mají jasně danou strukturu. Zpráva obsahuje

identifikační číslo (ID), informaci o délce zprávy (DLC) a několik datových bajtů (DATA), podle délky zprávy. Samotné řízení protokolu komunikace obstarává na všech deskách CAN modul s mikrokontrolérem MCP2515. Komunikace mezi mikrokontrolérem Arduino a CAN modulem, probíhá vždy přes sběrnici SPI. K jejímu ovládání je k dispozici knihovna, kde je zapotřebí nastavit rychlost komunikace, mód sběrnice a pořadí bitů. Na tuto knihovnu navazuje další knihovna určená přímo ke kontrole CAN modulu s MCP2515. Tato knihovna umožňuje jednoduše nahrávat data k odeslání do datové struktury, která je poté přes SPI odeslána do modulu. Použitá knihovna umí komunikaci zpracovat ve formátu, kdy je možné odesílat až 8 datových bajtů. Samotná kontrola stavu sběrnice a odesílání zprávy je plně v režii CAN modulu a mikrokontrolér se tak mezitím může věnovat dalším činnostem. Příklad kódu pro odeslání zprávy na CAN ukazuje jednoduchou zprávu, která je určena pro desku spínání a požaduje sepnutí výstupu. ID zprávy je v tomto případě 14, délka zprávy je jeden bajt, hodnota odesílaného bajtu je 1 a zpráva je nahrána do bufferu číslo 1.

```
void CAN_Vystup1(){
    OdchoziCAN.id = 14;
    OdchoziCAN.dlc = 1;
    OdchoziCAN.data[0] = 1;
    CAN.LoadBuffer(TXB1, OdchoziCAN);
    CAN.SendBuffer(TXB1);
}
```

Přijetí zprávy ze sběrnice CAN způsobí vyvolání přerušení. V tomto přerušení se zprávy třídí podle jejich ID. K tomu je využita struktura switch, která podle hodnoty ID rozhoduje, jak bude s přijatou zprávou naloženo. V následující ukázce je přijetí zprávy obsahující 3 proměnné aktuálních napětí. Každá proměnná je rozložena do dvou bajtů, které je třeba po přijetí zprávy složit do jedné proměnné o délce 2 bajty.

```
switch (PrichoziCAN.id) {
    case 40:
        prom_U1 = (PrichoziCAN.data[0] << 8) + PrichoziCAN.data[1];
        prom_U2 = (PrichoziCAN.data[2] << 8) + PrichoziCAN.data[3];
        prom_U3 = (PrichoziCAN.data[4] << 8) + PrichoziCAN.data[5];
        break;
    case 41: ...
```

Pro řízení komunikace po sběrnici CAN bylo nutné mít jednotně definované typy zpráv a jejich strukturu. Zároveň bylo zapotřebí zprávám přiřadit vhodné ID, jelikož podle ID zprávy je zároveň přikládána její priorita. Následující tabulka ukazuje jednotlivé zprávy, jejich ID číslo, typ zprávy, uložení informace v jednotlivých bajtech a délku zprávy v bajtech.

Tabulka 7 - Zprávy na sběrnici CAN

ID	Popis	Typ	Bajt zprávy							Délka zprávy	
			0	1	2	3	4	5	6		7
3	Nouzové zastavení	→●									0
10	Autostart	→●	1 - 0								1
11	Startovat	→●	1 - 0								1
12	Zapalování	→●	1 - 0								1
13	Nabudit	→●	1 - 0								1
14	Výstup	→●	1 - 0								1
20	Sepnutí triaků	→●	ACind								2
22	Žádané napětí	→●	U_zad								2
23	Parametry	→?									0
24	Aktuální parametry	←	ACind		U_zad		U_akt				6
27	Konstanty reg. U	→●	1,2,3	K(P,I,D)_U							3
28	Konstanty reg. U	→?									0
29	Konstanty reg. U	←	KP_U		KI_U		KD_U				6
30	Regulátor napětí	→●	1 - 0								1
31	Stavy regulátorů	→?									0
32	Stavy regulátorů	←	regU	regAC							2
33	Regulátor triaků	→●	1 - 0								1
40	Napětí	←	U1		U2		U3				6
41	Proudy	←	I1		I2		I3				6
42	Frekvence a U baterie	←	F_akt		Ubat						4
46	Výkony S	←	S1		S2		S3		Scelk		8
48	Energie a využití	←	Vyuziti				kVAh				8
50	Žádaný plyn	→●	GAS_zad								2
51	Žádané otáčky	→●	RPM_zad								2
52	Žádaná frekvence	→●	F_zad								2
53	Konstanty reg. otáček	→●	1,2,3	K(P,I,D)_RPM							3
54	Konstanty reg. otáček	→?									0
55	Konstanty reg. otáček	←	KP_RPM		KI_RPM		KD_RPM				6
56	Konstanty reg. F	→●	1,2,3	K(P,I,D)_RPM							3
57	Konstanty reg. F	→?									0
58	Konstanty reg. F	←	KP_F		KI_F		KD_F				6
59	Regulátor plynu	→●	1 - 0								1
60	Regulátor otáček	→●	1 - 0								1
61	Regulátor frekvence	→●	1 - 0								1
62	Stavy regulátorů	→?									0
63	Stavy regulátorů	←	regGAS	regRPM	regF						3
64	Vynulovat plyn	→●									0
65	Žádané hodnoty	←	GAS_zad		RPM_zad		F_zad				6
66	Aktuální hodnoty	←	GAS_akt		RPM_akt						4
90	Relé 12 V	→●	RE1_A	RE2_A	RE3_A	RE4_A	RE5_A	RE6_A	RE7_A	RE8_A	8
91	Relé 12 V	→?									0
92	Relé 12 V	←	RE1_A	RE2_A	RE3_A	RE4_A	RE5_A	RE6_A	RE7_A	RE8_A	8
93	Relé 230 V	→●	RE1_B	RE2_B	RE3_B	RE4_B	RE5_B	RE6_B	RE7_B	RE8_B	8
94	Relé 230 V	→?									0
95	Relé 230 V	←	RE1_B	RE2_B	RE3_B	RE4_B	RE5_B	RE6_B	RE7_B	RE8_B	8
96	Stavy zařízení	→?									0
97	Stavy zařízení	←	Buzeni	Vystup	Zapalovani	Odpojovac	Vetrak	Alternator			6
100	Odpojovač volnoběhu	→●	1 - 0								1
101	Ventilátor	→●	1 - 0								1
102	Buzení alternátoru	→●	1 - 0								1
130	Teploty	←	TmotTep			TmotChl					4
150	Čas a datum	←	sekundy	minuty	hodiny	denMesic	mesic	rok			6
155	Nový datalog	→●									0
156	Ukládání dataloggeru	→●	1 - 0								1
157	Stav dataloggeru	→?									0
158	Stav dataloggeru	←	1 - 0								1

Typy zpráv jsou označeny následovně:

- - Nastavení nové hodnoty
- ? - Dotaz na hodnotu
- ← - Odeslání aktuální hodnoty

6.3 Program hlavní řídicí desky

V hlavní řídicí desce probíhá převážně zpracování a předávání komunikace z CANu na UART a opačně. Dále hlavní řídicí deska může proměnné ukládat na SD kartu. V pravidelných intervalech jsou prováděny výpočty některých proměnných a kontrola mezních hodnot některých parametrů.

6.3.1 Komunikace přes UART

UART se v hlavní řídicí desce využívá hlavně ke komunikaci s PC. Deska musí jednak v pravidelných intervalech odesílat data proměnných, jako jsou napětí a proudy, a zároveň musí průběžně přijímat a dekódovat příkazy z PC a podle jejich charakteru je případně přeposlat na sběrnici CAN, aby se data dostala až k cílovým zařízením. Na obstarání sériové komunikace je v Arduino IDE k dispozici hotová knihovna. Je zapotřebí pouze nastavit rychlost komunikace, což je v tomto případě jeden megabit za sekundu. Komunikace probíhá ve formě textových zpráv ukončených znakem #10, což je v ASCII znak nového řádku. Zpráva má standardizovaný formát, který je tvořen třípísmenným identifikátorem, a ve většině případů ještě mezerou a číselnou hodnotou. Například příkaz `RPZ 3000` znamená nastavení žádaných otáček na 3000 ot./min. Zprávy odesílané do PC mají stejný formát. Následující kód ukazuje přijetí zprávy z příkazem `REGA 1`. Tento příkaz znamená požadavek na zapnutí regulátoru plynu, který je ihned přeposlán na CAN. Příchozí zpráva je rozdělena na dvě textové zprávy. `sub1` je identifikátor a `sub2` je číselná hodnota, která je převedena ze stringu na integer s názvem `hodnota`.

```
if (sub1 == "RGA") {  
    if (hodnota == 1) CAN_ZapnoutRegGAS();  
    if (hodnota == 0) CAN_VypnoutRegGAS();  
    return;  
}
```

Odesílání dat do PC má dvě skupiny zpráv. Rychlé zprávy se odesílají 5x za sekundu a pomalé zprávy se odesílají 1x za sekundu. Mezi rychlé zprávy patří zprávy o stavu elektrocentrály a zejména veličiny, které jsou předmětem regulace. Odesílají se jak žádané, tak aktuální hodnoty, protože i žádané hodnoty se mohou rychle měnit vlivem regulátorů. Následuje ukázka odeslání proměnné se stavem aktuálních otáček do PC. Zpráva se skládá z identifikátoru `RPA` a poté se aktuální hodnota otáček převede na text, sloučí se s identifikátorem a odešle.

```
Serial.println("RPA " + String(prom_RPM_akt));
```

Následující tabulka ukazuje identifikátory všech zpráv používaných při komunikaci s PC přes UART. Sloupec ID zobrazuje třípísmenný identifikátor použitý k identifikaci obsahu právy. Dále je popsán obsah zprávy a směr, který ukazuje, zda je zpráva vysílána z PC do hlavní řídicí desky nebo naopak. Některé zprávy mohou být jak přijímány, tak odesílány pro potvrzení přijetí se stejným ID.

← - Směr z hlavní řídicí desky do PC (informace)

→ - Směr z PC do hlavní řídicí desky (požadavek)

Tabulka 8 - Popis zpráv komunikace s PC

ID	Popis	Směr
RPA	Aktuální otáčky	←
RPZ	Žádané otáčky	←→
GAA	Aktuální plyn	←
GAZ	Žádaný plyn	←→
KPR	Konst. KP regulátoru otáček	←→
KIR	Konst. KI regulátoru otáček	←→
KDR	Konst. KD regulátoru otáček	←→
KPF	Konst. KP regulátoru frekvence	←→
KIF	Konst. KI regulátoru frekvence	←→
KDF	Konst. KD regulátoru frekvence	←→
FZA	Žádaná frekvence	←→
FAK	Aktuální frekvence	←
RGA	Stav regulátoru plynu	←→
RRP	Stav regulátoru otáček	←→
RFR	Stav regulátoru frekvence	←→
PU1	Napětí fáze 1	←
PU2	Napětí fáze 2	←
PU3	Napětí fáze 3	←
PI1	Proud fází 1	←
PI2	Proud fází 2	←
PI3	Proud fází 3	←
UBA	Napětí baterie	←
ACI	Procento otevření triaků	←→
UZA	Žádané napětí	←→
KPU	Konst. KP regulátoru napětí	←→
KIU	Konst. KI regulátoru napětí	←→
KDU	Konst. KD regulátoru napětí	←→
UAK	aktuální napětí	←
REU	Stav regulátoru napětí	←→
RAC	Stav regulátoru otevření triaků	←→
PS1	Zdánlivý výkon fáze 1	←
PS2	Zdánlivý výkon fáze 2	←
PS3	Zdánlivý výkon fáze 3	←

ID	Popis	Směr
PSC	Celkový zdánlivý výkon	←
KVA	Vyrobená zdánlivá energie	←
VYZ	Využití elektrocentrály	←
TTM	Teplota motoru	←
TCM	Teplota chladicí kapaliny	←
DLN	Vytvoření nového datalogu	→
DLS	Zapnutí ukládání dat	→
DLP	Nastavení periody ukládání	→
DSE	Sekundy	←→
DMI	Minuty	←→
DHO	Hodiny	←→
DDN	Dny	←→
DME	Měsíce	←→
DRO	Roky	←→
DCA	Výpis času	→
STR	Startovat	→
AST	Autostart	→
BUZ	Buzení	←→
VYS	Výstup	←→
ZAP	Zapalování	←→
ODP	Odpojovač volnoběhu	←→
VET	Ventilátor chlazení	←→
ALT	Buzení alternátoru	←→
MOT	Stav motoru	←
STC	Stav elektrocentrály	←
ERR	Hlášení chyby	←
STP	Zastavení	→
PKR	Přečíst konstanty regulátorů	→
NGA	Vynulovat plyn	→
XXX	Navázání komunikace	←→
REG	Stavy všech regulátorů	←
STV	Stavy všech zařízení	←

6.3.2 Datalogger

Hlavní řídicí deska disponuje také dataloggerem určeným pro ukládání a sledování dat, když není připojen počítač. Ukládání dat probíhá na SD kartu umístěnou ve speciálním modulu. K přístupu na SD kartu je k dispozici knihovna, která umožňuje vytváření nových souborů a zapisování textových údajů do souboru. U dataloggeru je možné nastavit periodu ukládání, přičemž nejrychleji umí ukládat 5x za sekundu. Datalogger lze zapnout buď z PC, nebo z ovládacího pultu. Při zahájení ukládání se nejprve vytvoří nový soubor s unikátním jménem vytvořeným z aktuálního času a data. Datum a čas jsou uchovávány v modulu reálného času se záložní baterií. V souboru uložených hodnot se nejprve vytvoří hlavička s datem a časem měření, poté se vytvoří názvy jednotlivých sloupců proměnných a nakonec se zapisují hodnoty oddělené tabulátorem, aby bylo možné výsledný soubor snadno importovat do excelu nebo matlabu. U interního dataloggeru není možné nastavit, jaké proměnné se budou ukládat.

6.3.3 Časování

Pro účely odesílání dat přes UART, datalogger a výpočty je zapotřebí provádět časování operací. K tomu je využit timer2, který generuje přerušení každých 100 ms. V tomto přerušení jsou dále vytvořena další softwarová přerušení, která nastaví vlajku softwarového přerušení do hodnoty 1. Samotný kód se poté vykonává v hlavní smyčce programu. Jedná se o přerušení pro rychlé odesílání UARTu, které se generuje každých 200 ms, pomalé odesílání UARTu (1000 ms), datalogger (200 ms nebo násobky) a výpočty (100 ms).

6.3.4 Výpočty

Úkolem hlavní řídicí desky je také sledovat stav provozních parametrů a dopočítávání některých proměnných, jako jsou například zdánlivé výkony. Tyto výpočty stačí provádět většinou 1x za sekundu. Ovšem kvůli rozložení zátěže mikrokontroléru a také kvůli časovému rozložení zpráv na sběrnici CAN probíhají výpočty každých 100 ms, ovšem dílčí procedura probíhá pouze jednou za 10 volání. To znamená, že například výpočty výkonů probíhají 1x za sekundu, ale jsou o 0,1 sekundy posunuty oproti dalším výpočtům.

Ve výpočtech se mimo jiné provádí přičítání sekund aktuálního času, výpočty a odeslání výkonů, výpočty a odeslání vyrobené energie, požádání o stavy regulátorů a požádání o stavy zařízení. Také se zde sleduje aktuální napětí a při překročení nastavené meze je odeslán signál k odpojení budiče.

6.4 Program regulátoru rychlosti

Regulátor rychlosti má na starosti měření aktuálních otáček spalovacího motoru a regulaci plynu pomocí krokového motoru. Samotné regulaci plynu je dále nadřazená regulace otáček a té je nadřazená regulace frekvence.

6.4.1 Měření otáček

Měření otáček probíhá pomocí Hallovy sondy a magnetu umístěného na hřídeli spalovacího motoru. Výstup Hallovy sondy je připojen na přerušeni mikrokontroléru, které reaguje na náběžnou hranu. Měření rychlosti probíhá pomocí čítače mikrokontroléru, který měří dobu uplynulou mezi jednotlivými pulzy. Problém nastává při příliš nízkých otáčkách, kdy může čítač přetéct a dojít k chybě měření. To se však v praxi nestává, protože spalovací motor má minimální otáčky zhruba 700 ot./min. a při těchto otáčkách je interval mezi pulzy 85 ms, což při správném nastavení předděličky čítače není problém. Pokud nepříjde signál od Hallovy sondy delší dobu, je tento stav vyhodnocen jako zastavení motoru.

