

UNIVERZITA PARDUBICE
Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh a realizace regulátoru napětí
synchronního generátoru

Bc. Ondřej Vlček

Diplomová práce

2020

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Vlček**
Osobní číslo: **D17542**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**
Téma práce: **Návrh a realizace regulátoru napětí synchronního generátoru**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Zásady pro vypracování

- Proveďte rešerši budících soustav a regulátorů napětí synchronních generátorů
- Navrhněte regulátor napětí synchronního generátoru pracujícího v ostrovní síti
- Zrealizujte regulátor napětí synchronního generátoru pracujícího v ostrovní síti
- Proměřte a zhodnoťte vlastnosti zrealizovaného regulátoru

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Postler, Ladislav: Samočinné přístroje pro generátory; ESČ, 1943, Praha
- Postler, Ladislav: Ochranné, řídicí a sdělovací přístroje v elektrizačních soustavách I, Relé, regulátory a fá-zovače pro generátory a transformátory; SNTL, 1955, 1961, Praha
- Pavelka, Jiří: Elektrické pohony; ČVUT, Praha

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Sýkora**
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **24. února 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **1. června 2020**



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

L.S.



Ing. Dušan Čermák, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení autora

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

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

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

V Pardubicích dne 17. 5. 2020

Ondřej Vlček

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Sýkorovi, za jeho čas, rady a názory vždy, když jsem potřeboval, a za poskytnutí všeho, co bylo pro tuto práci potřeba.

Děkuji své manželce, Karolíně Vlčkové, za podporu a trpělivost během studia. Času, který jsem věnoval vzdělání místo rodině, bylo mnoho.

Poděkování si zaslouží i Ing. Ludvík Habásko, který mi pomohl zejména s realizací hardwaru a daroval některé komponenty. Dále chci poděkovat i dalším lidem z mého okolí, poděkování si zaslouží každý, kdo mi pomohl dostat se až sem.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací regulátoru napětí pro synchronní generátor. Práce je rozdělena na devět kapitol. První slouží k připomenutí základních vlastností synchronních motorů. Druhá a třetí pojednává o regulátorech a budicích soustavách. Následuje stanovení cílů a požadavku na regulátor. Další kapitoly jsou věnovány samotnému návrhu se všemi důležitými podrobnostmi, realizaci navrženého regulátoru a podrobnému testování správné funkce. Poslední kapitola se věnuje instalaci nového regulátoru do staré budicí soustavy generátoru.

Klíčová slova

Synchronní generátor, regulátor napětí, alternátor, budicí soustava, PID regulátor, Arduino

Title

Project and Realisation of Voltage Regulator for Synchronous Generator

Annotation

This master's thesis deals with the proposal and realization of voltage regulator for a synchronous generator. The thesis is divided into nine chapters. The first chapter to recall the basic features of synchronous motors. The second and third chapters deals with regulators and excitation systems. This is followed by setting goals and requirements for the regulator. The next chapters are about to the design itself with all the important details, realization of the proposed regulator and detailed function testing. The last chapter deals with the installation of a new regulator in the old excitation system of the generator.

Keywords

Synchronous generator, voltage regulator, alternator, excitation system, PID regulator, Arduino

Obsah

Úvod.....	1
1 Synchronní generátory.....	2
1.1 Princip synchronního generátoru	2
1.2 Základní vlastnosti	2
1.2.1 Zátěžný úhel	3
1.2.2 Moment	4
1.3 Vliv buzení na indukovaném napětí.....	4
1.3.3 Synchronní generátor s permanentními magnety	6
1.4 Vliv rychlosti otáčení	6
1.5 Účinník.....	6
1.6 Fázování	7
2 Regulátory napětí a jejich dělení	8
2.1 Dělení dle způsobu regulace	8
2.2 Dělení dle rychlosti	9
2.3 Regulátor VR3T	9
3 Budicí soustavy	12
3.1 Rotační budicí soustavy	12
3.1.1 Derivační dynamo	12
3.1.2 Cize buzené dynamo	13
3.2 Statické budicí soustavy	13
3.3 Bezkartáčové budicí soustavy	14
3.3.3 Střídavý budič a rotující usměrňovač	14
3.3.4 Soustava s protiběžným polem.....	14
3.3.5 Rotační transformátor a diodový usměrňovač.....	14
4 Stanovení požadavku regulátoru	15
4.1 Technické požadavky.....	15
4.2 Rychlost regulace a stabilita.....	15
4.3 Výkonové požadavky.....	15
5 Návrh hardwarové části	16
5.1 Řídicí deska.....	16
5.2 Měření výstupního napětí.....	17
5.2.1 Vzorkování	17
5.2.2 Citlivost převodníku.....	19

5.2.3	Měřicí transformátor.....	19
5.2.4	Výpočet děliče.....	21
5.2.5	Zapojení.....	22
5.3	Napěťová reference.....	23
5.4	Regulace budicího proudu.....	24
5.4.1	MOS FET tranzistor.....	25
5.4.2	Galvanické oddělení.....	25
5.4.3	Budič.....	26
5.4.4	PWM modulace.....	28
5.4.5	Ztrátový výkon.....	30
5.5	Napájení regulátoru.....	32
5.5.1	Stanovení rozsahu napájení.....	32
5.5.2	Zapojení.....	33
5.6	Vstupy a výstupy.....	34
5.7	Rozměry a vzhled.....	34
6	Návrh softwarové části.....	35
6.1	Arduino IDE.....	35
6.2	Programová smyčka.....	35
6.3	Funkce pro měření napětí.....	36
6.3.1	Frekvence vzorkování.....	38
6.3.2	Výpočet efektivní hodnoty napětí.....	39
6.4	Programová smyčka – pokračování.....	42
6.5	PID regulace.....	44
6.5.1	Vliv jednotlivých složek PID.....	47
6.5.2	Algoritmus výpočtu PID složek.....	47
6.5.3	Filtrování PID složek.....	49
6.5.4	Vliv regulované soustavy.....	49
6.5.5	Popis systému diferenciální rovnicí.....	49
6.5.6	Nastavení PID regulátoru.....	51
6.6	Vyhodnocení poruch.....	53
6.7	Komunikace.....	54
7	Realizace.....	55
7.1	Vývoj.....	55
7.2	Návrh plošných spojů.....	55

7.2.1	Výroba plošného spoje	56
7.3	Parametry výrobku	57
8	Testování v laboratoři	58
8.1	Měření napětí	58
8.2	Měřicí pracoviště	59
8.3	Seřízení regulátoru	61
8.4	Statické charakteristiky	61
8.5	Dynamické charakteristiky	63
8.6	Nesymetrická zátěž generátoru	69
9	Testování v provozu na skutečném generátoru	71
9.1	Popis generátoru	71
9.2	Původní stav	72
9.3	Integrace regulátoru	74
	Závěr	78
	Použitá literatura	80
	Seznam obrázků	83
	Seznam tabulek	85
	Seznam grafů	86
	Seznam příloh	87
	Seznam zkratk	88
	Přílohy	89

Úvod

Tato diplomová práce se věnuje návrhu regulátoru napětí synchronního generátoru pracujícího v ostrovní síti. Návrh je obecný, aby byl výsledný regulátor schopen regulace stejnosměrného budicího proudu pro jakýkoli generátor.

Nejlepší způsob, jak prověřit funkčnost zařízení je skutečný provoz, proto je návrh přizpůsoben pro cílové zapojení na generátor ve vlastnictví Průmyslového muzea Mladějov, jehož původní, dnes historický vibrační regulátor VR3, již není funkční a potřebuje nahradit. Tato skutečnost je důvodem, proč se v práci často odkazujeme na vlastnosti této pojízdné elektrocentrály.

Každý generátor potřebuje k výrobě elektrické energie být poháněn. Nezáleží na tom, jakým způsobem je pohon realizován. Druhou podmínku, kterou musíme pro výrobu elektřiny splnit, je zajištění budicího napětí, které vyvolá proud budicím vinutím v rotoru generátoru. Tuto úlohu zajišťuje budič. Od dob druhé průmyslové revoluce bylo způsobů, jak budič realizovat, vymyšleno mnoho. Počínaje baterií a ručním reostatem přes složité soustavy pomocného a hlavního budiče až po moderní elektronické řízení procesorem a jejich kombinace. Z tohoto důvodu jsou v práci uvedeny pouze vybrané systémy.

Většina teoretického obsahu směřuje spíše k budicím soustavám použitelným v ostrovní síti. Ostrovní síť je označena skupina jednoho nebo více generátorů, pracující samostatně bez připojení k pevné distribuční síti. Příkladem je energetická síť na lodi. Provoz jednoho generátoru má svá specifika, jedním z nich je problematika zahájení provozu. Při rozběhu „do tmy“ potřebuje nabudit, aby se v něm začalo indukovat napětí, ale protože se v něm téměř žádné napětí neindukuje, musí být budicí soustava alespoň pro začátek provozu nezávislá.

Hlavním cílem této práce je vytvořit prototyp funkčního regulátoru, který neskončí pouze na polici, ale bude namontován do elektrocentrály, a bude plnit funkci regulace vždy, když bude centrála v provozu. Proto je práce zaměřena hlavně na návrh hardwaru a softwaru dle teoretických znalostí, realizaci návrhu a jeho testování.

1 Synchronní generátory

Generátor lze definovat jako zařízení měnící mechanickou rotační energii na energii elektrickou. Stejně jako každý elektrický točivý stroj se skládá ze statoru a rotoru. Rotor vytváří točivé magnetické pole a do statoru se indukují střídavé napětí. Jinak řečeno, jedná se o synchronní motor pracující v generátorickém režimu. Takové stroje, jejichž výstupem je střídavá elektrická energie, obecně nazýváme alternátory.

Slovem synchronní rozumíme, že mechanická uhlová rychlost rotoru v ustáleném stavu je shodná s uhlovou rychlostí točivého magnetického pole statoru, tedy uhlové rychlosti synchronní. [5]

$$\omega_m = \omega_s \quad (1)$$

Kde: ω_s – synchronní uhlová rychlost [rad/s]

ω_m – mechanická uhlová rychlost [rad/s]

1.1 Princip synchronního generátoru

Běžně jsou na rotoru dva póly a na statoru tři vinutí vzájemně pootočená o 120° tak, aby výstupem alternátoru bylo třífázové napětí. Pořadí fází na výstupu je dáno směrem otáčení rotoru, nikoli polaritou buzení, protože bez ohledu na směr procházejícího proudu budícím vinutím se při otáčení rotoru pravidelně střídá severní a jižní pól magnetického pole. [6]

Vytvoří-li statorové proudy točivé magnetické pole, vznikne magnetická vazba mezi těmito poli a rotor je točivým polem unášen. [5] V případě generátoru je rotor unášen vnější silou a do statoru se indukují napětí. V obou případech rotor generuje vlastní magnetické pole.

U synchronního stroje je magnetické pole rotoru vyvoláno permanentními magnety nebo budícím proudem vedeným nejčastěji pomocí kroužkového sběrače. Vzhledem k povaze práce se v následujícím textu věnujeme zpravidla synchronním generátorům s vinutým rotorem.

1.2 Základní vlastnosti

Hlavní výhodou alternátoru je spolehlivost, vyšší účinnost a možnost výroby nejenom činné, ale i jalové elektrické energie. [26]

Z hlediska konstrukce je můžeme dělit na:

- a) Alternátory s hladkým rotorem
- b) Alternátory s vyniklými póly

Alternátory s hladkým rotorem se vyrábějí výhradně jako dvoupólové a jsou konstruovány na rychlost 3000 ot/min pro síť s frekvencí 50 Hz. Protože nejčastěji pracují ve spojení s parními turbínami, zažilo se označení turboalternátory. [26]

Alternátory s vyniklými póly jsou konstruovány jako vícepólové. Při provozu se otáčí několikrát pomaleji, podle počtu pólových dvojic. Nejběžněji se používají ve spojení s vodními turbínami, proto se jim říká hydroalternátory.