6.4.2 Regulace plynu

Regulace plynu nebo škrticí klapky probíhá pomocí přípravku s navijákem a krokového motoru. Regulátor plynu porovnává aktuální procento plynu s žádaným procentem plynu a podle odchylky nastavuje polohu krokového motoru. Po spuštění elektrocentrály by mohlo být ozubené kolo natočeno v náhodné poloze a tak po startu zařízení nejprve najede do krajní polohy s koncovým spínačem, aby se nastavila známá poloha. Poté se vrátí na programově nastavený minimální plyn, který kompenzuje vůli lanka. Maximální natočení ozubeného kola je nastavené programově tak, aby odpovídalo skutečným možnostem karburátoru. Samotná hodnota žádaného a aktuálního plynu se u systému uvádí jako procento plynu s přesností na desetinu %. Aby se krokový motor mohl začít hýbat, musí být nejprve zapnut regulátor plynu.

6.4.3 Regulace otáček

Regulace otáček probíhá pomocí PID regulátoru, který na základě odchylky žádaných otáček a aktuálních otáček reguluje žádané procento plynu. Žádané otáčky jsou programově omezeny na bezpečné meze (minimální 1000 ot./min. a maximální 3500 ot./min.). Samotné výpočty regulátoru jsou prováděny 10x za sekundu což je vzhledem k maximální rychlosti změny polohy škrticí klapky dostačující. Následující kód ukazuje funkci PID regulátoru otáček.

```
void RegulatorOtacek() {
    Err_RPM = prom_RPM_zad - otacky;
    if ( (Err_RPM < 0) && (ZadanyPocKroku > MINIMALNI_PLYN)) {
        Integral_RPM = Integral_RPM + Err_RPM;
    }
    if ( (Err_RPM > 0) && (ZadanyPocKroku < MAXIMALNI_PLYN)) {
```

```

    Integral_RPM = Integral_RPM + Err_RPM;
}
P_RPM = Err_RPM * prom_KP_RPM;
I_RPM = Integral_RPM * prom_KI_RPM;
D_RPM = (MinuleOtacky - otacky) * prom_KD_RPM;
Vystup_RPM = P_RPM + I_RPM + D_RPM;
Vystup_RPM = Vystup_RPM / 1000;
if (Vystup_RPM > MAXIMALNI_PLYN) Vystup_RPM = MAXIMALNI_PLYN;
if (Vystup_RPM < MINIMALNI_PLYN) Vystup_RPM = MINIMALNI_PLYN;
MinuleOtacky = otacky;
prom_GAS_zad = Vystup_RPM;
}

```

Nejprve se z aktuálních a žádaných otáček vypočte regulační odchylka, poté regulační odchylka integruje. Zde je použito takzvané Anti-Wind-Up zapojení, které zajišťuje, že při nastavení regulované veličiny na její limit se integrál nebude dále zvětšovat. To by mohlo v určitých případech vést k nežádoucímu chování regulátoru. V další fázi se vypočte proporcionální, integrační a derivační složka regulátoru a sečtou se. Tento výstup je přepočítán, aby odpovídal skutečnému rozsahu regulované veličiny, a je zkontrolováno, že regulovaná veličina nepřekročila povolené meze. Nakonec je vypočtená hodnota nastavena jako žádaná hodnota pro regulátor plynu, který zreguluje škrticí klapku.

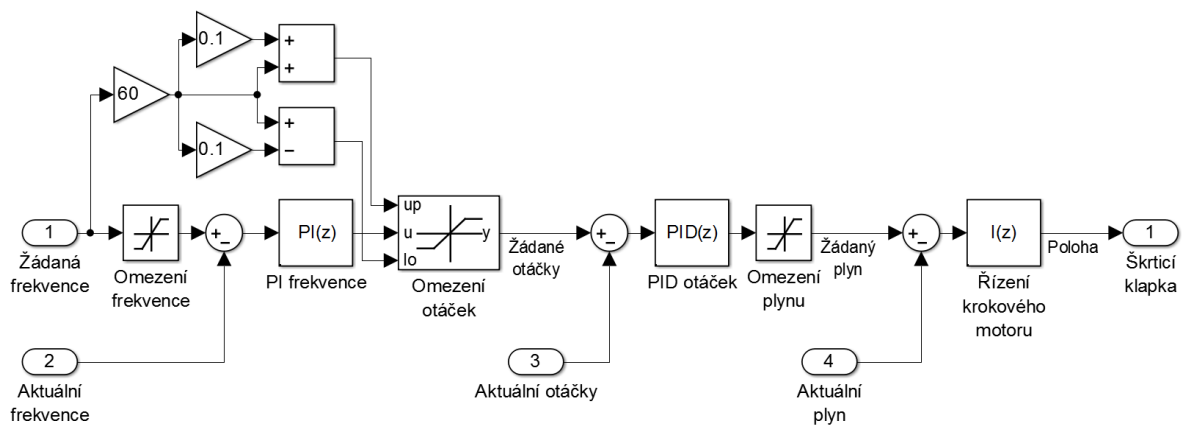
6.4.4 Regulace frekvence

Regulace frekvence probíhá pomocí PID regulátoru, který na základě odchylky aktuální a žádané frekvence reguluje žádané otáčky. Žádaná frekvence je zadávána buď uživatelem nebo hlavní řídicí deskou. Informace o aktuální frekvenci získává regulátor přes CAN od desky měření. Regulátor frekvence má z bezpečnostních důvodů omezené maximální a minimální otáčky, na které může regulovat. Myšlenka je taková, že asynchronnímu generátoru v ostrovní síti při zatěžování klesá frekvence. Tento pokles by měl teoreticky být analogický s poklesem otáček asynchronního motoru při zatížení do úrovně skluzu. Typický skluz asynchronního motoru je 5 až 10 %, tudíž jsem omezení otáček při regulaci frekvence nastavil jako $\pm 10\%$ ze synchronních otáček odpovídajících žádané frekvenci. Například pro frekvenci 50 Hz jsou synchronní otáčky 3000 ot./min. 10 % je 300 ot./min., tudíž limity budou 2700 ot./min a 3300 ot./min. Procento odchylky lze v programu měnit v rámci nastavení. Při ladění byl z regulátoru PID vynechán derivační člen, takže nakonec je regulátor frekvence pouze typu PI.

6.4.5 Struktura regulátorů

Na následujícím obrázku je zjednodušená struktura regulátorů, při regulaci na konstantní frekvenci. Frekvence je v tomto případě zadána uživatelem. Program zkontroluje, zda je požadavek v dovolených mezích a vypočte se regulační odchylka, která jde do regulátoru frekvence. Ten vypočítá žádané otáčky, avšak ty mají omezený rozsah podle žádané frekvence. Z žádaných otáček a aktuálních otáček se vypočte regulační odchylka pro regulátor otáček. Ten vypočte hodnotu žádaného procenta

plynu. Žádané procento plynu se porovná s aktuálním nastavením procenta plynu a pomocí krokového motoru se dorovná odchylka. Tím probíhá regulace frekvence ve standardním provozním režimu.



Obrázek 28 - Zjednodušená struktura regulace frekvence

Při spouštění nebo ladění ovšem nemusí být zapnuty všechny regulátory. Elektrocentrálu lze regulovat například jen na žádané otáčky, kdy hodnotu žádaných otáček zadává uživatel a regulátor frekvence je vypnut. Stejně tak může být spuštěn pouze regulátor plynu, kdy uživatel reguluje pouze polohu škrticí klapky. Regulátory otáček a frekvence jsou v tomto případě vypnuty. I regulátor plynu lze vypnout, znamená to, že krokový motor nebude dorovnávat odchylku mezi žádaným plynem a aktuálním plynem.

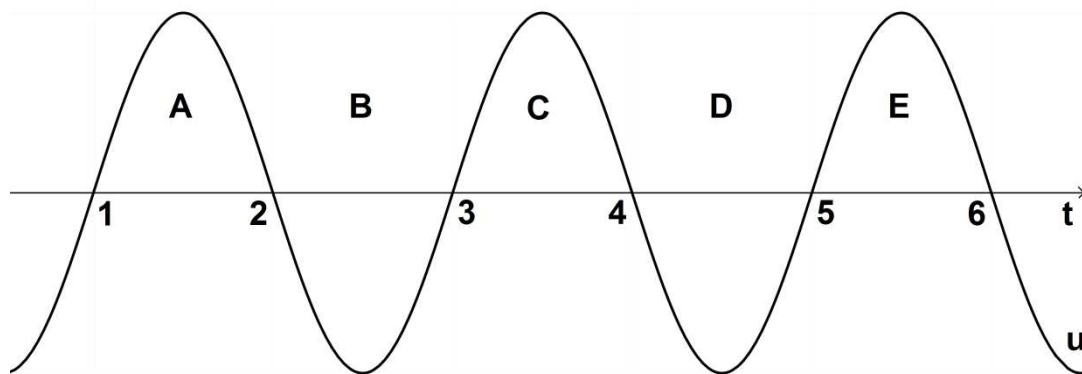
6.4.6 Komunikace

Regulátor otáček komunikuje se zbytkem systému přes sběrnici CAN. Ze sběrnice přijímá informace o žádaných hodnotách pro regulátory, aktuální frekvenci, požadavky na vypnutí nebo zapnutí regulátorů a lze přes sběrnici měnit i parametry PID regulátorů. Regulátor zároveň v pravidelných intervalech odesílá informace o aktuálních a žádaných hodnotách a stavech regulátorů. Odesílání těchto informací probíhá 5x za sekundu.

6.5 Program desky měření

Měření napětí a proudů probíhá pomocí výpočtu RMS hodnoty střídavého průběhu za jednu periodu. Měří se tři průběhy napětí, tři průběhy proudu a napětí baterie. Vzhledem k proměnné frekvenci asynchronního generátoru bylo zapotřebí svázat dobu měření s průchody napětí nulou. Průchody nulou jsou využity ze zapojení pro měření frekvence. Rozdělení operací při měření je popsáno dále pomocí obrázku 29. Při prvním průchodu nulou (1) se zahájí vzorkování všech signálů napětí a proudů. To je opakováno v pravidelných intervalech, tak aby byl počet vzorků v periodě konstantní i pro různé frekvence. Vzorkování pokračuje i po druhém průchodu napětí nulou (2) a ukončí se třetím průchodem nulou (3). Vzorkování napětí a proudů tedy probíhá v oblastech A a B.

Poté jsou v oblasti C vypočteny RMS hodnoty napětí a jsou odeslány na sběrnici CAN. Po dalším průchodu nulou (4), v oblasti D, jsou vypočteny RMS hodnoty všech proudů a jsou odeslány na CAN. Nakonec je v oblasti E (po 5. průchodu nulou) vypočtena a odeslána aktuální hodnota frekvence a napětí baterie. Je zde také vypočtena korekční konstanta napětí z aktuální frekvence a je vypočtena nová perioda vzorkování podle aktuální frekvence. Frekvence se počítá z časového rozdílu mezi průchody napětí nulou 1 a 3. Vzorkování a výpočty bylo nutné takto časově rozložit kvůli nedostatečnému výpočetnímu výkonu mikrokontroléru, nicméně frekvence měření a jeho přesnost jsou dostačující. Po 5. průchodu nulou se čítač průchodů vynuluje a šestý průchod je prakticky první průchod nulou dalšího měření. Sinusoida na obrázku představuje napětí ve fázi 1, podle kterého je měření synchronizováno.



Obrázek 29 - Průběh operací při měření U, I, F

U měření napětí bylo také zapotřebí vyřešit nelineární přenos měřicích transformátorů napětí. Jelikož nebyla k daným transformátorům dostupná dostatečná dokumentace, bylo zkreslení převodu změřeno experimentálně připojením na zdroj proměnné frekvence a proměnného napětí. Byla zjištěna odchylka naměřené hodnoty od hodnoty RMS vypočtené osciloskopem. Závislost odchylky napětí na frekvenci byla proložena polynomem a ten byl v mikrokontroléru využit na výpočet korekčního činitele. Ovšem i po aplikaci korekčního činitele není měření v celém rozsahu frekvencí zcela přesné. Nastavení korekce bylo provedeno tak, aby nejvyšší přesnost byla v okolí pracovního bodu, což je 50 Hz a 230 V. Následuje ukázka kódu, který se provádí při průchodu napětí nulou.

```
void PruchodNulou() {
    switch (PruchodyMereniU) {
        case 0:
            MicrosPocatek = micros();
            Timer1.attachInterrupt(Timer1Int);
            Timer1.start();
            PruchodyMereniU++;
            break;
        case 1:
            PruchodyMereniU++;
            break;
        case 2:
            Timer1.detachInterrupt();
```

```

    Timer1.stop();
    MicrosTed = micros();
    PruchodyMereniU++;
    break;
case 3:
    VypocitatRMSNapeti();
    CAN_OdeslatNapeti();
    PruchodyMereniU++;
    break;
case 4:
    VypocitatRMSproudu();
    CAN_OdeslatProudy();
    PruchodyMereniU++;
    PocetVzorku = 0;
    break;
case 5:
    PruchodyMereniU = 0;
    UbatSurove = analogRead(MERENI_BAT);
    Ubat = round(UbatSurove * KonstantaUbat);
    MicrosRozdil = MicrosTed - MicrosPocatek;
    Frekvence = 100000000 / MicrosRozdil;
    Frekvence = Frekvence - FrekvenceKorekce;
    CAN_OdeslatFrekvenci();

    PeriodaVzorkovani=round(100000000.0/((float)Frekvence*(float)PocetVzorku));
    Timer1.initialize(PeriodaVzorkovani);

    deltaF = ((5000.0 - Frekvence)/100.0);
    KonstantaNapetiF = 0.000017*deltaF*deltaF*deltaF+0.00415*deltaF-0.035+1;
    break;
default:
    PruchodyMereniU++;
    break;
}
ProběhloMereni = true;
}

```

Funkce PruchodNulou() je volána přerušením, vyvolaným náběžnou hranou na vstupu z obvodu, který detekuje průchody napětí nulou. Aktuální oblasti jsou rozděleny pomocí funkce switch(), která podle počtu průchodů nulou provádí požadované operace. Při každém průchodu nulou se k počítadlu PruchodyMereniU přičte 1, kromě posledního měření, kdy se počítadlo vynuluje, aby bylo možné měřit znovu. Při každém průchodu nulou je také nastavena proměnná, sledující jestli proběhlo měření. Pokud měření delší dobu neproběhne, program na pozadí situaci vyhodnotí jako stav bez napětí. Nevýhoda tohoto přístupu je, že detekce průchodů nulou funguje, až od napětí 50 V. Není tedy možné měřit nižší napětí. Samotné vzorkování a výpočty probíhají v samostatných funkcích. Vzorkování je obstaráno pomocí přerušení od Timeru1. Ten generuje přerušení v takových intervalech, aby byl počet vzorků na periodu i při proměnné frekvenci konstantní. Počet vzorků byl nastaven na 40 za periodu. Funkce nejprve provede převod analogových hodnot na číslo pomocí AD převodníku. Změřené hodnoty jsou poté posunuty, aby nulové napětí odpovídalo nulovému číslu. Tato hodnota je pak umocněna na druhou a je přičtena k proměnné SumaVzorku, ze které je poté ve zvláštních funkcích vypočtena hodnota RMS. Následující ukázka kódu ukazuje vzorkování, posun, umocnění a přičtení vzorku k sumě pro průběh napětí U1.

```

void Timer1Int() {
    int Ulsurove = analogRead(MERENI_U1);
    int Ulposunute = Ulsurove - POSUN_U1;
    float UlnaDruhou = (float)Ulposunute * (float)Ulposunute;
    SumaVzorkuU1 = SumaVzorkuU1 + UlnaDruhou;
}

```

V této funkci jsou analogicky vzorkovány a zpracovány průběhy všech tří napětí a proudů. V následující ukázce je funkce na výpočet RMS hodnoty napětí. Suma vzorků je vydělena počtem vzorků v periodě a poté odmocněna. Tento výsledek je nutné dále vynásobit převodní konstantou, která zajistí přepočtení na volty. Dále je hodnota násobena korekční konstantou, která kompenzuje chybu měření vzniklou vlivem nižší frekvence.

```

void VypocitatRMSnapeti()
    U1RMS=sqrt(SumaVzorkuU1/PocetVzorkuVPeriode) * PrevodniKonstU1 * KonstNapetiF;
    if (U1RMS < PrahNapetiProNulu) U1RMS = 0.0;
    SumaVzorkuU1 = 0.0;
}

```

Ve funkci jsou analogicky počítány i zbylé dva průběhy napětí. Funkce na výpočet RMS hodnoty proudů je totožná s tím rozdílem, že výsledek není třeba násobit korekční konstantou. Funkce také pro hodnotu menší, než nastavená prahová hodnota nastaví vypočtenou hodnotu na 0. To je z důvodu šumu, kdy i při nulových vstupních veličinách nebyla vypočtená hodnota nulová. Po dokončení výpočtu je vynulována suma vzorků, aby mohlo být provedeno další měření.

6.6 Program desky spínání

Hlavním úkolem desky spínání je zachycovat příkazy k sepnutí ze sběrnice CAN a jejich provedení. Spínání dvou desek s osmi relé je realizováno pomocí posuvných registrů. Program drží v paměti stavy všech relé a budiče. V případě požadavku na změnu stavu je série bitů nahrána do posuvného registru a relé je sepnuto. Program zároveň odesílá informace o aktuálních stavech zařízení elektrocentrály, jako je například buzení, zapalování, ventilátor, odpojovač volnoběhu nebo výstupní stykač. Program je také připraven rychle reagovat na příchozí signál k nouzovému zastavení elektrocentrály, kdy jsou všechna zařízení odpojena.

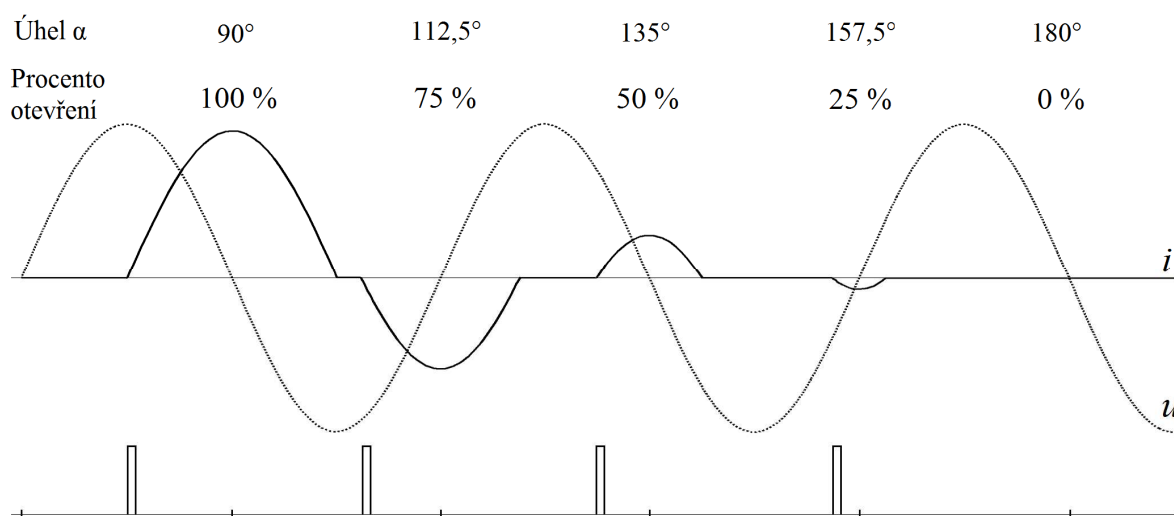
6.7 Program regulátoru buzení

Úkolem regulátoru buzení je udržovat výstupní napětí generátoru na žádané hodnotě. Toho je docíleno regulací indukčního proudu tlumivkami pomocí PID regulátoru a triakového střídavého měniče napětí.

6.7.1 Regulace budicího proudu

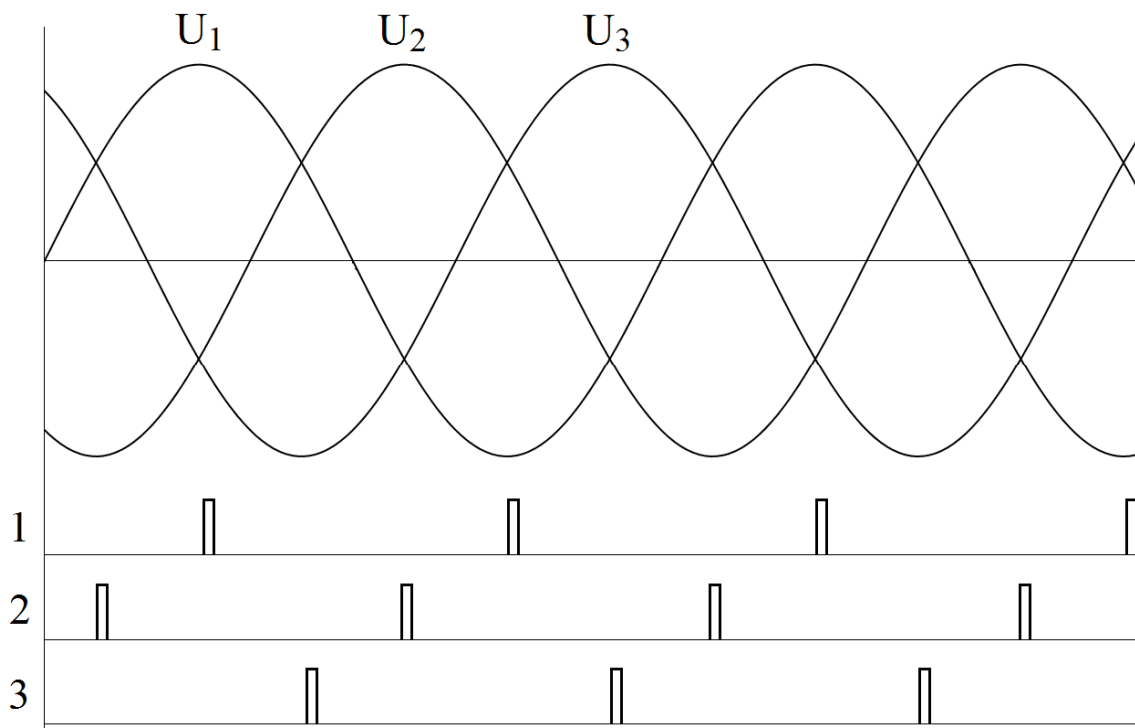
Regulace budicího proudu probíhá pomocí střídavých měničů napětí, které regulují proud tlumivkami, a tento proud se odečítá od proudu kondenzátorů. V podstatě se jedná o kompenzátor jalového výkonu s tím rozdílem, že určitý konstantní jalový výkon neustále dodává na buzení

generátoru. Fázové řízení probíhá spínáním tyristorů zapalovacím impulsem v přesně daný okamžik, který odpovídá řídicímu úhlu α . Tento úhel je nastavován v rozmezí od 90° do 180° , jelikož na výstupu měniče je induktivní zátěž. Pro potřeby řídicího systému se pracuje s procentem otevření, kdy 0% odpovídá úhlu $\alpha = 180^\circ$ a 100% odpovídá $\alpha = 90^\circ$. Rozsah úhlu α od 0° do 180° odpovídá délce jedné půlperiody napětí. Řízení probíhá tak, že je nejprve detekován průchod napětí nulou. Od něj je dopočítán čas zapnutí, který odpovídá žádanému úhlu sepnutí nebo žádanému procentu otevření. Problém je, že asynchronní generátor má proměnlivou frekvenci. Časování zapalovacího impulsu je tedy nutné přepočítávat i podle aktuální frekvence generátoru.



Obrázek 30 - Průběhy napětí, proudu a zapalovací pulsy pro různé procento otevření triaku

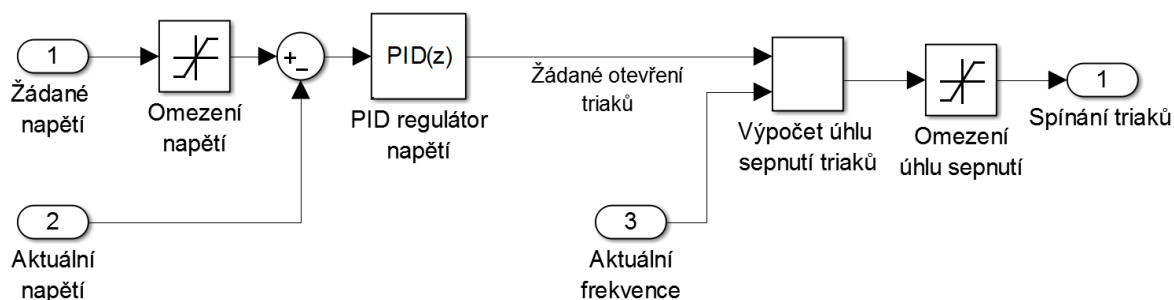
Jelikož je celý systém třífázový, jsou jednotlivá napětí proti sobě posunuta o 120° . Vzhledem k tomu, že jako regulační prvek je použit triak, obě půlperiody jsou spínány jedním výstupem mikrokontroléru. Zapalovací impulsy jsou v rámci jedné půlperiody posunuty o 60° . Časování všech fází se odvíjí od průchodů napětí nulou v první fázi a posun ostatních fází je konstantní v závislosti na aktuální frekvenci. Následující obrázek ukazuje časování zapalovacích impulsů pro plné otevření triaků pro induktivní zátěž, tedy $\alpha = 90^\circ$.



Obrázek 31 - Rozložení zapalovacích impulsů pro triaky v čase ($\alpha=90^\circ$)

6.7.2 Regulace napětí

V programu regulátoru buzení je implementován PID regulátor, který podle odchylky žádaného napětí a aktuálního napětí generátoru reguluje procento otevření triaků. Rozdíl oproti regulátoru otáček a frekvence je ten, že při zvyšování napětí nad žádanou mez je třeba triaky otevírat více, aby došlo vlivem indukivní zátěže k odbuzení. U regulátoru otáček bylo zapotřebí při překročení žádaných otáček plyn ubrat. Jelikož po sběrnici CAN přicházejí informace o všech třech fázových napětích, je třeba z nich vypočítat jedno aktuální napětí pro regulátor. To je z důvodu bezpečnosti provedeno tak, že aktuální napětí je uvažováno nejvyšší z nich.



Obrázek 32 - Schéma regulace napětí

6.8 Program ovládacího panelu

Ovládací panel slouží k zjednodušené interakci s obsluhou. Neobsahuje všechny funkce jako ovládací program na PC, avšak je pomocí něho možné elektrocentrálu ovládat ve zjednodušeném režimu. Jádrem programu je stavový automat, který zobrazuje jednotlivé obrazovky podle aktuálního indexu. Na pozadí mezitím probíhá čtení všech vstupů panelu. Pokud dojde ke změně tlačítek nebo joysticku, je nastaven flag softwarového přerušení. Tyto flagy jsou testovány ve stavovém automatu v jednotlivých obrazovkách a podle nastavených flagů, tedy podle stisknutí konkrétního tlačítka, se automat přesunuje mezi obrazovkami nebo provádí určité akce. Program zároveň přijímá komunikaci ze sběrnice CAN a ukládá aktuální hodnoty proměnných do paměti. Tyto proměnné pak zobrazuje na informačních obrazovkách. Jedná se zejména o napětí a proudy, výkony, využití, otáčky, aktuální plyn a frekvenci elektrocentrály. Na zadávacích obrazovkách regulátorů lze navíc pomocí potenciometru nebo inkrementálního čidla nastavovat žádané hodnoty pro jednotlivé regulátory. Regulátory je možné pomocí ovládacího pultu i zapínat a vypínat. Data k zobrazení se do displeje posílají přes sběrnici I2C. Displej je již vybaven modulem, který převádí komunikaci I2C přímo na vstupní piny displeje. Ve vývojovém prostředí Arduino je k ovládní těchto displejů k dispozici knihovna, pomocí které stačí nastavit kurzor na příslušný znak displeje a odeslat text k zobrazení jako string. Obnovování informace na displeji probíhá v intervalech 2x za sekundu. Použitý displej má nevýhodu, že při překreslování nepatrně bliká a rychlost překreslování nesmí být moc vysoká. Displej se zvládne překreslit řádově pouze několikrát za sekundu. Následující ukázka kódu ukazuje zapsání stavu motoru na displej.

```
lcd.setCursor(0, 1);  
lcd.print("Motor  -");  
lcd.setCursor(9, 1);  
if (prom_MotorBezi == 1) lcd.print("Nastartovan");  
if (prom_MotorBezi == 0) lcd.print("Zastaven");
```

Stavový automat je řešen pomocí funkce switch, která podle aktuální hodnoty indexu obrazovky testuje vstupy a provádí požadované akce. Následující ukázka kódu ukazuje část sekce stavového automatu na obrazovce spouštění.

```
case 21:  
  if (Otoceno_Joystick_Nahoru == true) IndexObrazovky = 11;  
  if (Otoceno_Joystick_Dolu == true) IndexObrazovky = 31;  
  NavigaceKlavesnici();  
  
  if (Stisknuto_Tlacitko_Cervene_D == true) {  
    if (prom_StavCentraly == 1) CAN_Startovat1();  
  }  
  if (Stisknuto_Tlacitko_Cervene_N == true) {  
    CAN_Startovat0();  
  }  
}
```

Je zde vidět část funkce switch, kde index 21 znamená obrazovka spouštění. Nejprve jsou otestovány flagy vyvolané joystickem. Při posunu nahoru se index obrazovky změní na předchozí,

hlavní obrazovku, při posunu dolů se pokračuje na obrazovku elektrických veličin. Poté při stisknutí červeného tlačítka odešle program po sběrnici CAN signál k sepnutí startovacího relé a při uvolnění tlačítka odešle signál na rozepnutí startovacího relé. Zároveň je testováno, zda není motor již spuštěn.

6.8.1 Popis obrazovek

Pro zobrazování informací na displeji byly navrženy různé informační obrazovky. Následující tabulka ukazuje vytvořené obrazovky. V levém sloupci je náhled obrazovky tak, jak vypadá na displeji, v pravém sloupci je popis obrazovky.