1.2.1 Zátěžný úhel

Zátěžný úhel se značí písmenem β , v literatuře se můžeme setkat i s označením δ , jde o jednu ze základních veličin charakterizující synchronní stroj. Stále musí platit rovnice (1), proto s rostoucím zatížením dochází pouze ke vzájemnému natačení magnetických polí rotoru a statoru.

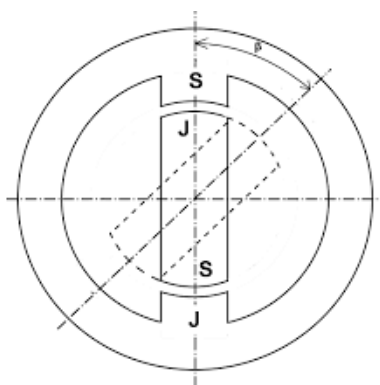
U dvoupólového stroje lze tento úhel reprezentovat jako úhel, který svírá fázor spřaženého magnetického toku statoru s osou rotoru. Jedná-li se o vícepólový stroj, musíme hodnotu přepočítat dle následujícího vztahu. [5]

$$\beta_m = \frac{\beta}{p_p} \quad (2)$$

Kde: β – zátěžný úhel [rad]

β_m – mechanický zátěžný úhel [rad]

p_p – počet pólových dvojic [-]



Obrázek 1 – Mechanická reprezentace zátěžného úhlu [9]

Podle velikosti zátěžného úhlu rozlišujeme tři provozní stavy synchronních strojů:

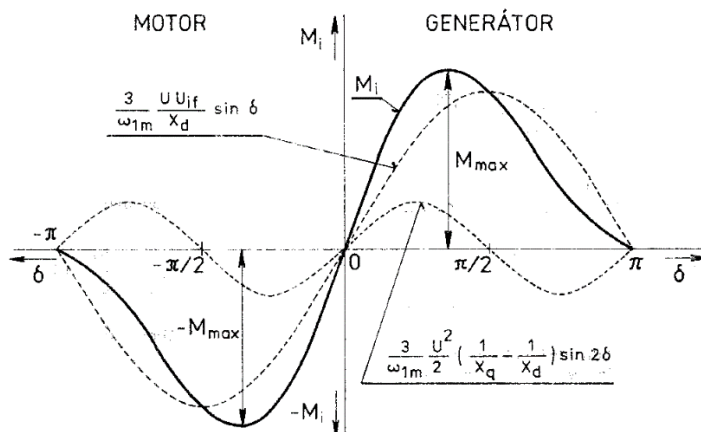
$\beta < 0$ – Generátorický režim, magnetické pole statoru se zpožďuje za magnetickým polem rotoru. Moment na hřídel dodáváme.

$\beta = 0$ – moment motoru je nulový, výkon je nulový a nepokrývá ani vlastní ztráty.

$\beta > 0$ – motorický režim, magnetické pole rotoru se zpožďuje za magnetickým polem statoru. Moment ze hřídele stroje odebíráme.

1.2.2 Moment

Aktuální velikost zátěžného úhlu přímo ovlivňuje velikost momentu. Momentová charakteristika stroje s hladkým rotorem v závislosti na zátěžném úhlu je sinusového průběhu. Pro rotor s vyniklými póly vzniká v motoru reluktanční moment a ten se sčítá s momentem pro hladký rotor. Výsledkem je momentová charakteristika uvedena na *obrázku 2*. Reluktanční moment je úměrný rozdílu magnetických odporů v příčné a podélné ose. Ty používáme při práci s matematickým modelem stroje. Výhodou vyniklých pólů je zvýšení maximálního momentu stroje.



Obrázek 2 – Momentová charakteristika [26]

Mechanická charakteristika synchronního stroje je přímkou rovnoběžnou s osou x , uhlová rychlost se zatěžovacím momentem nemění. Při vzrůstu momentu na hřídeli stroje nad maximální hodnotu momentu, a to v motorickém i generátorickém režimu, se přeruší magnetická vazba mezi statorovým točivým magnetickým polem a polem rotoru a stroj ztratí moment. Dojde k tzv. vypadnutí ze synchronismu.

1.3 Vliv buzení na indukovaném napětí

Indukované napětí vzniká ve vodiči při změně magnetického indukčního toku v jeho okolí. Je-li vodič posouván napříč magnetickým polem, pohybují se s ním i jeho volné elektrony. Pohybující se elektrony jsou odchylovány v magnetickém poli kolmo od směru svého pohybu. Na jednom konci vodiče vzniká nadbytek elektronů a na druhém konci jejich nedostatek. Mezi konci vodiče vzniká napětí. [27]

Indukované napětí v přímém pohyblivém vodiči je přímo úměrné součinu magnetické indukce, aktivní délky vodiče a rychlosti vodiče. Velikost indukovaného napětí narůstá s rychlostí pohybu vodiče, příp. rychlostí pohybu pole. Máme-li místo vodiče cívku, pak indukované napětí vzrůstá s rostoucím počtem závitů cívky. [7]

$$U_i = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

Kde: U_i – indukované napětí [V]

B – magnetická indukce [T]

l – délka vinutí [m]

v – rychlost pohybu vodiče vůči magnetickému poli [m/s]

$\sin \alpha$ – úhel vektoru magnetické indukce a vektoru rychlosti vodiče

Pokud situaci zjednodušíme, lze si do rovnice (3) promítnout vlastnosti generátoru. U_i představuje indukované napětí generátoru. S rostoucími otáčkami roste rychlost pohybu v . Pro magnetickou indukci platí: [6]

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (4)$$

$$\Phi = L \cdot I \quad (5)$$

Kde: Φ – magnetický indukční tok [Wb]

S – plocha [m²]

L – indukčnost [H]

I – proud vodičem [A]

Proud cívku vyvolá magnetický indukční tok. Pro stejnosměrné napětí je proud tekoucí vodičem dle Ohmova zákona přímo úměrný napětí. Protože vinutí není v prostředí s konstantní permeabilitou, není indukční tok přímo úměrný proudu.

Tedy – velikost výstupního napětí generátoru můžeme ovlivnit velikostí budicího napětí a otáčkami generátoru. Zbytek veličin je dán konstrukcí stroje. Pro výpočet odpovídající skutečným veličinám je třeba použít matematický model stroje, nejčastěji v transformované souřadnicové soustavě d, q. Napěťová rovnice v ustáleném stavu včetně odvození a fázového diagramu je běžně uvedena v odborné literatuře zabývající se synchronními stroji [1, 5, 9, 26], a proto zde není uvedena.

1.3.3 Synchronní generátor s permanentními magnety

Motory s permanentními magnety jsou stále oblíbenější, díky své velikosti, vysoké dynamice a účinnosti. Ovšem na použití v generátoru pracujícím v ostrovní síti se příliš nehodí. Permanentní magnety ze vzácných kovů se sice vyznačují vysokou magnetickou indukci, ale nelze ji regulovat. Napětí naprázdno je výrazně vyšší než napětí při jmenovitém zatížení. [8]

1.4 Vliv rychlosti otáčení

Jeden z hlavních požadavků pro provoz je stabilní rychlost otáčení, protože jak vyplývá z rovnice (1), změnou otáček rotoru změníme mechanickou úhlovou rychlost a tím i frekvenci výstupního napětí dle vztahu (6). [26]

$$f = \frac{p_p \cdot n}{60} \quad (6)$$

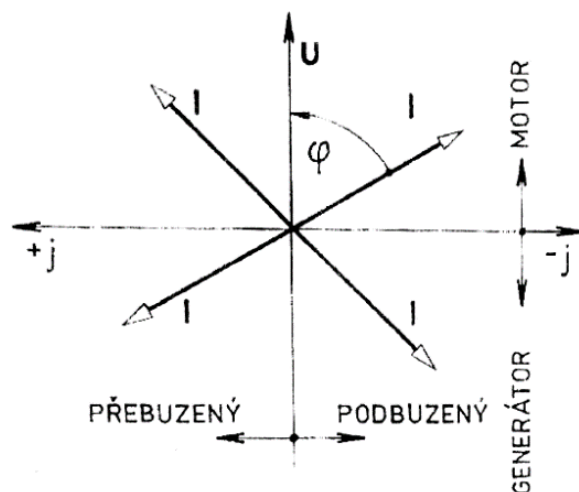
Kde: p_p – počet pólových dvojic [-]

n – otáčky [ot/min]

Velmi často se alternátory používají i jako zdroje stejnosměrného napětí, kde je na statorové vinutí připojen usměrňovač. Toto řešení kvůli své spolehlivosti ve vozidlech vytlačilo použití dynam s komutátory. Výhodou usměrnění je, že nepotřebujeme konstantní rychlost rotoru. Použití regulátoru budicího proudu je však samozřejmostí.

1.5 Účinník

Jak bylo již napsáno v oddílu 1.2, u synchronních strojů lze řídit účinník. Podmínkou je práce alternátoru v tvrdé (ideální síti). Při přesném sfázování je proud alternátoru teoreticky nulový. Pokud zvýšením budicího napětí alternátor přebudíme, začne dodávat jalový výkon – bude se chovat jako kondenzátor. Naopak podbuzením alternátor začne jalový výkon odebírat. Změnou momentu stroj začne dodávat, nebo odebírat převážně výkon činný. [26] Režimy provozu jsou na následujícím obrázku. Při provozu jednoho generátoru tuto možnost nemáme. Změna momentu způsobí změnu otáček. Celkový účinník je ovlivněn charakterem zátěže.



Obrázek 3 – Provozní stavy synchronního stroje [26]

1.6 Fázování

Synchronizace alternátoru je třeba řešit, pokud pracuje souběžně s dalšími alternátory. Připojování alternátoru paralelně v síti říkáme fázování. [26] Pro takový provoz je nutné zajistit, aby alternátory pracovaly na stejné frekvenci a napětí. Samozřejmostí je stejný sled fází a fázový posun musí být v okamžiku připojení co nejmenší. Tím zabráníme velkým proudovým rázům. Tato problematika se musí řešit třeba v elektrárnách. Pro provoz v ostrovní síti, při provozu jednoho alternátoru není co fázovat.

2 Regulátory napětí a jejich dělení

Jako regulátor označujeme zařízení, které slouží k udržení žádaných provozních hodnot, v našem případě napětí, ideálně nezávisle na vnějších vlivech. Součástí regulátoru je zpětná vazba, která poskytuje informaci o skutečné hodnotě výstupu. U střídavých generátorů při konstantním buzení nezávisí výstup jen na úbytku napětí přímo úměrnému velikosti zatížení, ale i na fázovém posunu napětí a proudu, který je ovlivněn typem zátěže. Proto se pro ostrovní síť používá regulace napětí.

Vyrovnání úbytku napětí na generátoru a vedení se vzrůstajícím zatížením nazýváme kompaundací. S rostoucím zatěžovacím proudem, měřeném pomocí transformátoru proudu, zvyšujeme napětí generátoru a tím kompenzujeme úbytek. Lepší by bylo znát přesné napětí v místě odběru, ale protože toto řešení má smysl pouze pro dlouhé vedení, není ani jednoduše měřitelné.

Dle seřízení a funkce lze regulátory rozdělit na stabilní statický, astatický a labilní. Statický regulátor připouští pokles napětí se zatížením. Astatický udržuje konstantní napětí, bez ohledu k zátěži. Labilní regulátor s rostoucí zátěží zvyšuje napětí, provádí kompaundaci. [4]

2.1 Dělení dle způsobu regulace

- a) Regulátory napětí, u nichž se buzení generátoru mění změnou odporu.
- b) Regulátory napětí, u nichž se buzení generátoru mění pomocí přídavného proudu.

Do první skupiny lze zařadit prakticky všechny regulátory založené na elektromechanickém principu. V těchto regulátorech, vlivem změny napětí, vznikají mechanické síly, které mění hodnotu vřazeného odporu a tím i velikost budicího proudu. [3]

Do druhé skupiny patří všechny regulátory, u kterých je budicí proud měněn vlastním proudem regulátoru. Zpravidla jsou elektrické, elektromagnetické nebo elektronické.

Elektromechanické regulátory lze dále rozdělit na přímé a nepřímé, podle toho, jakým způsobem provádějí regulaci. U přímých provádí regulaci přímo regulátor. U nepřímých regulace probíhá pomocí akčního členu, tento požadavek vzniká s rostoucím výkonem generátorů. Měřící člen již není schopný vyvinout dostatečnou sílu pro regulaci budicího proudu. Akčním členem nejčastěji býval servomotor. [4]

2.2 Dělení dle rychlosti

Dobu regulace lze rozdělit na dva časové úseky. Na vlastní dobu regulátoru, kterou potřebuje, aby změnil budicí proud, a na dobu, kterou potřebuje budicí soustava, aby změnila výstupní napětí.

Podle vlastní doby dělíme regulátory dle rychlosti na:

- a) Normální volné regulátory – doba regulace 5 – 10 vteřin
- b) Zrychlené regulátory - doba regulace 1 – 5 vteřin
- c) Rychloregulátory - doba regulace do jedné vteřiny

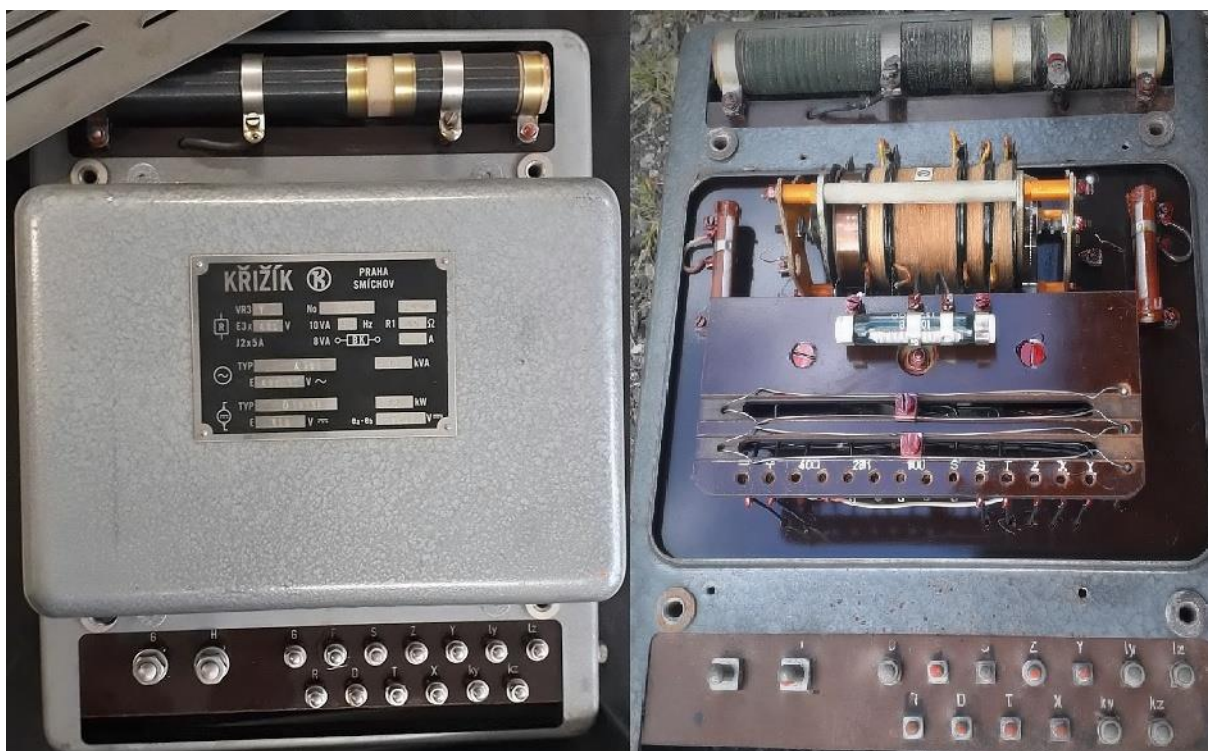
Generátory mají elektromagnetickou setrvačnost, která se nazývá časovou konstantou a její velikost závisí na vlastní indukčnosti generátoru a na činném odporu budicího obvodu. Časová konstanta se běžně pohybuje v rozsahu 2 – 16 vteřin [3], dle velikosti generátoru. Tzn., že uplyne až 16 vteřin, než napětí na generátoru dosáhne změněné hodnoty, která odpovídá novému budicímu proudu. U dobrého rychloregulátoru je vlastní doba oproti časové konstantě generátoru prakticky zanedbatelná. Vliv zpoždění magnetické setrvačnosti lze zmírnit tím, že při skokovém zatížení generátoru se soustava nejdříve silně přereguluje a pak sníží na úroveň, která odpovídá zatížení generátoru.

2.3 Regulátor VR3T

Regulátor VR3T byl na svou dobu jednoduchý, levný vibrační regulátor pro stroje menšího výkonu (do cca 350 kVA). [3] Regulátor se skládá ze základního ocelového rámu, na kterém jsou umístěny všechny prvky. (*Obrázek 4*) Ve spodní části se nachází svorkovnice, v horní zase regulační odpory. Zbytek komponent je umístěn ve střední části regulátoru, která je pod plombou, a proto je na levé straně fotografie zakryta. Na pravé straně obrázku je pro porovnání demontovaný regulátor z kapitoly 9. Další fotografie je v příloze - Příloha K.

Pro pochopení principu funkce je třeba si nejdříve prohlédnout schéma zapojení na *obrázku 5*. Regulátor reguluje budicí napětí budiče, a tím i budicí napětí generátoru rychlými změnami hodnot odporů v budicím obvodu budiče. [3]

K měření napětí slouží dva napěťové transformátory zapojené do V na svorky alternátoru. [35] Měřené napětí je přes selenové usměrňovače usměrněno a přivedeno na hlavní cívku měřicího článku V_{reg} .

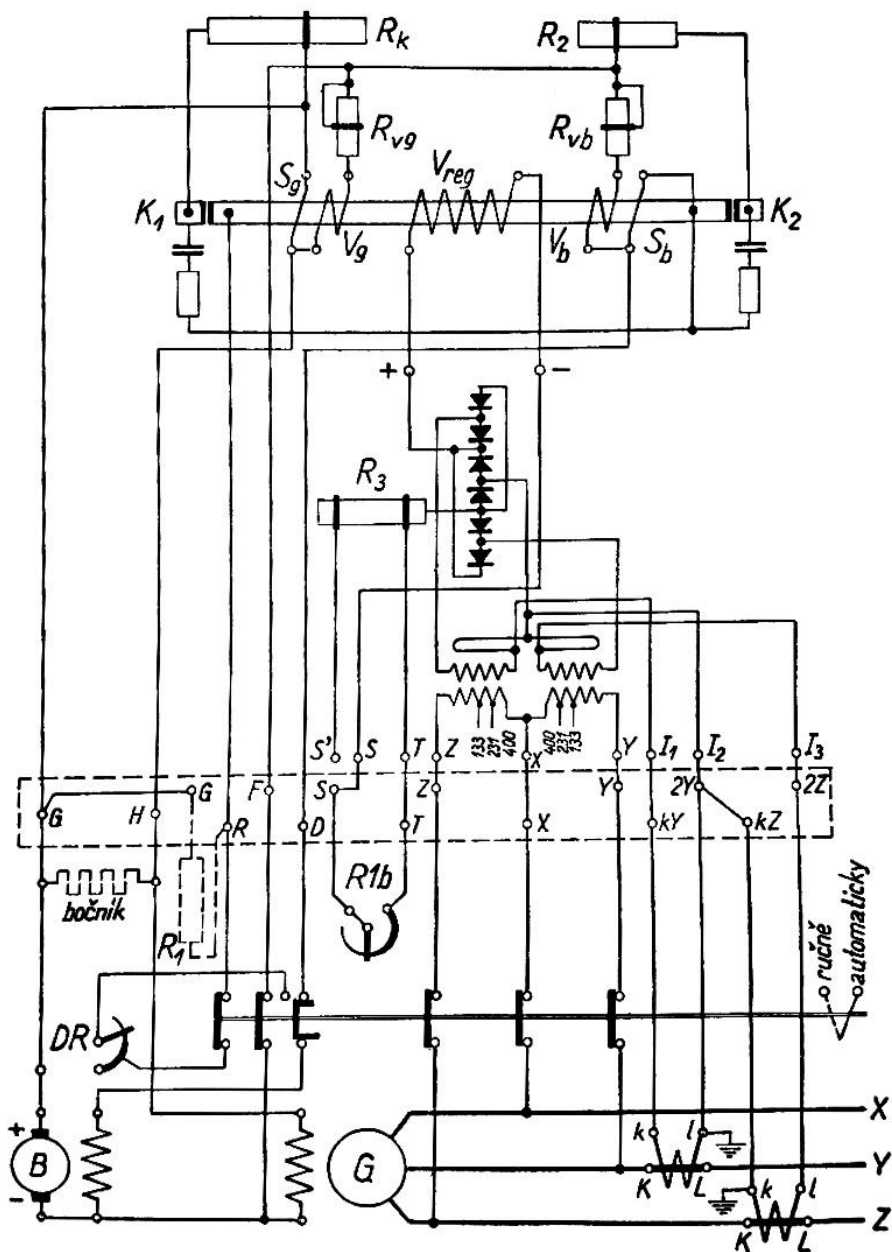


Obrázek 4 – Regulátor VR3T

Proud budiče teče trvale přes odpor R_1 a kontaktem K_1 se k němu paralelně připojuje rezistor R_k . Ten zapříčiní zvýšení proudu budiče. Rezistor R_2 je připojovaný pomocí kontaktu K_2 paralelně k vinutí budiče a naopak snižuje napětí budiče. Činnost kontaktů K_1 , K_2 ovládá měřicí článek (vibrační relé). Kontakty pracují podle velikosti zatížení. K_2 pracuje při chodu bez zatížení a nízké zátěži, K_1 při větším a plném zatížení. Vibraci kontaktů zajišťují pomocné závity S_b a V_b . Závity S_g a V_g pracují jako zpětná proudová vazba budicího vinutí generátoru.

Kruhový odpor R_{1b} ovlivňuje proud měřicí cívkou a slouží seřizování hladiny napětí. Derivační reostat DR ovlivňuje budicí proud, a proto musí být správně nastaven, jeho seřízení má vliv na celou funkci regulátoru. [35]

Pro správné rozdělení jalové zátěže při paralelním chodu má regulátor dvě regulační smyčky zapojené na dva proudové transformátory, které jsou v ostrovním režimu zkratovány zkratovací propojkou. Přepínač „ručně“ a „automaticky“ je umístěn mimo regulátor. Stejně tak rezistor pro nastavení napěťové hladiny regulátoru.



Obrázek 5 – Zapojení regulátoru VR3T [3]

Tabulka 1 – Základní technické údaje regulátoru [35]

Jmenovité udržované napětí	400, 231, 100 V při 50 Hz
Nařiditelnost udržované hladiny	0,8 – 1,1 U
Necitlivost měřicího elementu	±1 %
Přesnost regulace v rozsahu zatížení 0-100 % při 20 ±12 °C	±1 %
Vlastní spotřeba napěťových obvodů	3 x 3,5 VA
Vlastní spotřeba odporových smyček při 5A	2 x 4 VA

3 Budicí soustavy

Rotor generátoru je třeba napájet stejnosměrným budícím proudem. Budicí soustava je nejenom zdrojem budícího proudu, ale plní i další funkce, které jsou nutné pro správnou činnost. [26] Regulátor napětí je součástí budiče. Součástí budicí soustavy může být i odbuzovač zajišťující odpojení zdroje napětí a co nejrychlejší přeměnu elektromagnetické energie na tepelnou v případě poruchy na generátoru.