Tabulka 9 - Obrazovky ovládacího pultu

<pre> Elektrocentrála 21.3.2016 21:37:16 Stav - OK Zastaveno </pre>	<p>Hlavní obrazovka - ukazuje čas, datum a stav elektrocentrály.</p>
<pre> Stav Motor - Zastaven Buzeni - Zapnuto Vystup - Sepnut </pre>	<p>Obrazovka stavů - zobrazuje stavy hlavních prvků elektrocentrály, jako je stav motoru, stav buzení a stav výstupu.</p>
<pre> Spusteni BUZENI START UYSTUP REGUL </pre>	<p>Obrazovka spouštění - umožňuje postupně spouštět jednotlivá zařízení elektrocentrály.</p>
<pre> El velicity > 230.23 U 48.18 Hz 2.128 kVA Zatizeni: 67.3 % </pre>	<p>Obrazovka elektrických veličin - zobrazuje základní elektrické veličiny jako je napětí, frekvence, výkon a procentuální zatížení.</p>
<pre> < U [V] I [A] > 1 235.20 1.23 2 231.33 0.11 3 226.56 10.84 </pre>	<p>Obrazovka napětí a proudů - ukazuje napětí a proudy ve všech třech fázích.</p>
<pre> < Vyrobena energie 23.675 kVAh </pre>	<p>Obrazovka vyrobené energie - ukazuje celkovou vyrobenou energii.</p>
<pre> Mech velicity GAS 11.3 % RPM 3053 ot/min </pre>	<p>Obrazovka mechanických veličin - zobrazuje aktuální procento plynu a otáčky spalovacího motoru.</p>

<pre> Teplota Motor 97.6 °C Chladic 73.2 °C </pre>	<p>Obrazovka teploty - zobrazuje teplotu motoru a teplotu chladicí kapaliny za chladičem.</p>
<pre> Regulatory > GAS 0 A AC 0 D RPM 0 B NAP 0 # FRQ 0 C </pre>	<p>Obrazovka regulátorů - umožňuje sledovat stav a zapínat nebo vypínat jednotlivé regulátory v řídicím systému.</p>
<pre> < Regulator GAS > zad 65.8 % akt 64.0 % ZADAT </pre>	<p>Obrazovka regulátoru plynu - zobrazuje aktuální a žádaný plyn a umožňuje přejít na nastavení žádané hodnoty.</p>
<pre> < Regulator RPM > zad 3000 akt 3047 ZADAT </pre>	<p>Obrazovka regulátoru otáček - zobrazuje aktuální a žádané otáčky a umožňuje přejít na nastavení žádané hodnoty.</p>
<pre> < Regulator FRQ > zad 50.00 Hz akt 48.34 Hz ZADAT </pre>	<p>Obrazovka regulátoru frekvence - zobrazuje aktuální a žádanou frekvenci a umožňuje přejít na nastavení žádané hodnoty.</p>
<pre> < Regulator AC > zad 10.0 % akt 10.0 % ZADAT </pre>	<p>Obrazovka regulátoru triaků - zobrazuje aktuální a žádané procento otevření triaků a umožňuje přejít na nastavení žádané hodnoty.</p>
<pre> < Regulator U > zad 230.00 V akt 225.13 V ZADAT </pre>	<p>Obrazovka regulátoru napětí - zobrazuje aktuální a žádané napětí a umožňuje přejít na nastavení žádané hodnoty.</p>
<pre> < RPM FRQ NAP kP 234 456 78 kI 23 123 24 kD 10 34 10 </pre>	<p>Obrazovka konstant regulátorů - pouze informace o aktuálních konstantách PID regulátorů.</p>
<pre> Datalogger NOVY START </pre>	<p>Obrazovka dataloggeru - umožňuje zahájit nové ukládání dat a zahájit nebo pozastavit zaznamenávání hodnot.</p>

Zadat XXX	Obrazovka zadávání - slouží k zadávání žádaných hodnot pro regulátory. Je univerzální pro všechny. Pro každý regulátor platí jiné rozsahy hodnot.
stara 3000	
nova 2500	
OK I 1 ZRUSIT	

6.9 Program na měření teploty

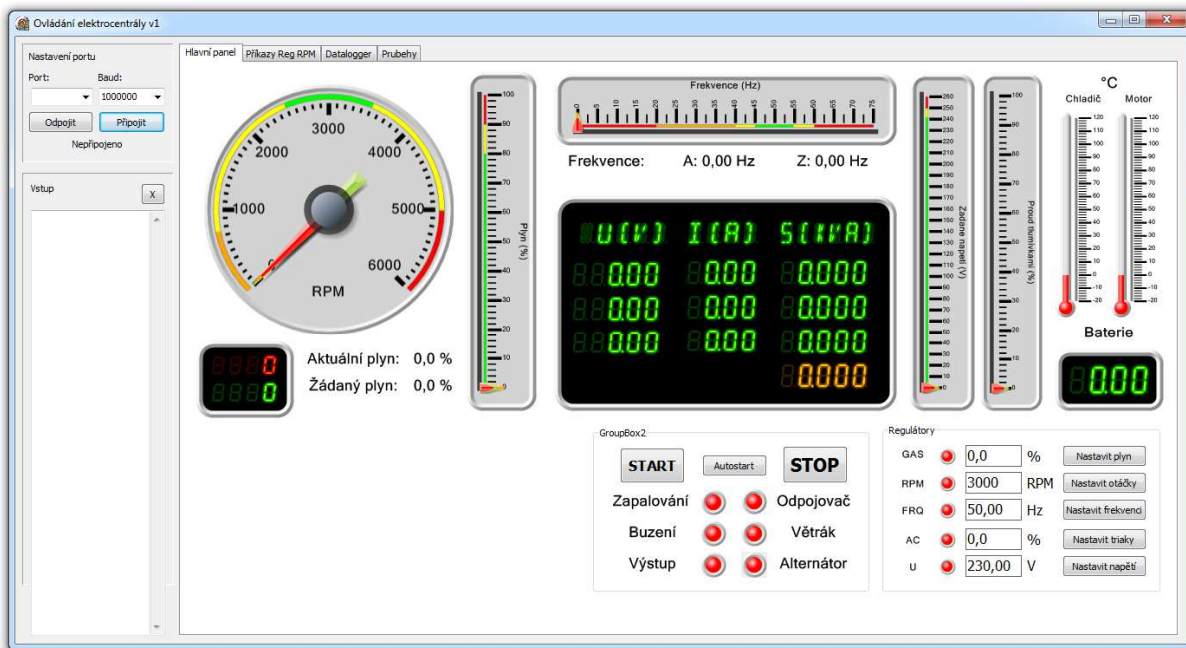
Úkolem programu v desce na měření teploty je komunikovat s čidly DS18B20 po sběrnici 1-Wire a přečtená data dále přeposlat na sběrnici CAN. Zatím se měří jen dvě teploty, a sice teplota motoru a teplota chladicí kapaliny za chladičem. V budoucnu by ovšem mohlo být měřeno více teplot v případě použití kogenerace. Jednotlivá měřicí čidla mají každé svou unikátní adresu. Tyto adresy jsou v programu uloženy a jednotlivým adresám jsou přiřazeny proměnné teplot. Teploty program měří s rozlišením na jednu desetinu. Tato deska ze sběrnice CAN nic nepřijímá a odesílání dat probíhá v intervalu 1x za sekundu.

7 Ovládací program na PC

Pro účely vývoje byl vytvořen ovládací panel na PC, který zobrazuje všechny měřené veličiny graficky a v reálném čase, a který umožňuje provádět více nastavení, než vestavěný ovládací panel. Panel na PC komunikuje s hlavní řídicí deskou přes virtuální COM port. Přes tento port probíhá komunikace ve formě zpráv, jak již bylo popsáno dříve. Příchozí zprávy se třídí podle typu a nesená hodnota je uložena do proměnných, které se zobrazují na grafických prvcích. Kromě zobrazování proměnných umožňuje grafické prostředí také nastavovat žádané hodnoty pro regulátory, nastavovat parametry regulátorů a program také obsahuje datalogger pro zaznamenávání dat.

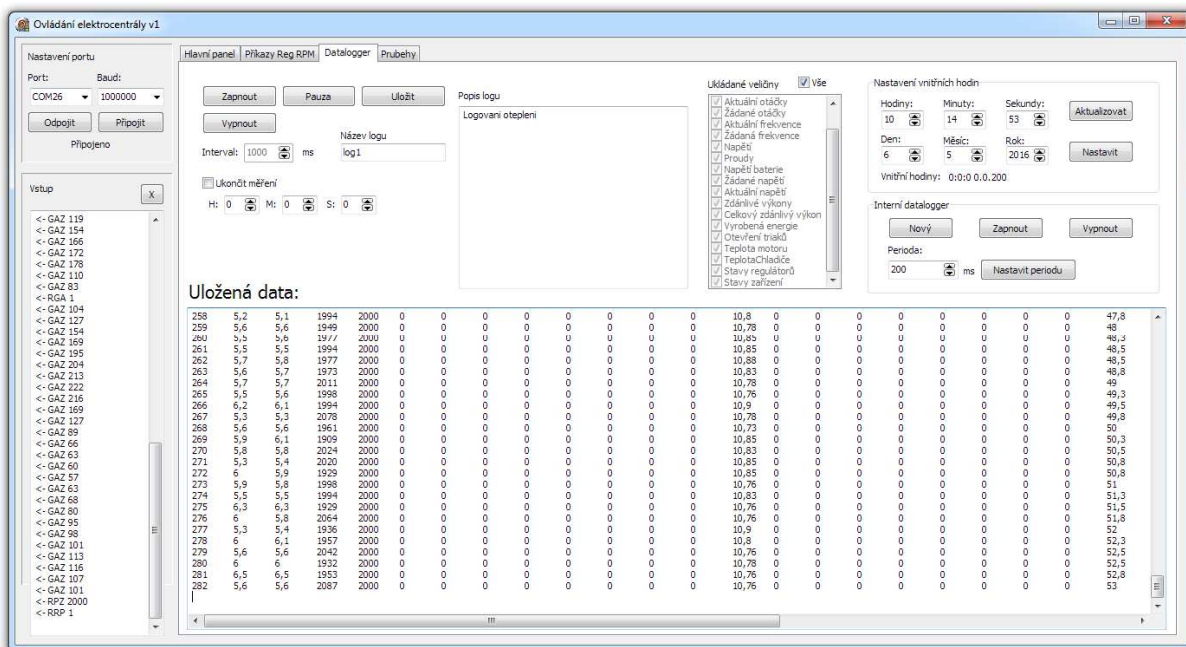
7.1 Popis grafického prostředí

Na grafickém panelu je vlevo sekce pro připojení ke COM portu, kde je možné nastavit rychlost komunikace a vybrat port. Rychlost komunikace je typicky 1 Mb/s. Pod sekci připojení je okno s výpisem komunikace. Zde se vypisují pouze zprávy, které program nerozpoznal, nebo některé chybové zprávy a odchází komunikace do hlavní řídicí desky. V hlavní části panelu je vlevo umístěn kulatý otáčkoměr, pod ním jsou aktuální a žádané otáčky zobrazeny ještě číselně. Vpravo je ukazatel aktuálního a žádaného plynu. Ve střední části je nahoře ukazatel aktuální a žádané frekvence. Pod ním jsou číselné hodnoty měřených napětí, proudů a zdánlivých výkonů v jednotlivých fázích. Dále napravo je ovládání žádaného napětí a otevření triaků pro regulátor napětí. V pravé části jsou ukazatele teploty motoru a chladicí kapaliny. Pod nimi je ukazatel napětí bateriové sítě. V dolní části vpravo jsou ukazatele stavu regulátorů. Červený ukazatel znamená, že je regulátor vypnut, zelený ukazatel znamená, že je regulátor zapnut. V této sekci je možné nastavit přesné hodnoty pomocí textových polí a tlačítek. Nastavování pomocí grafických prvků není tak přesné. Dole v prostřední části lze ovládat jednotlivá zařízení elektrocentrály. Prakticky jde o spínání relé, která zajišťují zapínání jednotlivých zařízení, jako je zapalování, buzení, výstupní stykač, odpojovač volnoběhu, ventilátor nebo buzení alternátoru. Stav zařízení je znázorněn červenou nebo zelenou barvou podle toho, zda je zařízení vypnuto nebo zapnuto. Pomocí tohoto panelu lze elektrocentrálu také startovat a zastavit. Grafické ukazatele mají většinou tři samostatné ručičky. Červená ukazuje aktuální měřenou hodnotu, oranžová ukazuje nastavenou žádanou hodnotu v regulátoru a pomocí zelené lze nastavovat novou žádanou hodnotu, která se ihned při pohybu ručičky odesílá.



Obrázek 33 - Ovládací program na PC

Program dále obsahuje samostatnou záložku na nastavení regulátorů. Zde lze regulátory samostatně zapínat a vypínat. Dále je zde možné nastavovat konstanty PID regulátorů. Nastavovat konstanty lze pro regulátory otáček, frekvence a napětí. Je zde možné i přečíst aktuální nastavené konstanty v regulátorech, které si jednotlivé desky uchovávají v paměti EEPROM.

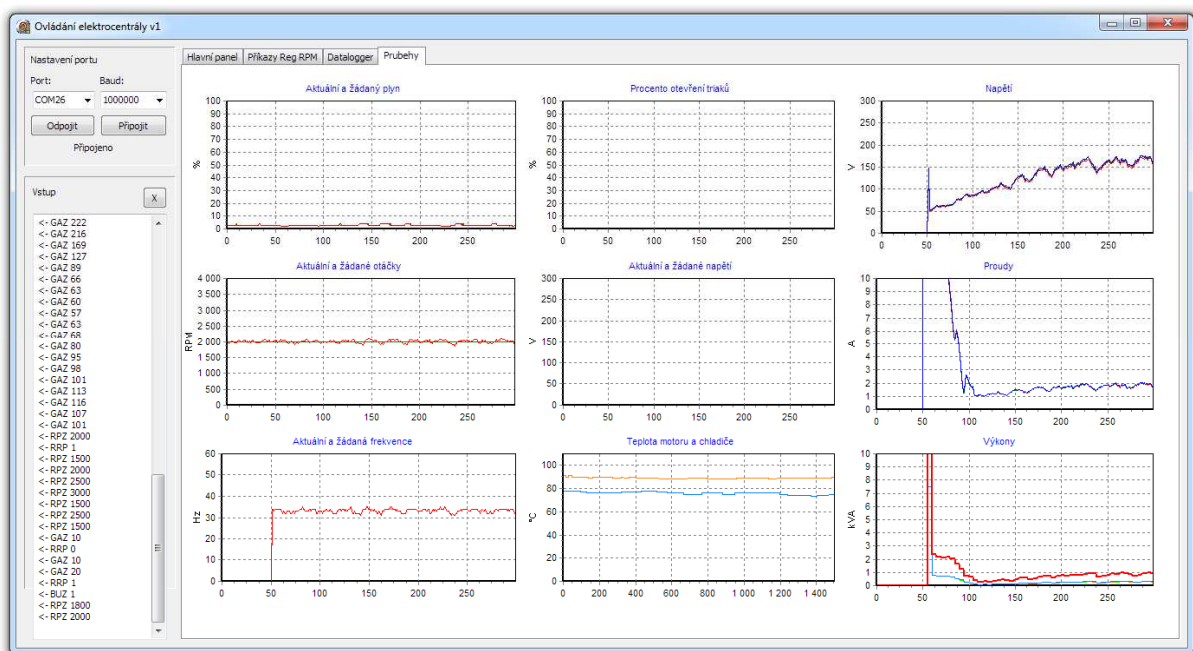


Obrázek 34 - Okno dataloggeru

Na další záložce je datalogger, ten má obdobnou funkci jako datalogger vestavěný v hlavní řídicí desce. V případě tohoto dataloggeru je možno si zvolit, které proměnné se budou ukládat

a přidat do souboru měřených hodnot podrobnější popis měření. Dále je zde možné zkontrolovat aktuální nastavení hodin v modulu reálného času na hlavní řídicí desce a v případě potřeby čas upravit podle aktuálního systémového času na PC. Z této záložky je možno ovládat i interní datalogger, který ukládá data na SD kartu.

Na záložce průběhy probírá vykreslování průběhů jednotlivých měřených veličin. Průběhy jsou realizovány jako cyklický buffer. Průběh se tedy posouvá a hodnoty, které se již do bufferu nevejdou, jsou ztraceny, přičemž nejnovější hodnota je napravo. Celkem je zobrazeno 9 grafů s průběhy. Zobrazovány jsou téměř všechny měřené veličiny, přičemž většinou je více veličin v jednom grafu. Dohromady jsou vždy veličiny, které spolu souvisí, jako například aktuální otáčky a žádané otáčky. Aktualizace průběhů probíhá 5x za sekundu.



Obrázek 35 - Okno s průběhy

8 Kompletace a zapojení systému

Celý systém bylo nakonec zapotřebí zkompletovat a zapojit, aby bylo možné jej jednoduše připojit k elektrocentrále nebo odnést domů k počítači pro případy programování a ladění. Pro tyto účely jsem se rozhodl zkonstruovat přenosnou bednu, jejíž konstrukce je popsána dále.