Budicí soustavy můžeme dělit na dvě hlavní skupiny, rotační a statické. Rotační budiče jsou historicky starší, zdrojem napětí dynamo, zatímco statické obsahují výkonové polovodiče.

Druhé rozdělení je podle zdroje budícího napětí na závislé – budicí napětí je přes transformátor odebíráno ze svorek alternátoru a nezávislé – budicí napětí je nezávislé na napěťovém stavu alternátoru.

Další možné dělení je dle způsobu přenosu budícího výkonu, způsobu řízení velikosti proudu a schopnosti zajistit budicí proud při stojícím generátoru.

3.1 Rotační budicí soustavy

3.1.1 Derivační dynamo

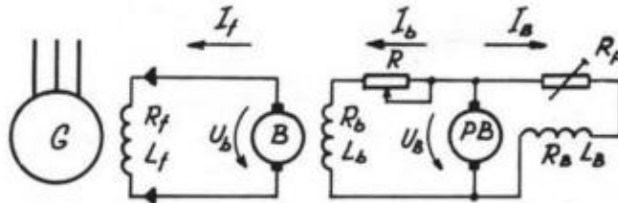
Použití derivačního dynamu bývalo nejběžnější variantou provedení budiče. Takové zapojení je i na *obrázku 5*. Derivační dynamo používaná jako budiče synchronních generátorů mívají smyčkové vinutí kotvy rozdělené několika páry kartáčů na paralelní větve. [6]

Dynamo je na společné hřídeli s generátorem, pokud soustrojí stojí, nelze generátor nabudit. Při roztočení se využívá remanentního magnetismu. Slabé magnetické pole indukuje napětí, řádově pár voltů. Toto napětí vyvolá proud budícím vinutím dynamu, ten musí být umožněn. Tekoucí proud zesílí magnetické pole a děj se znovu opakuje, dokud napětí nedosáhne jmenovité úrovně. Nutnou podmínkou je správné zapojení, aby se magnetická pole sčítala. V opačném případě by došlo k úplnému odmagnetování rotoru a bez cizího zdroje napětí by již nešlo nabudit ani při správném zapojení.

Kotva dynamu je připojena paralelně k budicímu vinutí alternátoru, buzení dynamu a generátoru pracuje na stejné napětí. Proud je přenášen pomocí kroužkových sběračů. Výhodou je jednoduchost. Nejvíce se využívá pro turbogenerátory, která mají dostatečně vysoké otáčky. Nevýhodou jsou kartáče – mechanicky opotřebovávaný díl. Regulace budícího proudu se provádí v obvodu budiče, výhodou je nižší proud, ale sníží se dynamika regulace výstupního napětí.

3.1.2 Cize buzené dynamo

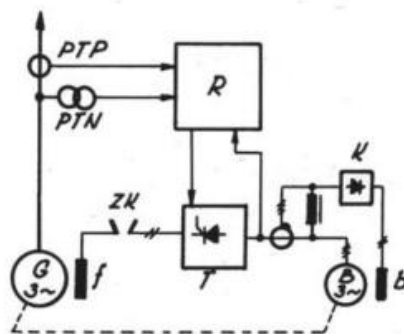
Rozdíl je pouze v buzení dynamo, které je nyní buzeno z řízeného polovodičového zdroje, nebo z pomocného budiče. Při použití řízeného zdroje napětí již nepotřebujeme remanentní magnetismus, ale nezávislá síť pro nabuzení při rozběhu je nutností. Tou se může stát i baterie. Nejjednodušší zapojení soustavy budičů je uvedeno na následujícím obrázku.



Obrázek 6 – Soustava hlavního a pomocného budiče [36]

3.2 Statické budicí soustavy

Hlavní komponentou statického budiče je výkonový polovodič, nejběžněji je zdrojem budicího proudu řízený tyristorový (Obrázek 7), nebo neřízený diodový usměrňovač s předřazeným transformátorem. Je možné se setkat i s budiči připojenými přímo ke statorovému vinutí bez transformátoru. Usměrňovač je pevně spojen se statickou částí a přenos výkonu zajišťují kroužky. Tyto soustavy se začaly používat místo derivačních dynam v době průmyslového nasazení výkonových polovodičů. Jsou určeny především pro generátory v paralelním provozu v distribuční síti. [6] Stejně jako dynamo s cizím buzením, statická budicí soustava musí mít alespoň pro rozběh generátoru nezávislý zdroj energie. Alternativou tyristoru je spínaný tranzistorový regulátor, který může být napájen z baterií, které jsou při provozu dobíjeny. Taková budicí soustava je vhodná pro práci v ostrovním režimu.



Obrázek 7 – Statická budicí soustava s tyristory [36]

3.3 Bezkartáčové budicí soustavy

Snahou bylo odstranit kroužkové sběrače a realizovat bezúdržbovou budicí soustavu. Variant, jak toto realizovat, je více. Všechny mají společné dva prvky. Kartáče byly nahrazeny bezkontaktním přenosem indukční cestou a na hřídeli je rotující usměrňovač k usměrnění indukovaného napětí. Patří do kategorie rotačních budičů.

3.3.3 Střídavý budič a rotující usměrňovač

Budičem je speciální generátor, principiálně synchronní generátor s vyniklými póly, ale stejnosměrné budicí vinutí na statoru a třífázové vinutí je umístěno v drážkách rotoru. [6] Při otáčení se do rotoru indukují střídavá napětí, ta jsou vedena na usměrňovač. Při nulových otáčkách nelze alternátor nabudit.

3.3.4 Soustava s protiběžným polem

Střídavý budič byl nahrazen, nyní je realizován jako asynchronní motor s vinutým rotorem, ten je opět připojen na usměrňovač. Stator je napájen třífázovým měničem. Vytvořené magnetické pole statorovým vinutím se otáčí proti směru otáčení rotoru. Proto soustava umožňuje nabudit generátor i v klidovém stavu.

3.3.5 Rotační transformátor a diodový usměrňovač

Jedná se o jednofázovou alternativu soustavy s protiběžným polem. Přenos výkonu zajišťuje transformátor. Primární vinutí je statické a sekundární rotuje společně s rotorem. Soustava je napájena ze střídavého měniče napětí. Nevýhodou je vzduchová mezera, která způsobuje relativně velký magnetizační proud. Konstrukční proveditelnost je pouze do 1500 ot/min. [6]

4 Stanovení požadavku regulátoru

4.1 Technické požadavky

Od generátoru v ostrovní síti požadujeme ideálně konstantní výstupní napětí nezávisle na zatížení, které nám plnohodnotně nahradí nedostupnost síťového napájení. Se změnou zátěže vždy nějaké kolísání nastane. Udržet napětí v požadovaných mezích je úkolem regulátoru. Dle ČSN EN 50160 ed.3 za normálních provozních podmínek odchylka napájecího napětí nemá přesáhnout $\pm 10\%$ jmenovitého napětí na všech napájecích svorkách. Při napětí sítě 230 V to je rozsah 207-253V, tuto toleranci musí splňovat i generátor. Kmitočet pro ostrovní napájecí systém je stanoven na toleranci $\pm 2\%$ během 95 % týdne a toleranci $\pm 15\%$ po 100 % času. To odpovídá rozsahu 42,5 – 57,5 Hz. [28] Splnění této podmínky musí zajistit otáčkový regulátor.

Regulátor tedy musí být schopný v reálném čase měřit zatížení generátoru a tomu přizpůsobit budicí proud. Omezení budicího proudu nebude implementováno, protože budicí proud je omezen odporem budicího vinutí alternátoru, aniž by došlo k jeho poškození.

Spolehlivost musí být co největší, použití co nejjednoduššího zapojení s minimem součástek ke spolehlivosti značně přispívá. Zároveň to snižuje cenu zařízení. Dlouhou životnost předurčují dostatečně dimenzované, kvalitní součástky.

4.2 Rychlost regulace a stabilita

Od generátoru požadujeme vysokou stabilitu, aby s konstantní zátěží napětí nekolísalo a přechodové děje byly rychle tlumeny. Přechodný děj úzce souvisí s konkrétním generátorem, s jeho magnetickou setrvačností. Současně má vliv i použitá budicí soustava. Časové konstanty generátoru nejsou předem známé, ale regulátor musí být univerzální a plnit funkci v každém zapojení. Parametry pro nastavení regulátoru jsou určeny hlavně k optimalizaci provozu.

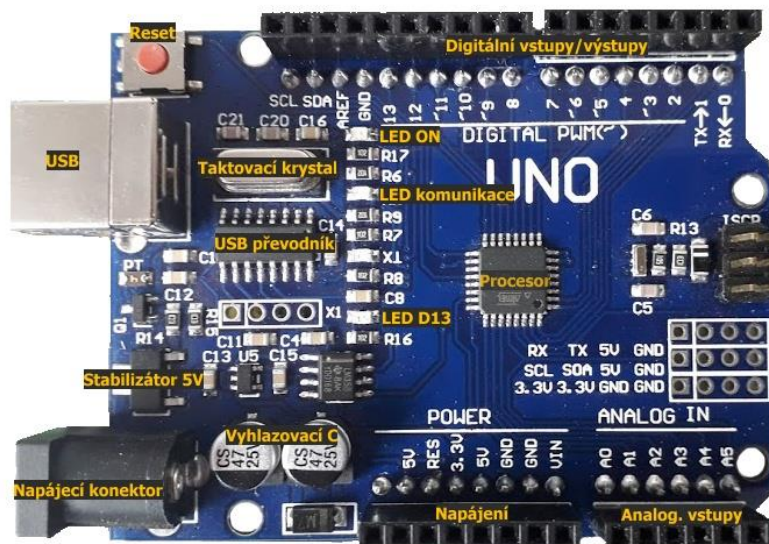
4.3 Výkonové požadavky

Veškeré výkonové požadavky jsou kladeny pouze na výkonový tranzistor a zpětnou diodu, předpokládejme jmenovitý budicí proud do 9 A a maximální napětí 200 V. Poměr budicího výkonu a jmenovitého výkonu generátorů bývají zpravidla maximálně jednotky procent. U generátoru popsaném v kapitole 9 to je přibližně 2,78 %, kde část výkonu budiče je určena pro zvýšení dynamiky soustavy. S touto úvahou, za předpokladu dobrého chlazení, tranzistor stačí na regulaci generátoru o výkonu přibližně 47 kVA při budicím napětí 110 V. U generátoru, který je buzen z derivačního dynama a je regulován budicí proud dynama, je potenciál budicího výkonu ještě větší.

5 Návrh hardwarové části

5.1 Řídicí deska

Celý proces regulace je řízen digitálně. Jako řídicí systém je zvolen jednodeskový počítač Arduino Uno, jedna z nejpoužívanějších desek. Hodí se na většinu základních aplikací, kde je třeba jednoduché, úsporné, spolehlivé a levné řízení. Základem desky je osmibitový procesor ATmega328P s desetibitovým A/D převodníkem pracujícím na napěťové úrovni 5 V (při zachování defaultní napěťové reference). Výhodou je integrovaný USB port, který umožňuje přímé připojení k počítači bez nutnosti programátoru a zároveň může být použit jako napájecí.



Obrázek 8 – Řídicí deska Arduino Uno R3 (klon)

Na plošném spoji jsou celkem 3 LED. První signalizuje přítomnost napájení, druhá přenos dat po sériové komunikaci a třetí je připojena na digitální výstup č. 13 a signalizuje aktuální stav výstupu.