8.1 Konstrukce bedny pro řídicí systém a rozvaděč

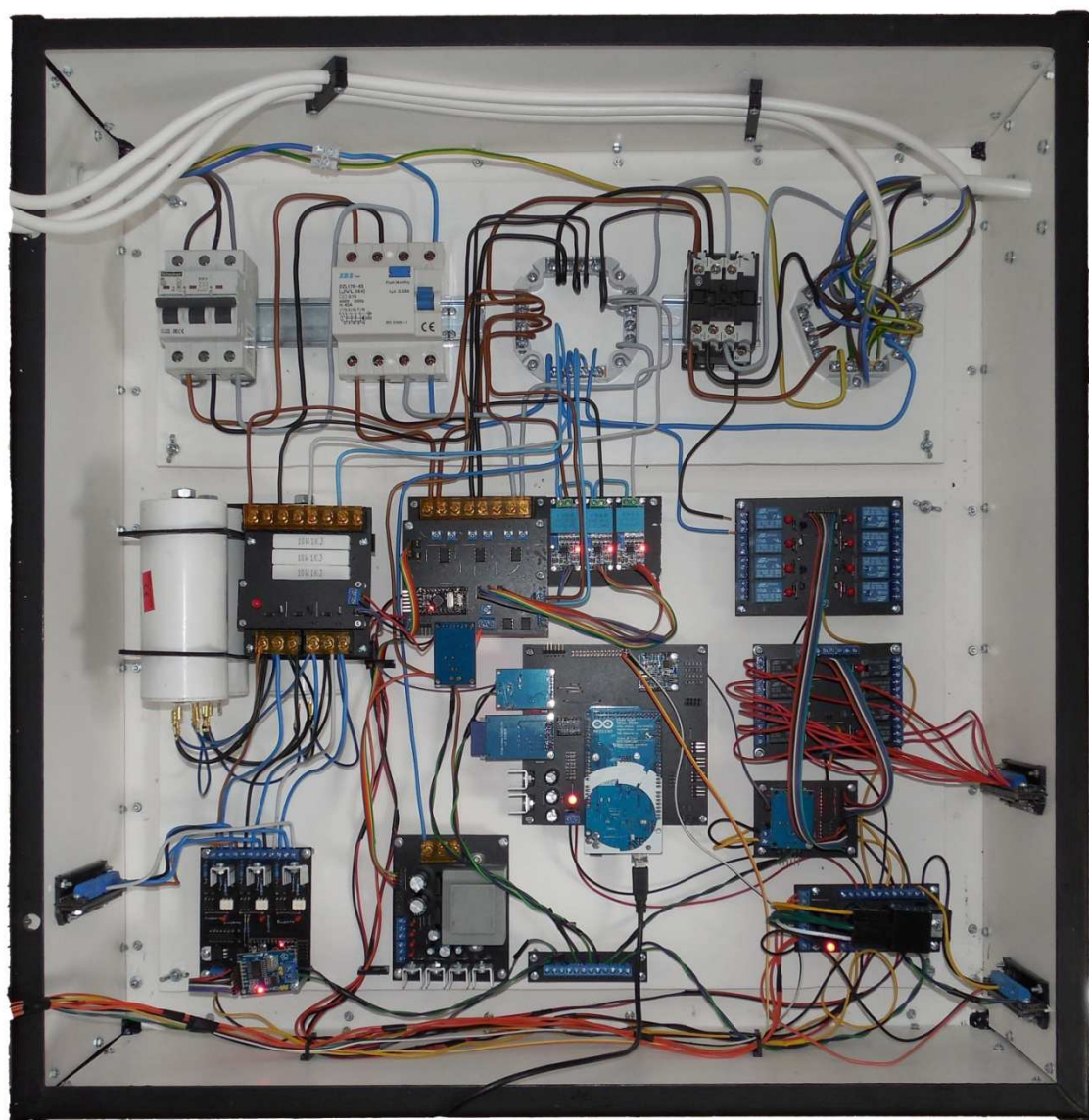
Vzhledem k tomu, že celý řídicí systém je složen z několika oddělených desek, bylo potřeba je všechny umístit do bedny. Tu jsem se rozhodl udělat společnou s rozvaděčem silové části, protože například deska měření musí zasahovat do hlavní proudové dráhy mezi generátorem a výstupem. Bednu jsem se rozhodl realizovat ze 4 mm tlustého měkčeného PVC bílé barvy, jelikož toto byl pro mne nejdostupnější materiál. Na udržení tvaru a zpevnění bedny jsem vytvořil rám z ocelových profilů. Jednalo se o L profily 20x20 mm o tloušťce 2 mm. Z nich jsem svařil rám 62 cm široký, 64 cm vysoký a 20 cm hluboký. PVC desky jsou do rámu vloženy zevnitř a jsou k rámu přišroubovány pomocí šroubů po celém obvodu. Přední strana je realizována jako otevírací se dvěma panty umístěnými vlevo.



Obrázek 36 - Bedna s rozvaděčem a řídicím systémem

Vnitřní část bedny je rozdělena na dvě části. V horní části je silová část, kde se nachází jistič, proudový chránič, svorkovnice a výstupní stykač. Ty jsou přišroubovány k samostatně vyjímatelné desce o rozměrech 55x20 cm. V dolní části je na samostatné desce o rozměrech 55x35 cm umístěna většina desek řídicího systému.

Bedna rozvaděče má v levé horní části situován přívod od generátoru. V pravé horní části je třífázový výstup a na přední část jsou vyvedeny tři jednofázové zásuvky, kde každá z nich je připojena na jinou fázi generátoru. Vně bedny na přední straně je umístěn ovládací panel. Dále je na přední stěně spínač s klíčem, který aktivuje řídicí systém. Na pravé straně dole jsou umístěny průchodky pro nízkonapěťová zařízení, jako je napájení regulátoru otáček nebo signály sběrnice CAN. Na levé straně dole jsou umístěny průchodky pro tlumivky, které jsou vzhledem ke své váze umístěny vně bedny.



Obrázek 37 - Vnitřek bedny s rozvaděčem a řídicím systémem

Rozmístění jednotlivých komponent řídicího systému ve spodní části bedny je následující. Vlevo nahoře jsou umístěny budicí kondenzátory, které jsou v konstrukci vytištěné na 3D tiskárně. Na této konstrukci je také umístěna deska spínání budiče. Pod kondenzátory vlevo dole je umístěna deska regulátoru napětí s triaky. Nahoře uprostřed je deska měření, která zasahuje do proudové dráhy a jsou k ní přivedena i napětí jednotlivých fází. Vpravo nahoře je deska s relé na 230 V. Pod ní je deska na spínání 12 V spotřebičů. Pod touto deskou je deska spínání, která má na starosti desky s relé a budič. Vpravo dole je zdrojová deska na rozvod 12 V a relé na zapínání celého systému. Uprostřed je hlavní řídicí deska a vlevo pod ní je zdroj ± 12 V a ± 5 V. Po stranách jsou vidět na obou stranách průchodky. Pod hlavní řídicí deskou je navíc ještě deska se svorkovnicemi komunikace CAN.

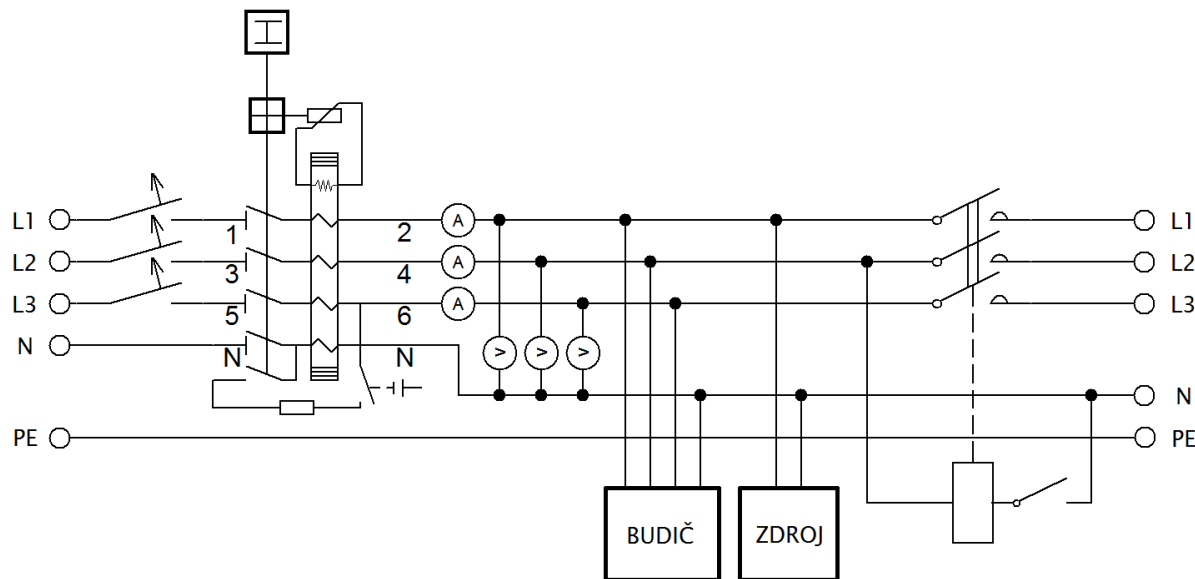


Obrázek 38 - Pohled na boční stěny bedny s rozvaděčem

8.2 Zapojení silové části

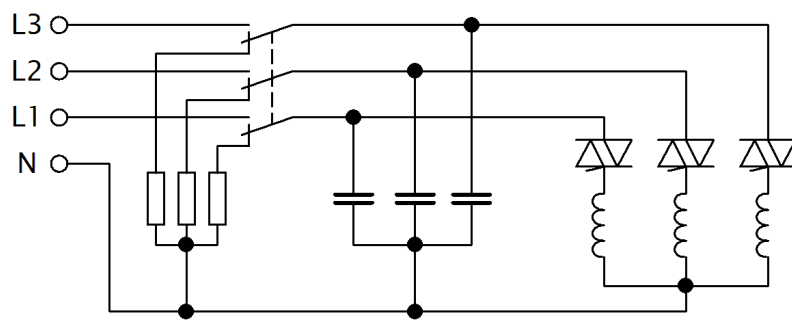
Zapojení silové části zajišťuje propojení generátoru, ochran, měřicích prvků a výstupů. Výstup generátoru je realizován jako kabel zakončen kabelovou spojkou. Přívod do rozvaděče je řešen pomocí vidlice na kabelu. Výstup z rozvaděče je realizován jako zásuvka. Všechny předchozí spojovací prvky jsou dimenzovány na 32 A, 400 V a jsou v pětikolíkovém provedení. Jednotlivé fáze jsou zapojeny na svorkovnici generátoru, nulový vodič je připojen na střed generátoru a zemní vodič je připojen ke kostře elektrocentrály, která ovšem není spojena se středem generátoru. Vzniklá soustava je tak izolovaná, tedy síť typu IT. Po přívodu do rozvaděče následuje jistič, který jsem zatím zvolil na malé proudy, konkrétně se jedná o jistič B6, tedy na 6 A. Takto slabý jistič je použit hlavně pro účely

odladění elektrocentrály pro případy, kdyby došlo k nekontrolovatelnému překmitu otáček. V takovém případě by mohlo nebezpečně stoupat napětí a frekvence generátoru a to by způsobilo velké zvýšení proudu kondenzátory. S takto malým jističem dojde k odpojení generátoru i při poměrně malém překročení provozních parametrů. Nevýhoda je, že elektrocentrálu nelze krátkodobě přetížit. Po jističi je zapojen proudový chránič s rozdílovým proudem 30 mA. Vzhledem k zapojení sítě jako izolované není použití proudového chrániče nutné, avšak z bezpečnostních důvodů jsem se ho i přesto rozhodl nainstalovat. Z proudového chrániče pokračuje vedení přes desku měření proudu na svorkovnici umístěnou uprostřed. Tato svorkovnice zajišťuje další rozvod třech fází a nulového vodiče k budiči, do měřících transformátorů napětí a na cívku stykače. Ze svorkovnice dále vedení pokračuje na stykač výstupu. Za stykačem výstupu je další svorkovnice, tentokrát i se zemnicím vodičem. Z této svorkovnice jsou vodiče připojeny na výstupní zásuvku a na tři samostatné jednofázové zásuvky na předním panelu, kde každá zásuvka je přivedena na jednu fázi generátoru. Zásuvky jsou na 16 A a 230 V. Jednotlivé vodiče jsou označeny následovně: L1 - hnědá, L2 - černá, L3 - šedá, N - modrá, PE - žluto-zelená. Na fázi L1 je připojen zdroj napětí ± 12 V a ± 5 V pro operační zesilovače. Na fázi L2 je připojeny cívka stykače výstupu. Následující obrázek ukazuje schéma zapojení silové části, kde vlevo je vstup od generátoru a vpravo je výstup do zásuvek. Do střední části je připojen budič a zdroj napětí pro desku měření. Následující obrázek ukazuje schéma zapojení silové části, kde vlevo je přívod od generátoru a vpravo je výstup.



Obrázek 39 - Schéma zapojení silové části

Následující schéma ukazuje zapojení budiče. Vlevo je přívod z prostřední svorkovnice rozvaděče, ze které jsou vodiče přes desku spínání budiče přivedeny ke kondenzátorům a desce regulátoru napětí, která obsahuje regulační triaky.



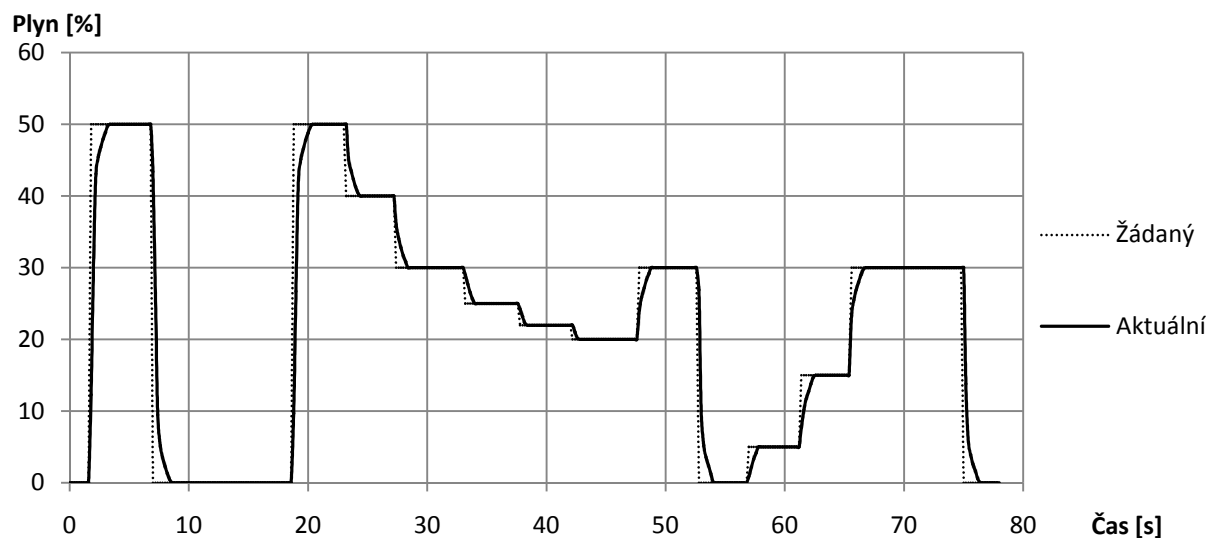
Obrázek 40 - Schéma zapojení budiče

9 Měření na elektrocentrále

Po kompletaci a oživení elektrocentrály byla provedena měření základních parametrů elektrocentrály a některé závislosti jednotlivých veličin. K měření byla využita data z provozních senzorů elektrocentrály a k zaznamenání dat byl použit vytvořený datalogger. Při měření některých závislostí byla největší komplikace kolísání otáček spalovacího motoru. Jelikož se jedná o výkonný motor a většina měření byla prováděna bez zátěže, je pro motor jednoduché se během zlomku sekundy roztočit více než je žádaná hodnota. Nakonec bylo provedeno i několik měření pomocí zapůjčeného osciloskopu, kde byly sledovány průběhy napětí a proudů generátoru.

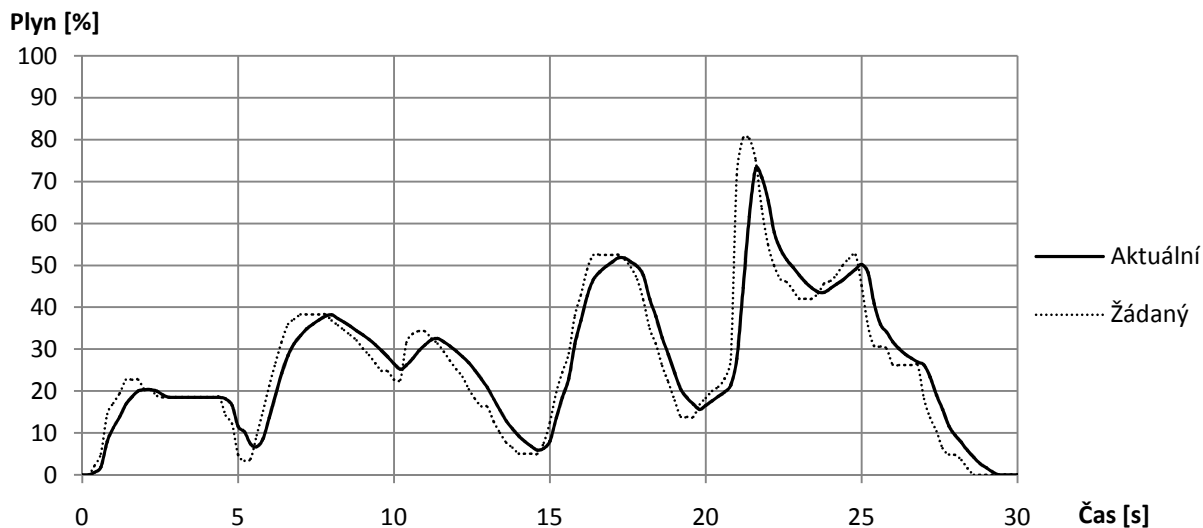
9.1 Ověření funkce regulátoru plynu

V tomto měření bylo cílem ověřit funkci regulátoru plynu. Nejprve jsem funkci ověřil ve skokovém režimu, kde byla žádaná hodnota zadána vždy skokově a byla sledována reakce regulátoru. Na průbězích je vidět, že čím je menší odchylka aktuální hodnoty od žádané, tím pomaleji se reguluje. Takto byl regulátor realizován právě kvůli rozkolísanosti otáček a vysoké citlivosti při nízkém zatížení, kdy při rychlé změně plynu došlo ke vstříknutí velkého množství paliva do motoru, což způsobilo ještě větší rozkolísání otáček.



Obrázek 41 - Průběh aktuálního a žádaného procenta plynu ve skokovém režimu

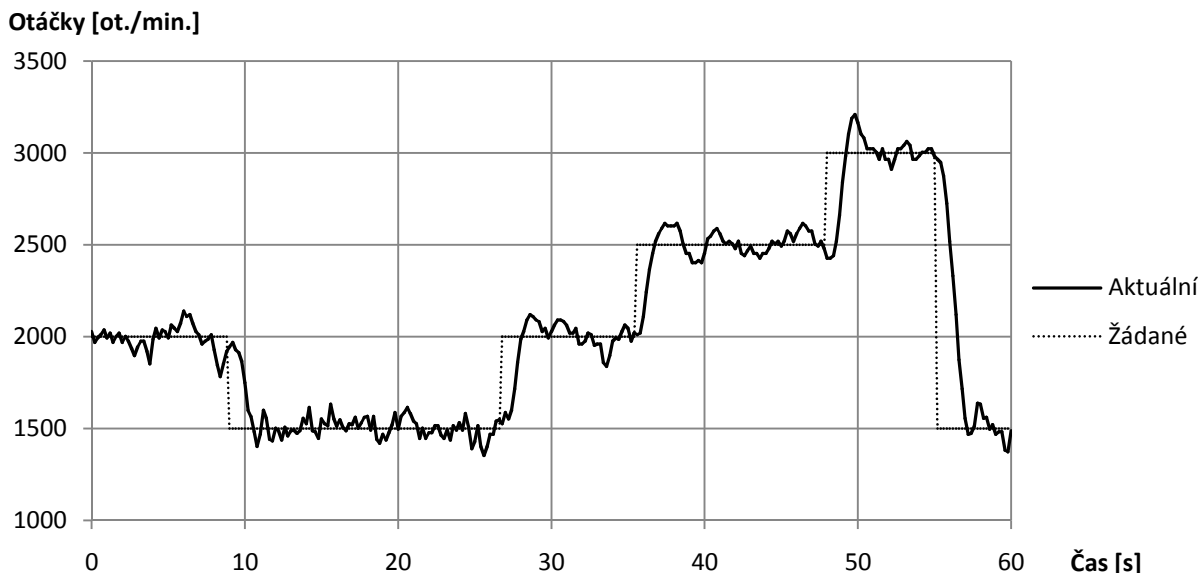
Druhý průběh zachycuje chování regulátoru v dynamickém režimu, tedy při spojitě se měnící žádané hodnotě. Žádaná hodnota byla zadávána ručně pro demonstraci, jelikož za chodu motoru by při větším procentu plynu, než 10 %, měl motor již nepřiměřeně vysoké otáčky. V praxi se hodnota plynu při měřeních pohybovala pod 10 %.



Obrázek 42 - Průběh aktuálního a žádaného procenta plynu v dynamickém režimu

9.2 Reakce regulátoru otáček

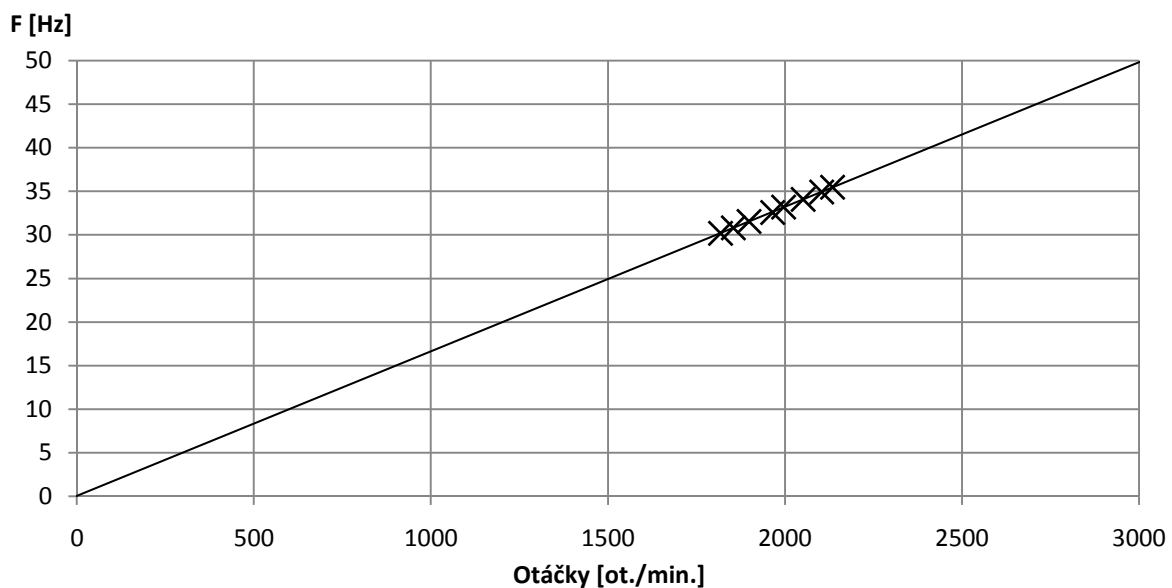
Regulace otáček spalovacího motoru se ukázala být problém. Spalovací motor s karburátorem má při chodu naprázdno i při konstantním plynu velmi nestálé otáčky. Jelikož regulace otáček probíhá pomocí PID regulátoru, musel být nastaven spíše na pomalejší reakce, aby se nesnažil kompenzovat přirozené kolísání otáček motoru a nedošlo tak k ještě většímu rozkmitání otáček. Na průbězích je vidět překmit při regulaci na novou žádanou hodnotu. Velikost překmitu je ovšem srovnatelná se samovolným kolísáním otáček.



Obrázek 43 - Regulace otáček

9.3 Závislost frekvence na otáčkách

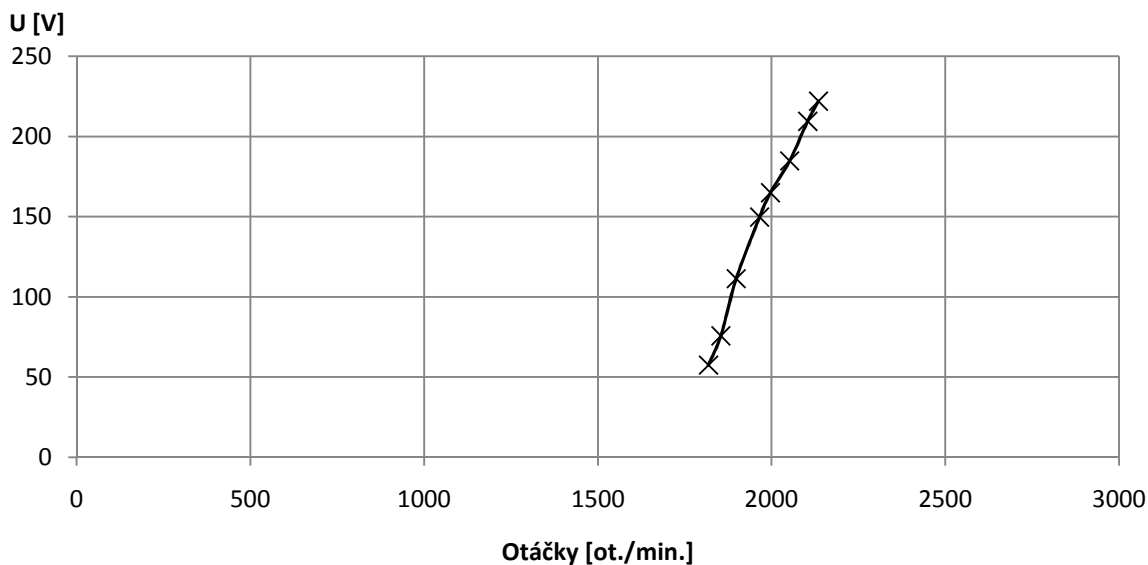
Tato závislost byla změřena pouze v malé části pracovní charakteristiky. Zdola bylo měření omezeno minimálním napětím 50 V, při kterém je modul měření ještě schopen měřit frekvenci a shora bylo omezeno maximální napětím 230 V, které bylo bez použití tlumivek přítomno na svorkách generátoru již při otáčkách 2100 ot./min. Naměřené frekvence byly z rozsahu 30 až 35 Hz. Vzhledem ke kolísání otáček i frekvence byly naměřené hodnoty získány jako průměrné hodnoty za dobu několika sekund běhu. Hodnoty byly ukládány 5x za sekundu. Naměřené hodnoty byly proloženy přímkou a extrapolovány do celého pracovního rozsahu. Naměřená závislost vyšla podle teoretického očekávání. Naměřené hodnoty frekvence jsou o několik desetin procenta menší než teoretická hodnota naprázdno, což u asynchronního stroje, pracujícího jako generátor, odpovídá skluzu.



Obrázek 44 - Závislost frekvence generátoru na otáčkách

9.4 Závislost indukovaného napětí na otáčkách

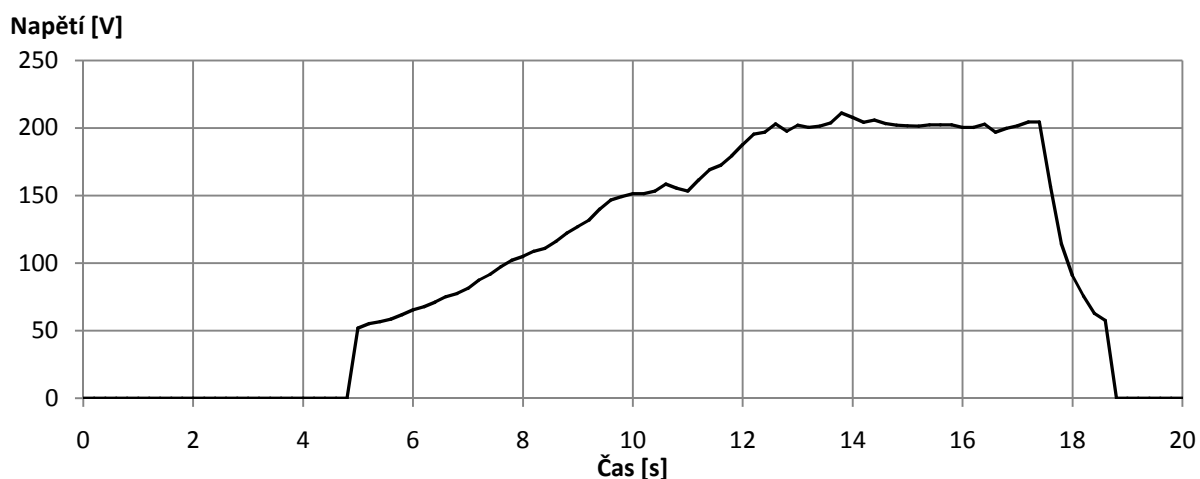
Tato charakteristika byla měřena za stejných podmínek jako předchozí charakteristika. Z naměřených hodnot vyplývá, že zvolené budicí kondenzátory mají příliš velkou kapacitu, jelikož k vybuzení jmenovitého napětí došlo již v okolí 2100 otáček za minutu. V ideálním případě by napětí 230 V mělo být na svorkách generátoru indukováno při 3000 ot./min. Ovšem v takovém případě by postrádalo smysl zapojovat paralelně ke kondenzátorům tlumivky, protože by nebyla nutná regulace a při připojení induktivní zátěže by byl nedostatek kapacitního proudu. Vzhledem k dlouhé časové konstantě změny napětí při změnách otáček byly hodnoty použité v této závislosti vypočteny stejným způsobem jako frekvenční závislost, tedy jako průměr hodnot za dobu několika sekund.



Obrázek 45 - Závislost indukovaného napětí na otáčkách

9.5 Průběh nabuzení a odbuzení

V tomto měření byly žádané otáčky nastaveny na 2100 ot./min a byl sepnut budič. Tlumivky byly z obvodu vyřazeny, tudíž buzení probíhalo pouze pomocí kondenzátorů. Na průběhu je vidět pomalý nárůst napětí. Nestálost napětí je opět způsobena značným kolísání otáček spalovacího motoru. Na konci byl budič odepnut, což způsobilo poměrně rychlý pokles napětí. Části charakteristiky, kde bylo napětí menší než 50 V, nebyly změřeny, jelikož modul měření nedokáže měřit napětí menší než 50 V.

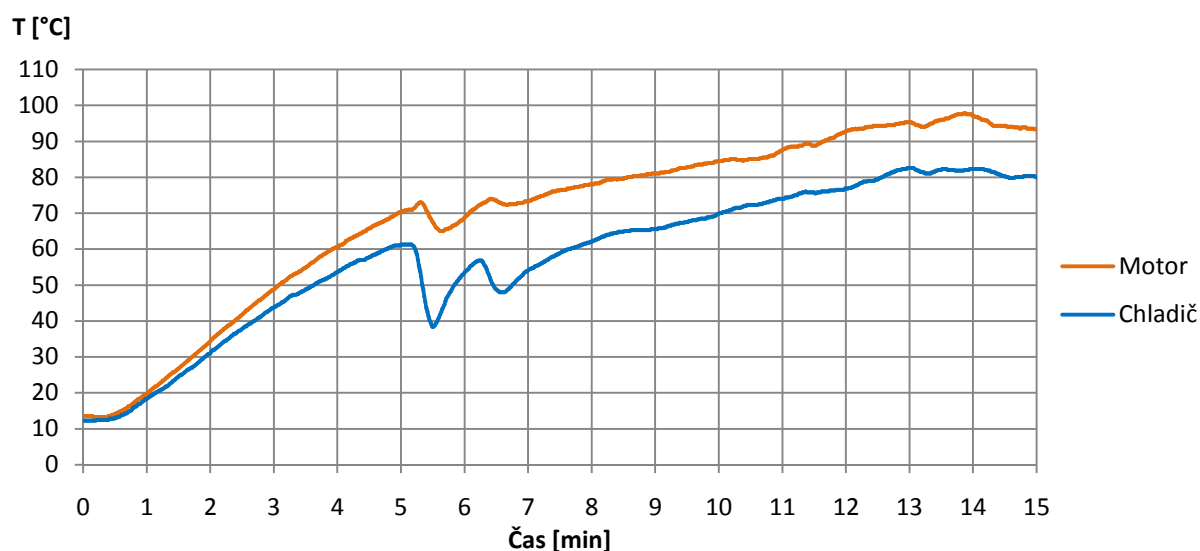


Obrázek 46 - Průběh nabuzení a odbuzení generátoru

Ustálené napětí pro 2100 ot./min. bylo přibližně 210 V. Doba od sepnutí buzení do dosažení napětí 200 V byla přibližně 13 s. Tato doba se ovšem v jednotlivých měřeních lišila o několik sekund.

9.6 Měření oteplení motoru

V tomto měření byla sledována doba, za kterou se motor ohřeje na provozní teplotu. Spalovací motor byl nastartován a otáčky byly nastaveny na 2000 ot./min. pomocí regulátoru otáček. Měření probíhalo tak dlouho, dokud se nespustil ventilátor na chladiči spínaný termistorem. Na průběhu jsou v páté minutě patrné poklesy teploty. Ty byly způsobeny otevřením termostatu a počátkem cirkulace chladicí kapaliny, kdy studená kapalina z chladiče protékla kolem měřicích bodů. K otevření termostatu došlo přibližně při teplotě 72°C. K zapnutí ventilátoru došlo při teplotě chladicí kapaliny 97°C. Zahřátí motoru na provozní teplotu trvalo při 2000 ot./min. a chodu naprázdno přibližně 14 minut.