Tabulka 2 – Přehled základních vlastností Arduino UNO

Mikrokontrolér	Počet I/O pin	Z toho PWM	Počet Analog. vstupů	Rozlišení	Taktovací Frekvence	USB rozhraní
ATmega328P	14	6	6	10 bit	16 MHz	ATmega8U2

5.2 Měření výstupního napětí

Jednou z hlavních funkcí regulátoru je s dostatečnou přesností měřit napětí, bez měření by nešlo o regulaci, ale pouze o řízení. Vstupní napětí bude buď konstantní (nulové), nebo měnící se v čase. Průběh napětí by měl odpovídat:

$$U = U_{max} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (7)$$

Kde: U_{max} – maximální hodnota napětí [V]

f – frekvence [Hz]

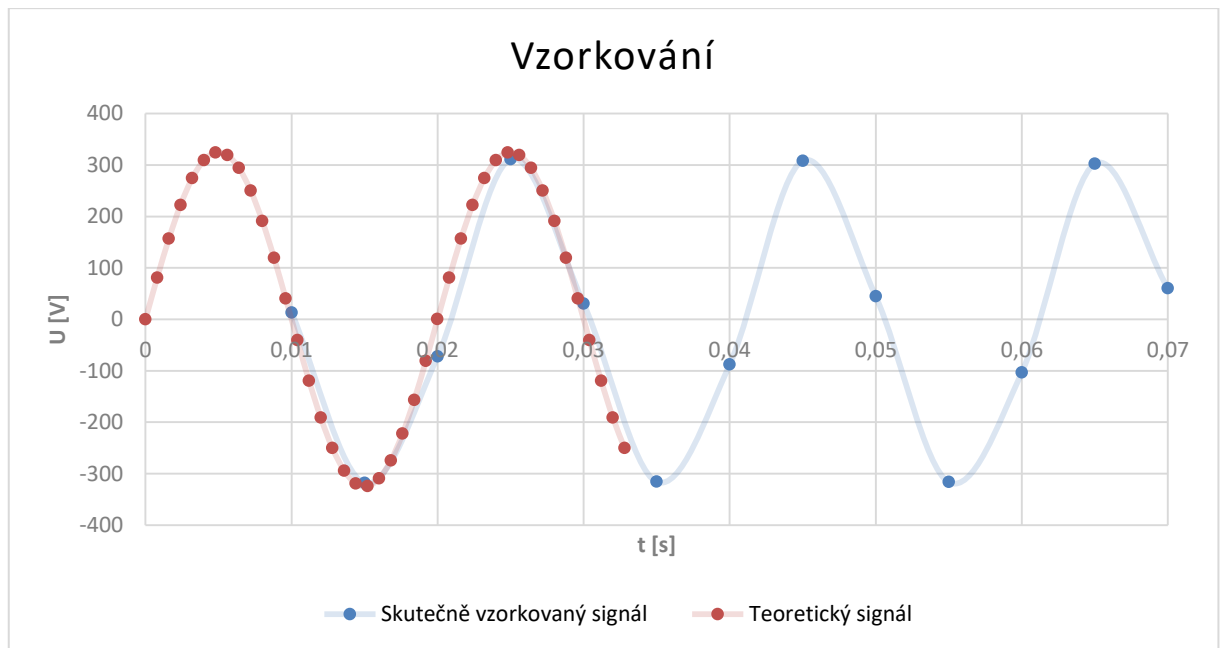
t – čas [s]

Ve skutečnosti je průběh napětí více či méně deformovaný magnetickým obvodem generátoru. U_{max} je proměnná závislá na aktuálním budícím proudu a i na zatížení generátoru. Frekvence by měla být konstantní, ale nelze očekávat bezchybnou otáčkovou regulaci, zvláště u alternátorů poháněných dieselovým motorem a mechanickým regulátorem otáček. Z těchto důvodů nelze průběh napětí přesně predikovat. Protože je napětí proměnné, musíme často a přesně měřit jeho aktuální velikost, tu převést do digitální podoby pomocí A/D převodníku a vypočítat skutečnou efektivní hodnotu.

5.2.1 Vzorkování

A/D převodník provádí proces, při kterém spojitý analogový signál převádíme na diskrétní digitální. První funkcí procesu je tzv. vzorkování. Vzorkování signálu spočívá v odečtení aktuální velikosti signálu v pevně stanovených intervalech. Nyní je signál diskrétní, ale stále „analogový“. Proto potřebujeme proces zvaný kvantování, při které se změřená hodnota přiřadí k nejbližší digitální hodnotě, v našem případě k číslu 0 – 1024 v desítkové soustavě.

Vzorkování a A/D převod zobrazuje následující *Graf 1*. Oranžový průběh zobrazuje ideální vypočítanou sinusoidu pro napětí 230 V / 50 Hz. Modrá křivka zobrazuje skutečně změřený průběh napětí sítě, přepočítaný, aby odpovídal měřítkem.



Graf 1 – Vzorkovaný signál

Napětí je měřeno pomocí Arduina, transformátoru a výpisu sériové komunikace, podrobněji je vše popsáno v následujících kapitolách. Vzorků je výrazně méně, protože vše zpomaluje komunikace a odesílání vzorků v reálném čase. Faktorů zvyšující nepřesnost je více (deformace sítě, odchylky oproti předpokládaným hodnotám, nelinearita transformátoru, šum, nepřesné časování, nelinearita A/D převodníku, tolerance součástek, nízká přenosová rychlost dat, kvantování), přesto si jsou křivky podobné.

Minimální vzorkovací frekvenci určuje Nyquistův-Shannonův teorém (8), který říká, že „přesná rekonstrukce spojitého, frekvenčně omezeného signálu z jeho vzorků je možná tehdy, pokud byla vzorkovací frekvence vyšší než dvojnásobek nejvyšší harmonické složky vzorkovaného signálu.“ [14] Vhodné je použití filtru typu dolní propust, který nám nechtěné vyšší harmonické složky omezí.

$$f_v < 2f_{max} \quad (8)$$

Kde: f_v – frekvence vzorkování [Hz]

f_{max} – maximální frekvence měřeného signálu [Hz]

Pro síťovou frekvenci 50 Hz teoreticky musíme signál vzorkovat s frekvencí větší než 100 Hz. Frekvence modrého průběhu na *grafu 1* je vzorkována s frekvencí 200 Hz, a i to vypadá hraničně.

5.2.2 Citlivost převodníku

V souladu s kapitolou 4.1 lze očekávat, že maximální okamžitá hodnota napětí se bude pohybovat v rozsahu:

$$U_{in\ max} = (U_{sit} + 10\%) \cdot \sqrt{2} = (\pm 230 \cdot 1,1) \cdot \sqrt{2} \cong \pm 358\ V \quad (9)$$

Kde: $U_{in\ max}$ – vstupní měřené napětí [V]

U_{sit} – standardní efektivní hodnota síťového napětí [V]

A/D převodník v Arduinu umí zpracovat pouze kladné hodnoty, proto je měřené napětí posunuto o 2,5 V, aby byl celý průběh v kladných číslech, bez použití usměrňovače. Nulovému měřenému napětí odpovídá hodnota 512. Při prvním testování hodnota kolísala ± 2 vlivem šumu, po doplnění kondenzátoru k referenčnímu napětí a použití lepšího spínaného zdroje pro napájení se hodnota stabilizovala.

Citlivost změny měřeného napětí na bit:

$$U_{cit} = \frac{U_{in\ max}/2^n}{2} = \frac{358/2^{10}}{2} = 0,7\ V \quad (10)$$

Kde: $U_{in\ max}$ – vstupní měřené napětí [V]

U_{cit} – napěťová citlivost [V]

Citlivost regulátoru v procentech:

$$\frac{U_{cit}}{U \cdot \sqrt{2}} * 100 = \frac{0,7}{325} * 100 = 0,26\ \% \quad (11)$$

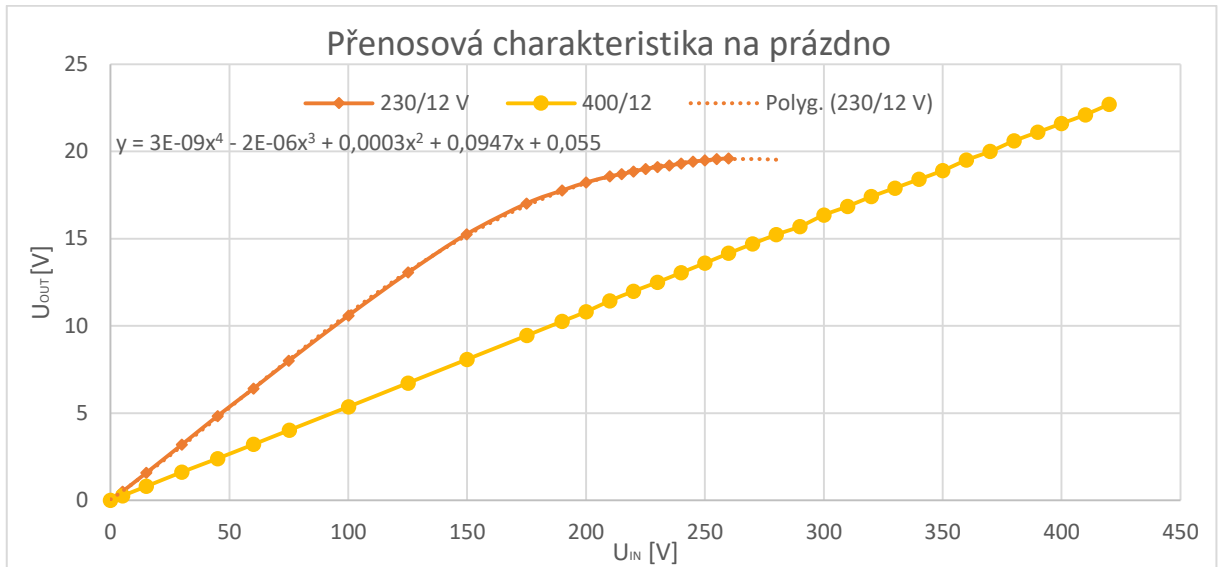
Kde: U – jmenovitá hodnota napětí [V]

Citlivost regulátoru na změnu výstupního napětí je 0,26 %, což je více než dostatečné a odpovídá to hodnotě, se kterou regulátory běžně pracují. Starší mechanické varianty nejběžněji pracují s citlivostí 0,5 – 3%. [4]

5.2.3 Měřicí transformátor

Je zřejmé, že měřené napětí musíme snížit na rozsah odpovídající rozsahu analog. vstupu. Pro tento účel je použit transformátor a napěťový dělič, který lze považovat za nezátížený. První návrh byly použity transformátory (230/12 V při 0,25 VA.), které neměly využití. Pro určení vhodnosti je změřena závislost vstupního napětí na výstupním. Výsledek měření je vykreslen do *grafu 2* (oranžová). Nad 150 V na primární straně začíná být průběh nelineární a při 250 V, které lze dle kapitoly 4.1 považovat za akceptovatelné, se růst napětí na

sekundární straně téměř zastavil. Tento děj nastává vlivem přesycení magnetického obvodu jádra. Jeho přenosovou charakteristiku poměrně přesně vystihuje polynom čtvrtého řádu, jehož rovnice je uvedena v grafu.



Graf 2 – Přenosová charakteristika transformátoru na prázdko

Pro přesnost měření je nutné pracovat na lineární části charakteristiky, proto jsou použity transformátory 400/12 V, kde k přesycení nedojde. Zajímavostí je, že průběh je lineární v celém rozsahu změřených hodnot. To přisuzujeme výrazně vyšší kvalitě transformátoru 400/12 V. Jeho napětí na prázdko je 21,5 V při jmenovitém napětí, nás zajímá hodnota při provozovaném napětí 230 V a to je 12,5 V na prázdko. Vlivem úbytku se sekundární napětí se zátěží snižuje, a potom neodpovídá transformačnímu poměru na prázdko.

Transformační poměr vypočteme z rovnice ideálního transformátoru: [7]

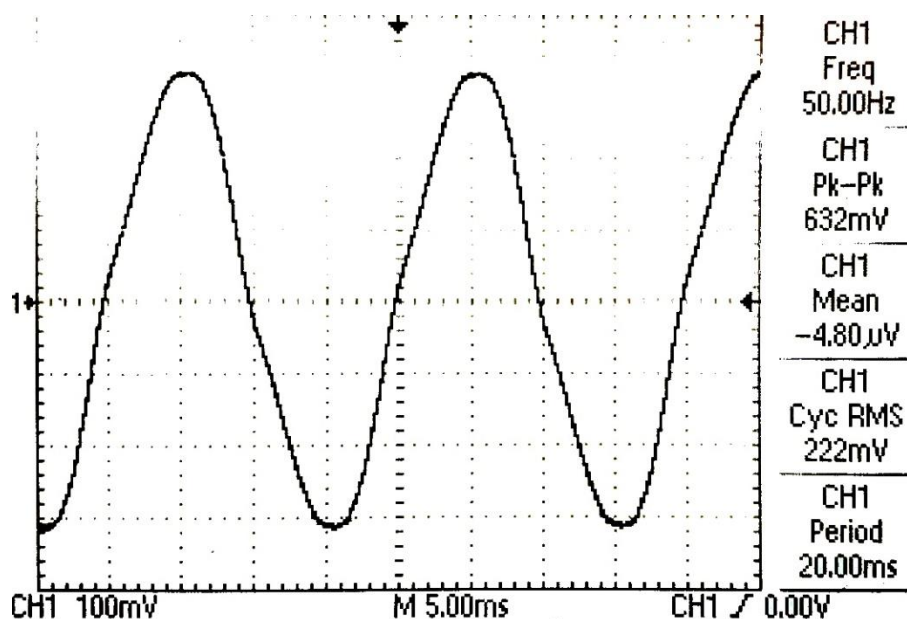
$$k = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{12,5}{230} \cong 0,0544 \quad (12)$$

Kde: N, I, U – počet závitů, proud, napětí [-, A, V]

Index 1 – primární strana transformátoru

Index 2 – sekundární strana transformátoru

Na následujícím obrázku je osciloskopem měřen průběh napětí na sekundární straně měřicího transformátoru. Na primární stranu je připojeno záměrně napětí 400 V, aby byla patrná deformace měřeného sinusového průběhu. Převod napěťové sondy je 1:100.



Obrázek 9 – Deformace sinusovky transformátorem při 400 V

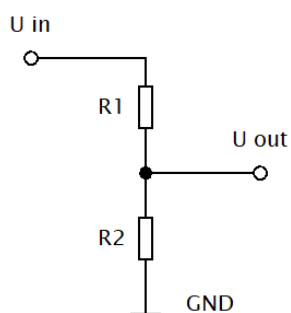
Tento jev je způsoben indukčností transformátoru, jak se magnetický obvod „brání“ změně. Při sníženém napětí (provozním) 230 V již není tak výrazný.

5.2.4 Výpočet děliče

Dalším krokem je výpočet děliče napětí dle rovnice (13).

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (13)$$

Kde: Význam veličin je patrný z Obrázek 10



Obrázek 10 – Napěťový dělič

Maximální vstupní napětí do napěťového děliče:

$$U_{in} = k \cdot U_{in\ max} = 0,0544 \cdot 358 \cong 19,5\ V \quad (14)$$

Požadované výstupní napětí U_{out} je 2,5V

V rovnici (13) zůstávají dvě neznámé, znám je pouze poměr obou rezistorů:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{U_{out}}{U_{in} - U_{out}} = \frac{2,5}{19,5 - 2,5} = 6,8 \quad (15)$$

proto hodnotu R_2 stanovíme na 7,5 k Ω . Tato hodnota je zvolena tak, aby druhý rezistor vyšel s minimálním zaokrouhlením, výpočet byl udělán vícekrát.

$$R_1 = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_2 = 6,8 \cdot 7\,500 = 51\,000 = 51\,k\Omega \quad (16)$$

Pro kontrolu hodnoty dosadíme do rovnice (13).

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 19,5 \cdot \frac{7\,500}{7\,500 + 51\,000} = 2,5\,V \quad (17)$$

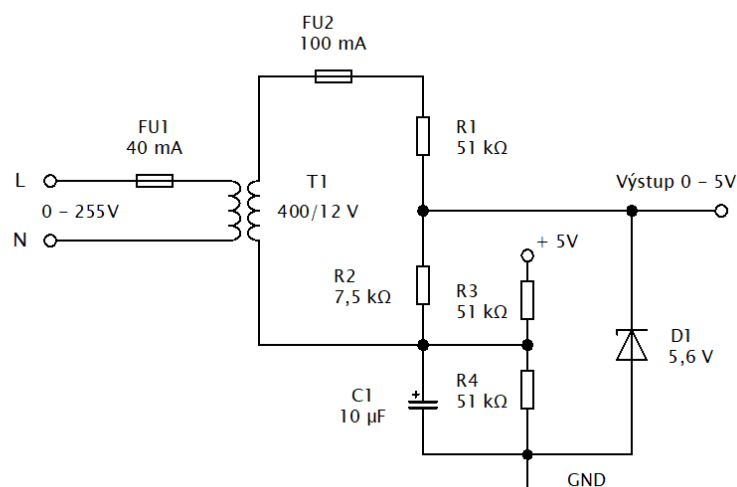
Ustálený proud děličem:

$$I_0 = \frac{U_{in}}{R_1 + R_2} = \frac{12,5}{7\,500 + 51\,000} = 2,14 \cdot 10^{-4}\,A \quad (18)$$

Kde: I_0 – proud děličem [A]

5.2.5 Zapojení

Schéma finálního zapojení je nakresleno na *obrázku 11* v korespondenci s celým oddílem 5.2. Vstup měřicího obvodu začíná jištěním a následně transformaci na nižší napětí. Přesné rozdělení na rozsah $\pm 2,5V$ při maximálním vstupním napětí (aby byl využit celý rozsah A/D převodníku) zajistí dělič R_1, R_2 . Dělič R_3, R_4 rozděluje napětí +5V na poloviny. Toto napětí zajistí potřebný offset signálu, aby se pohyboval pouze v kladných hodnotách. Zenerova dioda D_1 slouží k ochraně vstupu arduina před přepětím, při velkém přepětí přeruší trubičkovou pojistku sekundární strany transformátoru.



Obrázek 11 – Zapojení měřicího obvodu

Měřicí obvod je navržen na měření střídavého napětí s efektivní hodnotou do 255 V. Nad touto hodnotou již dochází k seříznutí amplitudy, A/D převodník je již na maximální hodnotě. Zbytek průběhu je změřen správně. Vlivem seříznutí je změřená hodnota nižší oproti skutečné, tento vliv je však malý. Měřicí obvod byl testován a vyhodnocen jako funkční až do efektivní hodnoty 270 V.

Kritické napětí na vstupu, které otevře Zenerovu diodu:

$$U_{krit} = \frac{1}{k} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{5,6 \cdot 18,4 \cdot 7,8}{2 \cdot \sqrt{2}} \cong 285 \text{ V} \quad (19)$$

Kde: k – transformační poměr transformátoru [-]

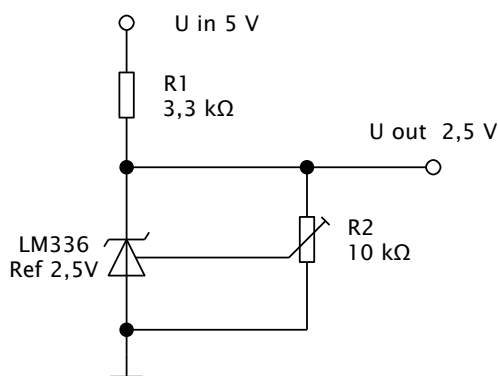
R – odporový dělič napětí [Ω]

5.3 Napěťová reference

Protože je požadavek na vysoký rozsah provozních teplot, je plošný spoj vybavený externí napěťovou referencí, která je zapojena na analogový vstup A3 a slouží k výpočtu korekční hodnoty, která omezí teplotní drift regulátoru.

Reference se pomocí víceotáčkového trimru nastaví přesně na hodnotu, která odpovídá polovině rozsahu A/D převodníku. Velikost napětí reference je určena poměrem odporů na trimru a nemá na něj vliv kolísání napájecího zdroje, proto ho lze považovat za konstantní. To je obrovská výhoda. Napětí na vstupu je měřeno proti + 5 V stabilizátoru Arduina, který má sice deklarovaný proud 1 A, ale bez zátěže dává něco přes 5,1 V a i po malém zatížení nezanedbatelně klesne a zároveň je ovlivněno velikostí vstupního napětí. Navíc vlivem tolerance je hodnota pro každou desku trochu jiná. V situaci, kdy napětí poklesne, vzniká chyba měření, protože vstupní napětí A/D převodníku je měřeno proti nižšímu napětí. Pro vyhlazení kolísání referenčního napětí je přidán kondenzátor 47 μF .

Skutečné a měřené napětí na referenci je použito k výpočtu korekční hodnoty, která sníží vliv vnějších poruchových veličin a zvýší přesnost měření.



Obrázek 12 – Zapojení napěťové reference

Pro nastavení reference potřebujeme vytvořit napěťový dělič. Při použití běžných jednocentních rezistorů dojde k rozvážení a reference nemá požadovanou hodnotu. Víceotáčkový trimr je jediná možnost, jak docílit přesného vyvážení mezi děličem. Tento trimr v sobě nese současně výhodu a riziko. Jde o jedinou možnost, jak bez úpravy softwaru zasáhnout do regulačního procesu a změnit výstupní napětí generátoru, pokud to vnější podmínky budou z nějakého důvodu vyžadovat. Zároveň umožňuje pohyb v celém rozsahu, a proto vzniká riziko špatného nastavení. Napětí generátoru by bylo mimo správnou provozní hodnotu a regulátor by to považoval za dobré. Tento stav je ošetřen softwarově. Maximální vliv korekční hodnoty napěťové reference je 5%, pokud by byl požadavek korekce větší, bude vyřazena z funkce a bude signalizován stav poruchy externí napěťové reference digitálním výstupem 5.

5.4 Regulace budicího proudu

K řízení budicího proudu potřebujeme výkonový prvek, který zajistí rychlé spínání obvodu. Budicí proud je stejnosměrný, proto je nejlepší volbou tranzistor. Vybírat můžeme mezi technologiemi MOSFET a IGBT. Oba typy tranzistorů mají izolovanou řídicí elektrodu, vlastnostmi se liší.

Pro nízké napětí má MOSFET i nízký odpor vodivého kanálu v otevřeném stavu. Proto je jednoznačnou volbou. Úbytek napětí na tranzistoru je přímo úměrný protékajícímu proudu.

Další výhodou MOSFET je, že nenastává jev doznívání proudu – velmi rychle se zavírají a nemají tak vysoké požadavky na budicí obvod. Součástí tranzistoru je také antiparalelně zapojená dioda.

5.4.1 MOS FET tranzistor

V oddílu 4.3 jsou si určeny výkonové požadavky na tranzistor, které jsou požadovány. Protože není vhodné pracovat na hranici jmenovitých hodnot součástky, zvláště při častém spínání, výkonové součástky jsou naddimenzovány.

Přímo k Arduinu lze koupit rozšiřující destičku s výkonovým tranzistorem IFR520. Kromě tranzistoru modul obsahuje pouze dva rezistory a svítivou diodu (neobsahuje žádnou ochranu). Tranzistor má jmenovitý proud 9,2 A, při řídicím napětí 10 V. Při řídicím napětí 5 V tranzistor není plně otevřen a větší výkon přemění na teplo. Doporučený proud výrobcem je do 5 A při doplnění chladičem. Tento modul nesplňuje žádný ze stanovených požadavků, proto se započala výroba vlastního koncového stupně.