Obrázek 47 - Průběh oteplení

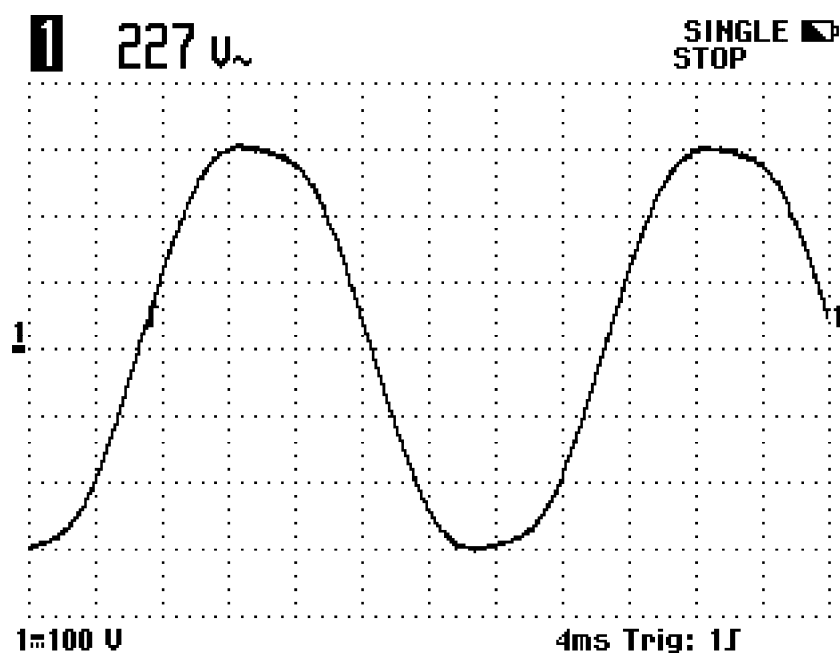
9.7 Ověření funkce regulátoru napětí

Funkci regulátoru napětí se bohužel nepodařilo ověřit. Ačkoli třífázová triaková regulace v samostatném zapojení fungovala, při zapojení do systému elektrocentrály selhala. Selhání mohlo být způsobeno zničením některé součástky přepět'ovým impulsem, který nastal při odpínání stykače nebo při reakci jističe. Vzhledem k nedostatku času již nebyla závada odstraněna a testování proběhlo bez regulátoru napětí. To je také důvod, proč jsou všechna měření provedena při maximálních otáčkách 2100 ot./min., kdy již bylo indukované napětí dostatečně velké. Při dalším zvyšování napětí by bylo zapotřebí provádět snižování kapacitního proudu pomocí tlumivek připojených k regulátoru napětí.

9.8 Měření osciloskopem

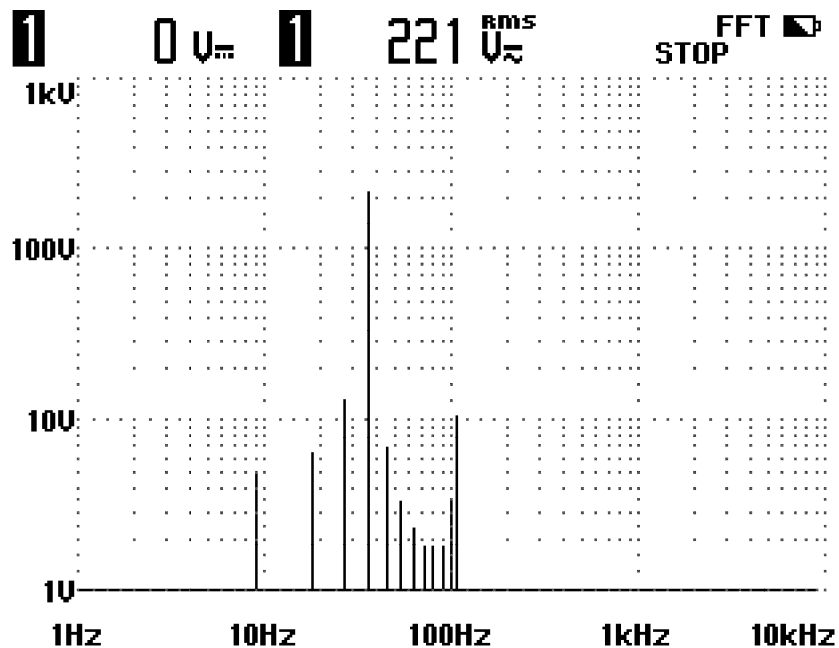
Na elektrocentrále bylo také provedeno několik měření pomocí osciloskopu. Byl použit osciloskop Tektronix THS3014. Byly sledovány průběhy napětí a proudu v jedné fázi generátoru. Tyto průběhy byly také podrobeny analýze rychlou Fourierovou transformací, pro zjištění složení signálu z vyšších harmonických. Vzhledem k problému s regulátorem napětí bylo měření prováděno při nastavených konstantních otáčkách 2100 ot./min., kterým odpovídá frekvence 35 Hz. První harmonická tedy není standardních 50 Hz ale 35 Hz.

Následující obrázek ukazuje průběh napětí na generátoru. Měření probíhalo na fázi L1 na svorkovnici v rozvaděči.



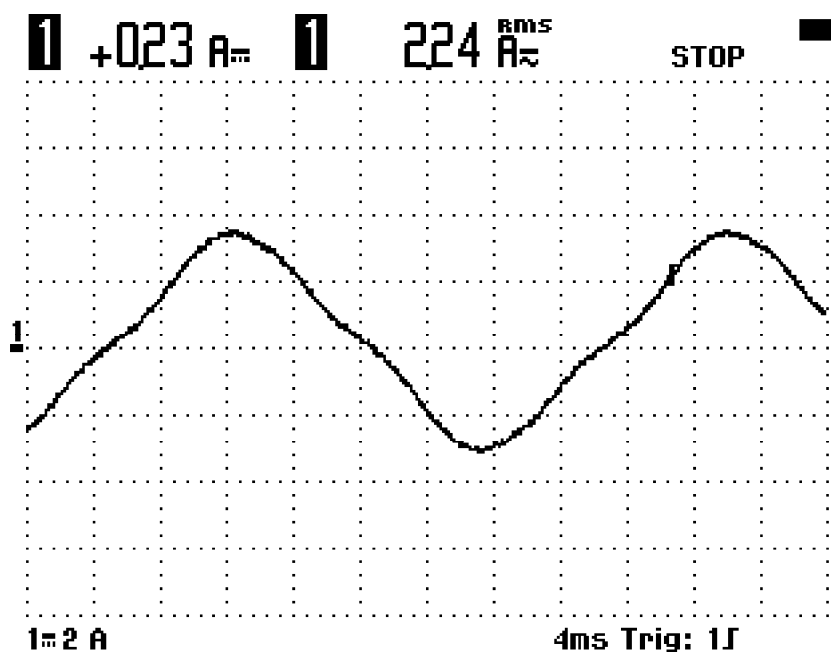
Obrázek 48 - Průběh napětí jedné fáze generátoru

Na následujícím obrázku je Fourierova transformace měřeného průběhu. Problém při tomto měření byly kolísající otáčky spalovacího motoru, což způsobovalo rychlé změny spektra. V napětí se také vyskytují nižší harmonické, než je první harmonická. To může být způsobeno právě kolísáním otáček, které způsobí pokles frekvence a dočasný pokles napětí.



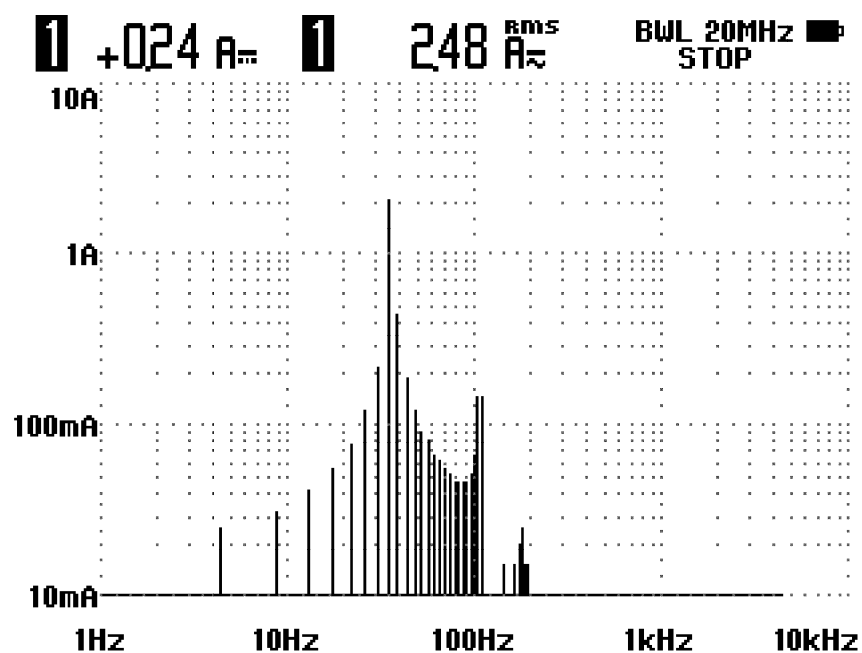
Obrázek 49 - Harmonická analýza napětí generátoru

Jako další byl sledován průběh proudu. Jedná se o budicí proud, kde měření probíhalo u desky spínání buzení. Je tedy vidět proud, který teče do kondenzátorů. Tento proud je značně neharmonický.



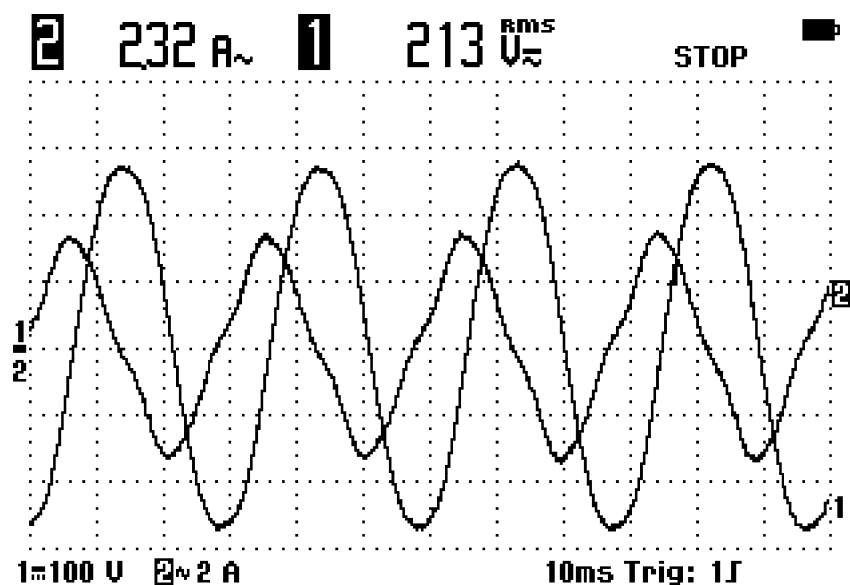
Obrázek 50 - Průběh proudu kondenzátory

Na harmonické analýze proudu je vidět vyšší zastoupení harmonických složek. Jelikož asynchronní stroj pracující naprázdno má blízko k transformátoru, je i tvar proudu ovlivněn podobným způsobem. Deformace průběhu je způsobena magnetizační křivkou materiálu stroje, která není lineární.



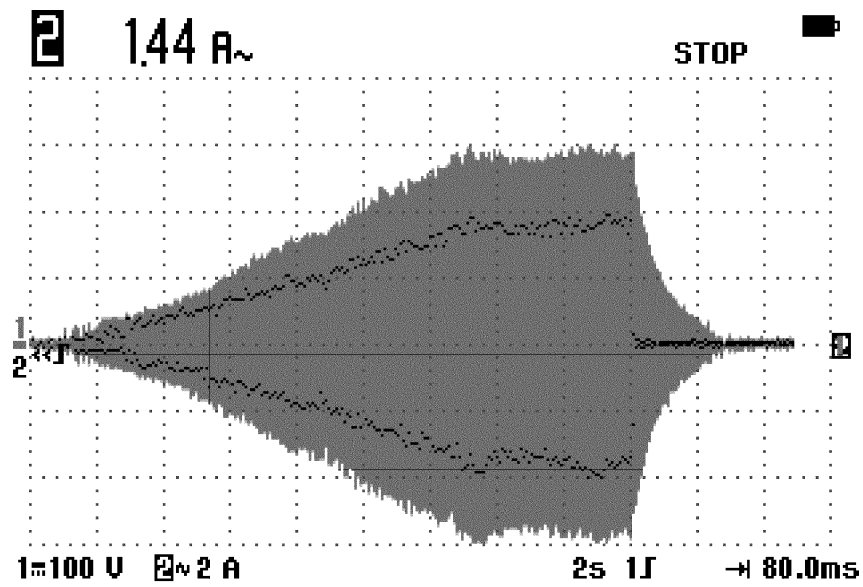
Obrázek 51 - Harmonická analýza budicího proudu

Na následujícím obrázku jsou zachyceny průběhy napětí a proudu v jedné fázi generátoru. Průběh 1 je napětí fáze L1, průběh 2 je proud fáze L1.



Obrázek 52 - Průběh napětí a proudu v jedné fázi generátoru

Následující obrázek ukazuje průběh napětí a proudu nejprve při nabuzení generátoru a poté i při odbuzení. Černou barvou je znázorněna obálka průběhu proudu. Šedou barvou je průběh napětí. Nabuzení trvalo zhruba 13 sekund, odbuzení přibližně 3 sekundy.



Obrázek 53 - Průběhy napětí a proudu při nabuzení a odbuzení

10 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout hardware a software pro řídicí systém elektrocentrály se spalovacím motorem a asynchronním generátorem. Byl navrhnut a vytvořen systém skládající se z několika dílčích plošných spojů s mikrokontroléry, které spolu vzájemně komunikují po sběrnici CAN a dohromady zajišťují řízení, měření a udržování provozních parametrů elektrocentrály v požadovaných mezích. Kromě plošných spojů s mikrokontroléry obsahuje systém i několik pomocných plošných spojů bez mikrokontroléru, jako například zdroj napětí nebo odpojovač buzení. Celý systém byl navržen tak, aby bylo možno jej do budoucna rozšiřovat o další součásti, například pro řízení kogenerace.

Vyrobené plošné spoje byly umístěny do zkonstruované bedny z PVC, která zároveň obsahuje rozvaděč silové části. Bedna umožňuje snadné připojení všech statických prvků elektrocentrály pomocí silové vidlice a svorkovnic. Bedna řídicího systému obsahuje i jednoduchý ovládací panel, který umožňuje jednoduché ovládání elektrocentrály a sledování jejích parametrů i bez připojeného PC.

Pro účely ladění řídicího systému byl také vytvořen program pro PC, který umožňuje přehledně zobrazit měřené veličiny na grafických prvcích a podrobněji ovládat elektrocentrálu. Byl také využit jako datalogger pro uskutečnění některých měření na elektrocentrále. Program na PC byl využit zejména při oživování a ladění jednotlivých prvků řídicího systému.

Nakonec byl celý řídicí systém testován a proběhla některá měření. Komunikace systému s počítačem a komunikace jednotlivých součástí po sběrnici CAN fungovala bez problémů. Při testování byl však problém s nespolehlivostí spalovacího motoru, což znemožnilo provést všechna měření. Regulace plynu a otáček fungovala bez problému, ovšem regulaci napětí se nepodařilo uvést do chodu. Došlo k poruše triakového regulátoru a vzhledem k nedostatku času se jej nepodařilo včas opravit. Elektrocentrálu se tedy nepodařilo uvést na jmenovité parametry. Podařilo se dosáhnout napětí 230 V, ovšem pouze při frekvenci 35 Hz. Při vyšší frekvenci by došlo k nárůstu napětí, což bez regulátoru napětí nebylo možné. Podařilo se tedy navrhnout a sestavit poměrně složitý řídicí systém z cenově dostupných komponent.