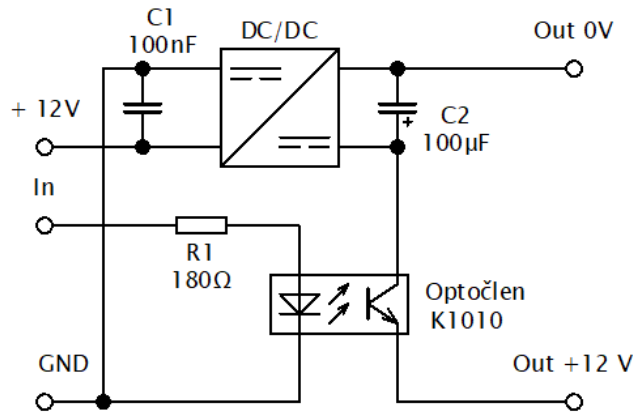
Pro jednoduchost zapojení byl nejdříve vybírán tranzistor s označením Logic-Level Gate Driver. Toto označení znamená, že k jeho otevření stačí pouze 5 V a je vhodný k přímému řízení procesorem. Vhodným tranzistorem je například IRL640. Jeho pracovní proud je až 17 A. Další důležité parametry jsou na následujícím výstřižku z datasheetu výrobce.

Tabulka 3 – IRL640 datasheet

PRODUCT SUMMARY		
V_{DS} (V)	200	
$R_{DS(on)}$ (Ω)	$V_{GS} = 5.0$ V	0.18
Q_g (Max.) (nC)	66	

5.4.2 Galvanické oddělení

Nevýhodou výše uvedeného zapojení je, že jediné oddělení mezi řídicí a výkonovou částí je tenká vrstva oxidu křemičitého na hradle tranzistoru. V případě proražení tranzistoru by se do řídicí elektroniky dostalo plné napětí budicí soustavy a došlo by k zničení Arduina. Řešením je galvanické oddělení výkonového tranzistoru a řídicí elektroniky pomocí optočlenu. Jeho izolační pevnost je 5 kV. Samozřejmostí je i galvanicky oddělený zdroj řídicího napětí.

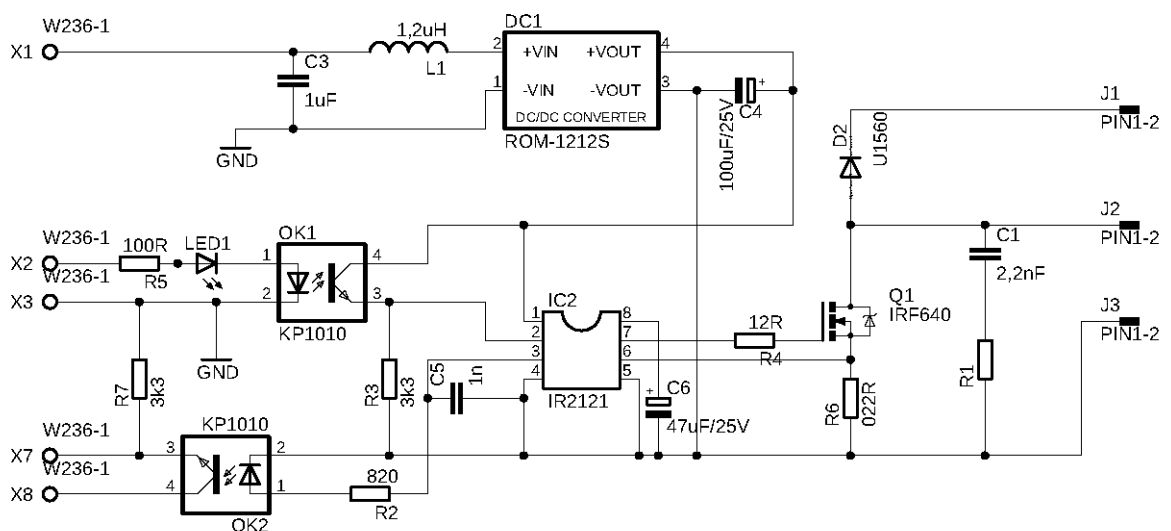


Obrázek 13 – Galvanické oddělení výstupu

5.4.3 Budič

Protože bylo rozhodnuto, že galvanické oddělení silové a řídicí části je nutné, není třeba trvat na tranzistoru LLG FET. Mezi běžnými tranzistory na řídicí napětí 10 V je větší výběr a dostupnost. Proto je použit IRF640. Jeho parametry jsou velice podobné s tranzistorem IRL640. Hlavním rozdílem je řídicí napětí V_{GS} . Pro zajištění kvalitního budicího signálu je použit integrovaný budicí obvod IR2121, který je zapojen mezi optočlen a řídicí elektrodu tranzistoru.

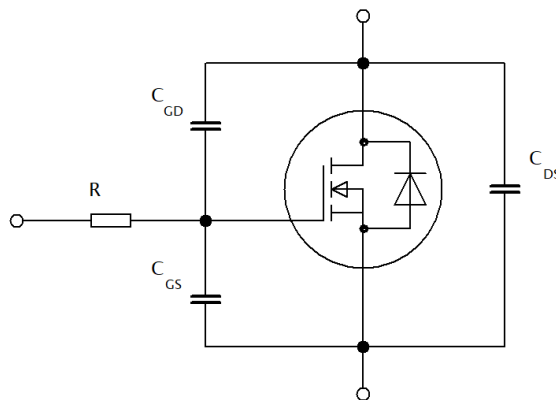
Druhou výhodou budiče je, že měří úbytek napětí na rezistoru v sérii s tranzistorem. Velikost úbytku je závislá na velikosti budicího proudu. Tímto způsobem je detekován nadproud, ten vypne řídicí pulzy a tím ochrání tranzistor. Zpětné hlášení o nadproudu je opět galvanicky odděleno optočlenem.



Obrázek 14 – Zapojení tranzistoru

Dioda D2 slouží k odstranění napěťových špiček vyvolané indukčností budicího vinutí. Velikost proudu uzavírajícího se přes diodu závisí na energii akumulované v indukčnosti vinutí. Protože přesnou indukčnost neznáme, je dioda naddimenzována. Použitá dioda U1560 je v pouzdře TO220 se samostatným chladičem a jmenovitým proudem 15 A.

LED dioda signalizuje velikost požadavku budicího proudu, s rostoucí střídou PWM výstupu roste její jas. Cívka L1 a kondenzátor C3 je doplněn jako EMC filtr, jeho přítomnost není nutná. RC článek omezuje strmost du/dt , aby odlehčil tranzistoru při spínání a rozpínání. Každý MOSFET tranzistor obsahuje parazitní kapacity, které nelze zanedbat. Tyto kapacity ovlivňují kvalitu přechodných dějů, navíc jsou závislé na okolních podmínkách.



Obrázek 15 – Znázornění parazitních kapacit na tranzistoru

Tabulka 4 – Význam kapacit

Název	Označení	Definice	IRF640 [29]
Kapacita hradla	C_{iss}	$= C_{GD} + C_{GS}$	1300 pF
Kapacita kanálu	C_{oss}	$= C_{GD} + C_{DS}$	430 pF
Millerova kapacita	C_{rss}	$= C_{GD}$	130 pF

Pro výpočet parametrů součástek je tranzistor nahrazen RC článkem, kde C nahrazuje parazitní kapacity tranzistoru (C_{GD} , C_{GS}), a kde je proudová špička omezena rezistorem R1 na maximální velikost 1 A [30], která je pro budič snesitelná. Kapacita hradla je udávána při $U_{DS} = 25$ V. Závislost kapacity a napětí je udána v datasheetu tranzistoru.

$$R_1 = \frac{U_{in} - U_d}{I_{max}} = \frac{12 - 0,3}{1} = 11,7 \Omega \quad (20)$$

Kde: U_{in} – vstupní napětí budiče

U_d – úbytek napětí na budiči

Hodnota použitého rezistoru je $R_1 = 12 \Omega$.

Časová konstanta

$$\tau = R_1 \cdot C_{iss} = 12 \cdot 1,3 \cdot 10^{-9} = 1,56 \cdot 10^{-8} \text{ s} \quad (21)$$

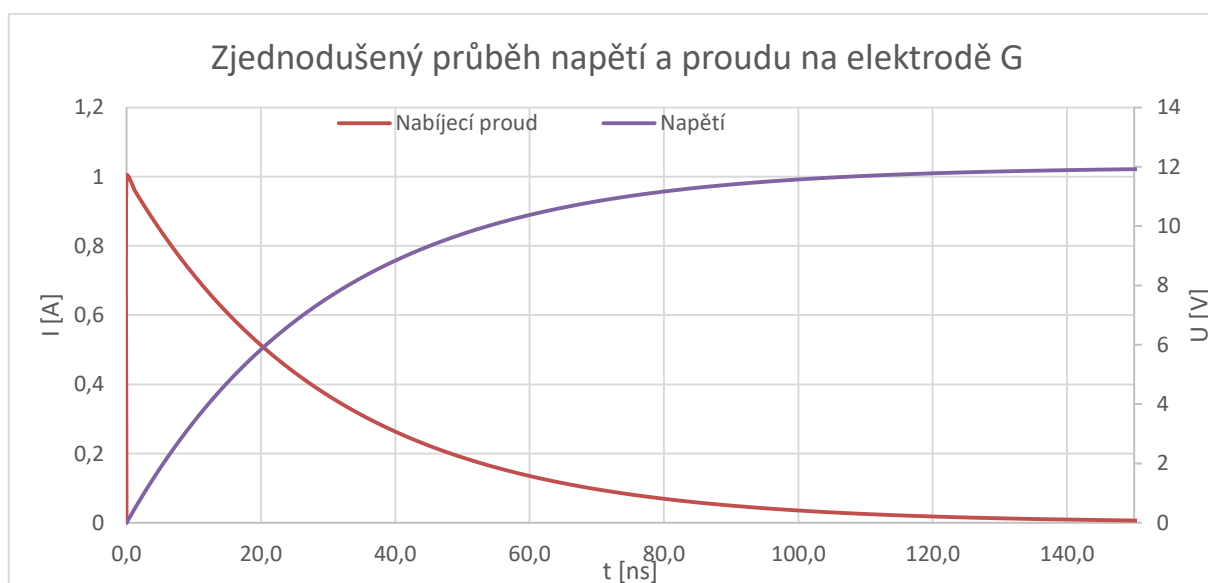
Kde: C_{iss} – je souhrnná kapacita vstupu

Okamžitá hodnota proudu RC

$$i = I_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (22)$$

Napětí na kapacitě RC článku

$$u_c = U \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (23)$$



Graf 3 – Buzení tranzistoru, výpočet dle rov. (22) a (23)

Dosažená kapacita přechodu je 2500 pF, pro $U_{DS} = 0 \text{ V}$.

5.4.4 PWM modulace

PWM (Pulse Width Modulation) je způsob, jak digitálním dvoustavovým výstupem vyjádřit velikost analogové hodnoty. Ta je reprezentována střídou. Jednu periodu, která je fixně daná spínací frekvencí (ta musí být konstantní), lze rozdělit na část, kdy je výstup ve stavu logické jedničky a logické nuly. Přechod mezi nulou a jedničkou a zpět je pulzem. Potom:

$$D = \frac{\tau}{T} \quad (24)$$

Kde: D – střída [-]

τ – délka pulzu [s]

T – délka periody [s]

K využití PWM modulace digitálního vstupu stačí zavolat funkci `analogWrite()`, do které předáme hodnotu v rozsahu 0-255. K dispozici tedy máme 256 hodnot, kterými určujeme střidu výstupu v rozsahu 0-100 %. Standardní spínací frekvence je 490 Hz, kterou nelze měnit. Ovšem výstupy PWM na pinech č. 5 a 6 jsou spínány s frekvencí 980 Hz. Důvodem je, že jsou připojeny na jiný interní časovač. Nevýhodou je, že tento časovač je sdílen s funkcemi `delay()` a `millis()`. Kvůli vzájemné interakci se může stát, že skutečná střída výstupu bude vyšší než nastavená. Může se to projevit například při velmi nízké až nulové střídě. Druhou možností, jak zvýšit spínací frekvenci, je naprogramovat si vlastní funkci pro zápis, místo `analogWrite()`.