11 Seznam použité literatury

- [1] CHAPMAN, Stephen J. *Electric machinery fundamentals*. New York: McGraw-Hill, c1985. ISBN 0070106630.
- [2] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02109-2.
- [3] J. T. de Resende, A. J. H. C. Schelb, R. Ferreira and E. P. Manasses, "Control of the generated voltage by a three-phase induction generator self-excited by capacitors using control techniques," *Industrial Technology, 2003 IEEE International Conference on*, 2003, pp. 530-535 Vol.1.
- [4] S. Kumar, S. Pradhan and R. N. Sahu, "Excitation capacitance requirements of three phase self excited induction generator for WindMill application," *Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference on*, Nagercoil, 2013, pp. 365-370.
- [5] Diming 230V AC with Arduino – electronics. *Alfadex*. [online]. 8.2.2014 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://alfadex.com/2014/02/dimming-230v-ac-with-arduino-2/>
- [6] CAN – popis struktury. *HW*. [online]. 4.6.2004 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/rozhrani/can-popis-struktury.html>
- [7] Arduino MEGA 2560. *Arduino*. [online]. © 2016 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>
- [8] Arduino Pro Mini. *Arduino*. [online]. © 2016 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardProMini>
- [9] ANDRT, Jaroslav a Tomáš MALINA. *Údržba a opravy automobilů Škoda Favorit, Forman, Pick up: Komfort, Sport line, Marathon, Prima, Excellent, Silver line, Black line*. 2., dopl. vyd. Praha: Tomáš Malina, 1993. ISBN 80-900759-4-0.
- [10] Microcon. Krokové motory. *Microcon*. [online]. © 2016 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.microcon.cz/pdf2015/14-21.pdf>
- [11] A4988 Stepper Motor Driver Carrier. *Pololu – Robotics & Electronics*. [online]. © 2001–2016 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/1182>
- [12] Current Transducer LAH 50-P Datasheet. *LEM*. [online]. 22.6.2013 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.lem.com/docs/products/lah%2050-p.pdf>

- [13] DS18B20 Datasheet. *Maxim Integrated*. [online]. © 2015 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [14] MCP2525 Datasheet. *Microchip*. [online]. © 2007 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21801e.pdf>
- [15] DS1307 Datasheet. *Maxim integrated*. [online]. © 2015 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1307.pdf>

12 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Řez asynchronním motorem s kotvou nakrátko [2].....	2
Obrázek 2 - Momentová charakteristika asynchronního stroje [1]	4
Obrázek 3 - Nabuzení asynchronního generátoru [1].....	5
Obrázek 4 – Zapojení asynchronního generátoru a kondenzátorů [1].....	6
Obrázek 5 - Voltampérová charakteristika pro různá zapojení kondenzátorů [1].....	6
Obrázek 6 - Arduino Mega 2560.....	16
Obrázek 7 - Arduino Pro Mini	16
Obrázek 8 - Modul MCP2515 CAN.....	17
Obrázek 9 - Modul SD karty	17
Obrázek 10 – Modul reálného času.....	18
Obrázek 11 - Hlavní řídicí deska.....	19
Obrázek 12 - Mechanismus na regulaci škrticí klapky.....	20
Obrázek 13 - Plošný spoj regulátoru otáček.....	21
Obrázek 14 - Deska měření	22
Obrázek 15 - Schéma zapojení měření proudu.....	23
Obrázek 16 - Modul s měřicím transformátorem napětí	23
Obrázek 17 - Schéma zapojení měření frekvence [5].....	24
Obrázek 18 - Zdroj ± 12 V a ± 5 V	25
Obrázek 19 - Zjednodušené schéma zdroje pro napájení desky měření.....	25
Obrázek 20 - Zapojení spínacího obvodu relé.....	26
Obrázek 21 - Deska s relé na 230 V	27
Obrázek 22 - Deska s relé na 12 V	28
Obrázek 23 - Schéma zapojení silové části spínání budiče	29
Obrázek 24 - Deska spínání budiče	29
Obrázek 25 - Schéma zapojení jedné fáze triakového regulátoru [5].....	31
Obrázek 26 - Triakový regulátor výkonu	31
Obrázek 27 - Ovládací panel	32

Obrázek 28 - Zjednodušená struktura regulace frekvence	43
Obrázek 29 - Průběh operací při měření U,I,F	44
Obrázek 30- Průběhy napětí, proudu a zapalovací pulsy pro různé procento otevření triaku	47
Obrázek 31 - Rozložení zapalovacích impulsů pro triaky v čase ($\alpha=90^\circ$)	48
Obrázek 32 - Schéma regulace napětí	48
Obrázek 33 - Ovládací program na PC.....	54
Obrázek 34 - Okno dataloggeru	54
Obrázek 35 - Okno s průběhy.....	55
Obrázek 36 - Bedna s rozvaděčem a řídicím systémem.....	56
Obrázek 37 - Vnitřek bedny s rozvaděčem a řídicím systémem	57
Obrázek 38 - Pohled na boční stěny bedny s rozvaděčem	58
Obrázek 39 - Schéma zapojení silové části	59
Obrázek 40 - Schéma zapojení budiče	60
Obrázek 41 - Průběh aktuálního a žádaného procenta plynu ve skokovém režimu	61
Obrázek 42 - Průběh aktuálního a žádaného procenta plynu v dynamickém režimu.....	62
Obrázek 43 - Regulace otáček.....	62
Obrázek 44 - Závislost frekvence generátoru na otáčkách.....	63
Obrázek 45 - Závislost indukovaného napětí na otáčkách	64
Obrázek 46 - Průběh nabuzení a odbuzení generátoru.....	64
Obrázek 47 - Průběh oteplení.....	65
Obrázek 48 - Průběh napětí generátoru	66
Obrázek 49 - Harmonická analýza napětí generátoru	67
Obrázek 50 - Průběh proudu kondenzátory.....	67
Obrázek 51 - Harmonická analýza budičeho proudu.....	68
Obrázek 52 - Průběh napětí a proudu v jedné fázi generátoru	68
Obrázek 53 - Průběhy napětí a proudu při nabuzení a odbuzení.....	69
Obrázek 54 - Foto celého systému při měření.....	75
Obrázek 55 - Foto umístění regulátoru rychlosti na karburátor	75
Obrázek 56 - Foto realizace tlumivek	76
Obrázek 57 - Foto spalovacího motoru s generátorem.....	76

13 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Pracovní oblasti asynchronního stroje [2].....	3
Tabulka 2 - Štítkové hodnoty použitého asynchronního stroje	7
Tabulka 3 - Proměnné pro sledování fyzikálních veličin elektrocentrály	12
Tabulka 4 - Proměnné sledující stavy zařízení a regulátorů.....	13
Tabulka 5 - Použitelné datové typy	34
Tabulka 6 - Datové typy proměnných a jejich rozsahy	35
Tabulka 7 - Zprávy na sběrnici CAN	37
Tabulka 8 - Popis zpráv komunikace s PC.....	39
Tabulka 9 - Obrazovky ovládacího pultu	50

14 Seznam zkratk

SPI	- Serial Peripheral Interface
UART	- Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
USB	- Universal Serial Bus
CAN	- Controller Area Network
I2C	- Inter-Integrated Circuit
COM	- Communication port
EEPROM	- Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
LED	- Light Emitting Diode
PVC	- Polyvinylchlorid
PID	- Proporcionálně Integračně Derivační
AD	- Analogově Digitální
RMS	- Root Mean Square
ASCII	- American Standard Code for Information Interchange
LCD	- Liquid Crystal Display

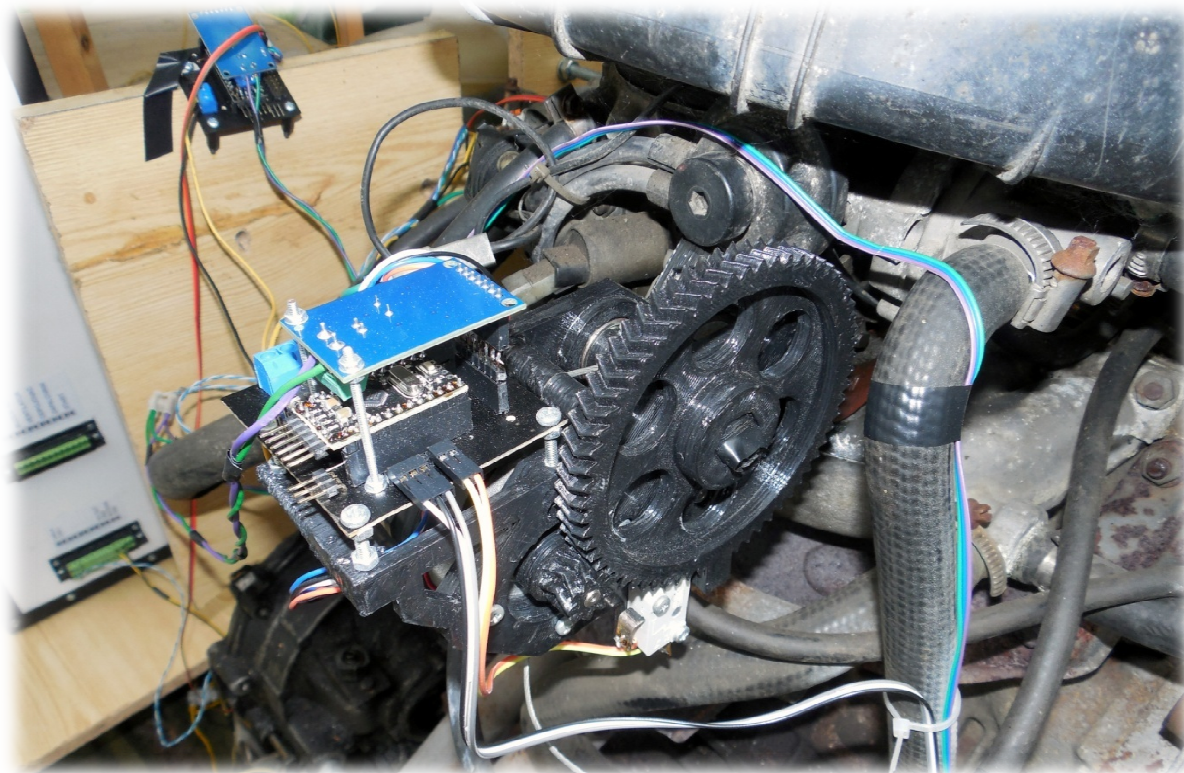
15 Obsah příloženého CD

Diplomová práce.pdf	- Elektronická verze této diplomové práce
Složka Programy	- Zdrojové kódy pro všechny mikrokontroléry
Složka Ovládání PC	- Složka s ovládacím programem na PC
Složka Dokumentace	- Složka se soubory dokumentací k jednotlivým plošným spojům.
Složka Fotografie	- Složka s fotografiemi

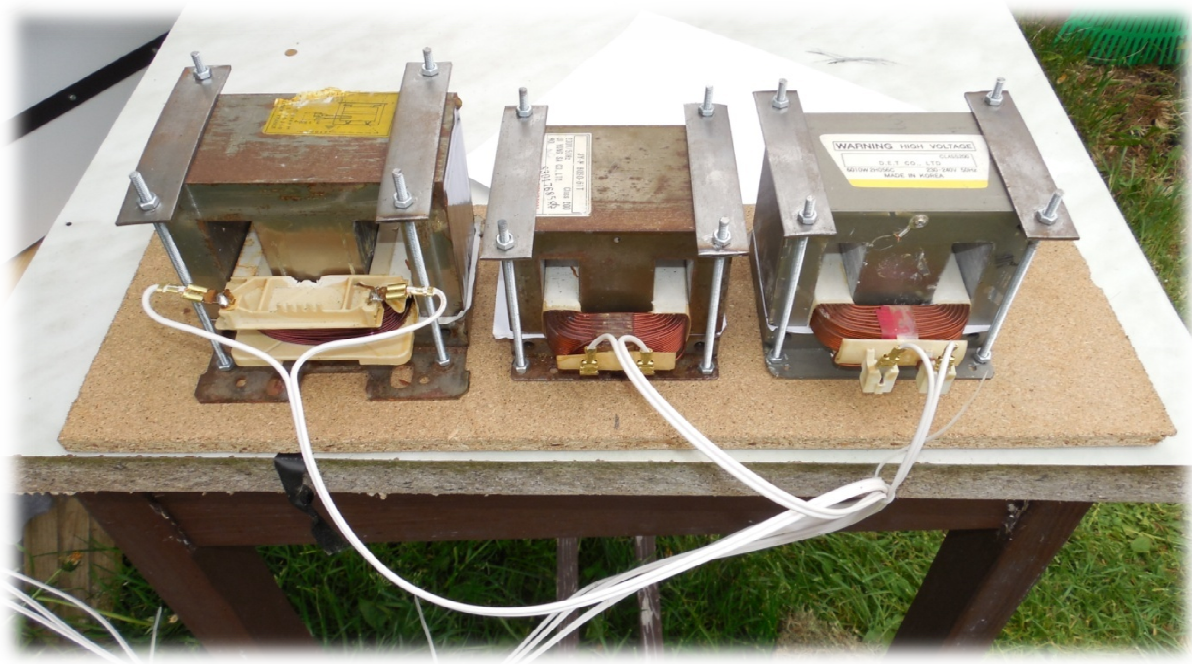
16 Obrazová příloha



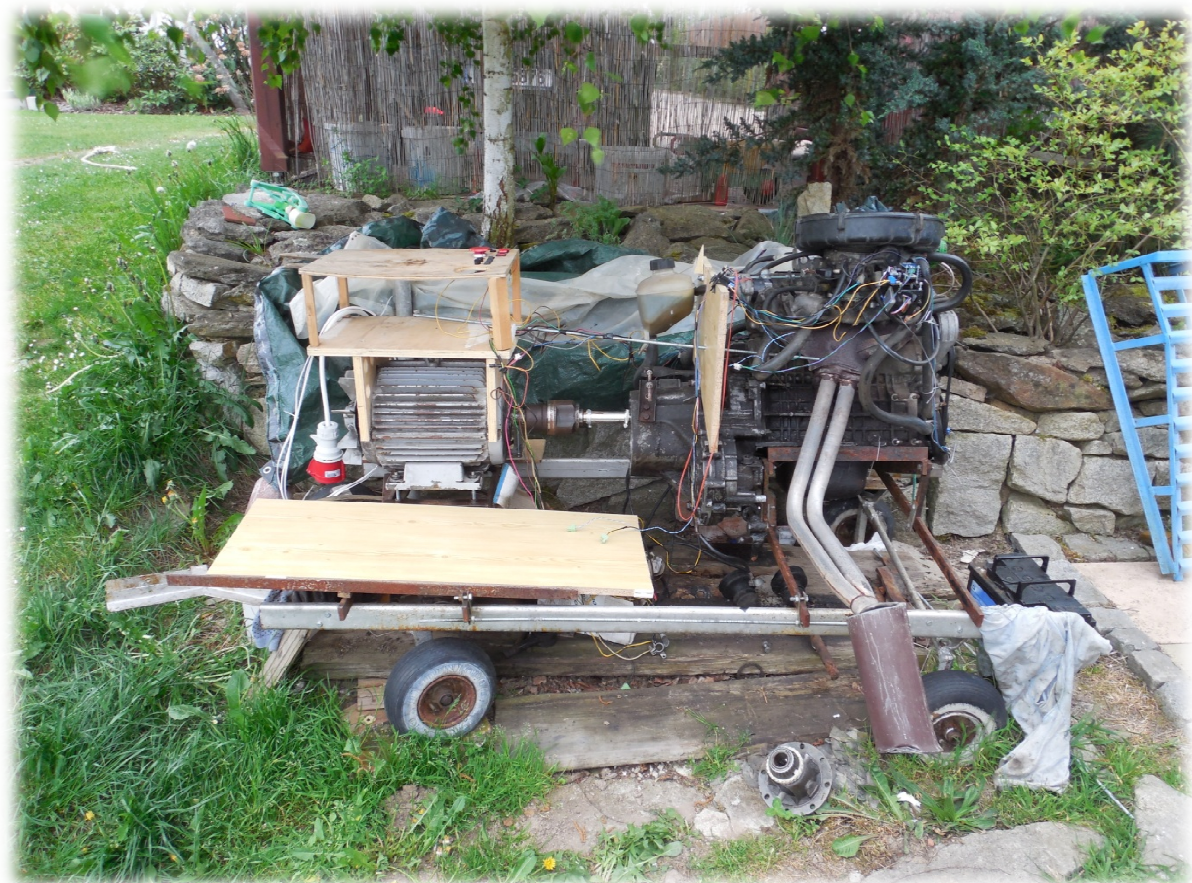
Obrázek 54 - Foto celého systému při měření



Obrázek 55 - Foto umístění regulátoru rychlosti na karburátor



Obrázek 56 - Foto realizace tlumivek



Obrázek 57 - Foto spalovacího motoru s generátorem