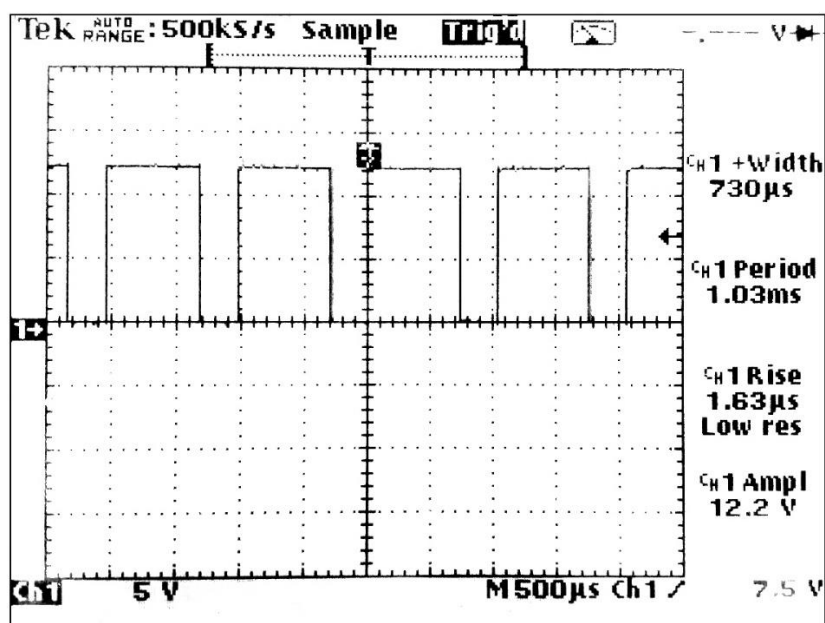
Minimální střída je:

$$D_{min} = \frac{1}{256} \cdot 100 = 0,39 \% \quad (25)$$

Kde: D_{min} – je minimální střída [%]

Podmínkou funkce pro spuštění PWM je odblokování regulace přepnutím přepínače umístěného vedle řídicí desky. Tím je zajištěna možnost vypnutí automatické regulace.

Fyzicky změřený průběh PWM je uveden na následujícím obrázku.

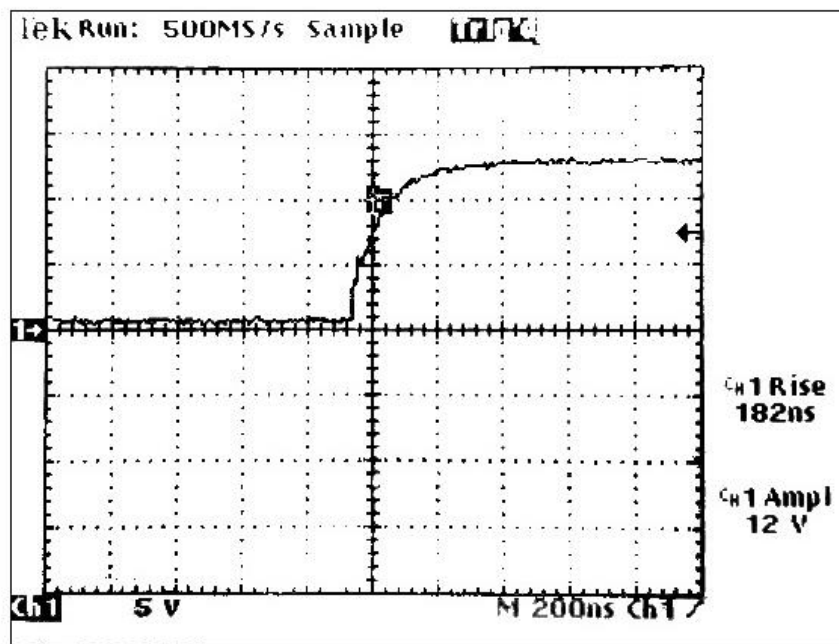


Obrázek 16 – Napětí na řídicí elektrodě G

Průběh napětí na řídicí elektrodě Gate spínacího tranzistoru byl měřen přenosným osciloskopem Tektronix THS720P, zapojení je sestaveno dle schématu uvedeném na obrázku 14.

Aktuální střída je přibližně 70 %. Perioda koresponduje s výše zmíněnou spínací frekvencí. Doba náběžné hrany je změřena velmi nepřesně, pro hodnotu odpovídající skutečnosti je třeba roztáhnout časovou osu. Skutečný průběh je vykreslen na *obrázku 17*.

Zde již je dobře vidět omezená strmost napětí a náběžný čas 182 ns. Jeden dílek časové osy je dlouhý 200 ns. Hlavním důvodem delšího času nabíjení kapacity, než bylo spočítáno, je použití vypočítaného rezistoru bez zohlednění vlastního odporu řídicí elektrody, proto je nižší nabíjecí proud.



Obrázek 17 – Náběžná napěťová hrana

5.4.5 Ztrátový výkon

Na tranzistoru vznikají ztráty způsobené vodivostí kanálu při sepnutém stavu, rozepnutém stavu a ztráty při spínání a vypínání. Do těchto ztrát patří i nabíjení parazitních kapacit a ztrátový výkon na antiparalelní diodě.

Vliv většiny z nich je malý a proto se většinou nepočítají. Zpravidla nezanedbatelnou složku tvoří ztráty spínací. Důvod je zřejmý. Při zavřeném stavu je na tranzistoru plné napětí, ale neteče téměř žádný proud. Při otevřeném stavu je proud značný, ale naopak malý úbytek napětí. Během přepínání stavu jsou obě veličiny nezanedbatelné a jejich součin je významný.

Přibližně lze spínací ztráty vypočítat dle následující rovnice:

$$P_{sw} \leq \frac{1}{2} \cdot f \cdot U_d \cdot I_z \cdot (t_{on} + t_{off}) \quad (26)$$

Kde: f – spínací frekvence [Hz]

U_d – spínané napětí [U]

I_z – spínaný proud [A]

$t_{on} + t_{off}$ – doba přechodného děje [s]

Dosazení do rovnice:

$$P_{sw} \leq \frac{1}{2} \cdot 980 \cdot 110 \cdot 8 \cdot ((150) \cdot 10^{-9}) = 0,07 \text{ W} \quad (27)$$

Vlivem „nízké“ spínací frekvence a opravdu rychlému přechodnému ději, který je o pět řádů nižší než spínací frekvence, jsou spínací ztráty nepodstatné. Proto jsou vypočteny i ztráty v sepnutém stavu. Jednou z vlastností vodivého kanálu je, že má odporový charakter a úbytek napětí je úměrný protékajícímu proudu. Proto:

$$P_{on} = I_z^2 \cdot R_{on} \cdot D = 8^2 \cdot 0,18 \cdot 0,5 = 5,76 \text{ W} \quad (28)$$

Kde: D – střída [-]

Důležitou vlastností MOSFET tranzistoru je kladný teplotní koeficient, s rostoucí teplotou roste odpor vodivého kanálu. Při teplotě 90 °C bude R_{on} přibližně 1,5 x větší.

$$P_Z = P_{on} \cdot TRC + P_{sw} = 5,76 \cdot 1,5 + 0,07 = 8,71 \text{ W} \quad (29)$$

Kde: P_Z – ztrátový výkon tranzistoru [W]

TRC – teplotní koeficient změny rezistivity [-]

Dosazený proud je maximální provozní uvažovaná hodnota, proto i pracovní teplota bude uvažována jako maximální. Výrobce stanovuje teplotu až na 150°C. Bylo rozhodnuto, že i při maximálním vytížení nesmí přesáhnout teplotu 115°C. Tepelný odpor mezi kanálem a pouzdrem tranzistoru je 1 K/W. [29] Tepelný odpor mezi chladičem a tranzistorem, při dobrém styku a použití tepelně vodivé pasty, se bude pohybovat mezi 0,005 – 0,1 K/W. [20]

S tepelnými odpory můžeme počítat stejně jako s rezistory. Potom rozdíl teplot bude rozdílem potenciálů a ztrátový výkon bude nahrazovat proud. Jedinou neznámou je tepelný odpor chladiče, který nesmí být větší než: (Aby příliš neomezoval tok ztrátového výkonu.)

$$R_{thH} = \frac{\Delta t - P_Z \cdot (R_{thJC} + R_{thCh})}{P_Z} = \frac{90 - 8,71 \cdot 1,01}{8,71} \cong 9,3 \text{ K/W} \quad (30)$$

Kde: R_{thJC} – tepelný odpor mezi kanálem a pouzdrem tranzistoru

R_{thCh} – tepelný odpor mezi tranzistorem a chladičem

Δt – rozdíl teplot mezi kanálem tranzistoru a vzduchem

5.5 Napájení regulátoru

Nejjednodušší variantou je napájení elektroniky ze startovací olověné baterie diesellového motoru (tedy ze zdroje SS napětí), který dodává mechanickou energii. Nevýhodou je, že by baterie musela být připojena trvale, takto je třeba pouze pro start. Použití samostatných baterií pro regulaci by vedlo ke snížení spolehlivosti, protože vybité baterie by způsobily odbuzení rotoru.

V případě zapojení, kde je regulátor napájen z indukovaného napětí alternátoru, vzniká problém s rozběhem regulace. V případě, že generátor není nabuzen, výstupní napětí je vlivem remanentního magnetismu v řádech voltů. Tzn., že nemáme dostatečné napětí pro řídicí MCU a výstupní tranzistor zůstane zavřený. Jedním z možných řešení, jak tuto situaci vyřešit, je použití tlačítka pro ruční buzení, které se v minulosti používalo. Toto řešení bylo z praktických důvodů zamítnuto.

Arduino Uno potřebuje pro funkci napětí v rozsahu 6-15 VDC, to je zajištěno DC/DC měničem, jehož vstupní napětí musí být v rozsahu, které odpovídá dvou olověným bateriím zapojených do série. Zároveň je na desce Arduino napájecí konektor pro napájení, které by bylo napájeno z výstupu alternátoru a převzalo by funkci napájení po odpojení baterie. Napětí na požadované úrovni by zajistil externí standardní spínaný zdroj 230/12 V, ty jsou schopny pracovat s napětím od 85 V.

5.5.1 Stanovení rozsahu napájení

Jmenovité napětí regulátoru je 24V, ale zvláště při napájení z baterie je třeba počítat s kolísáním napětí.

$$U_{min} = n \cdot U_{c min} = 12 \cdot 1,75 = 21 V \quad (31)$$

$$U_{max} = n \cdot U_{nab} = 12 \cdot 2,4 = 28,8 V \quad (32)$$

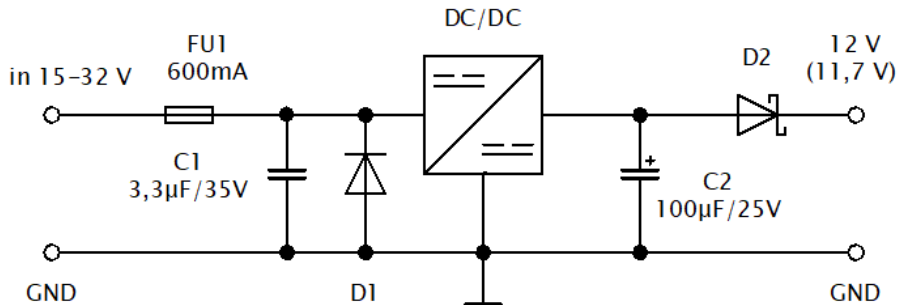
Kde: $U_{c min}$ – minimální provozní napětí jednoho článku [V]

n – počet článků [-]

U_{nab} – nabíjecí napětí jednoho článku [V]

5.5.2 Zapojení

Pro napájení regulátoru byl zvolen DC/DC zdroj R78-12 v následujícím zapojení. Je schopen dodat až 0,5 A. Arduino postačuje pouhých 50 mA, dalších maximálně 100 mA je potřeba pro vstupy/výstupy Arduino. Výkon napájecího zdroje je proto dostatečný.

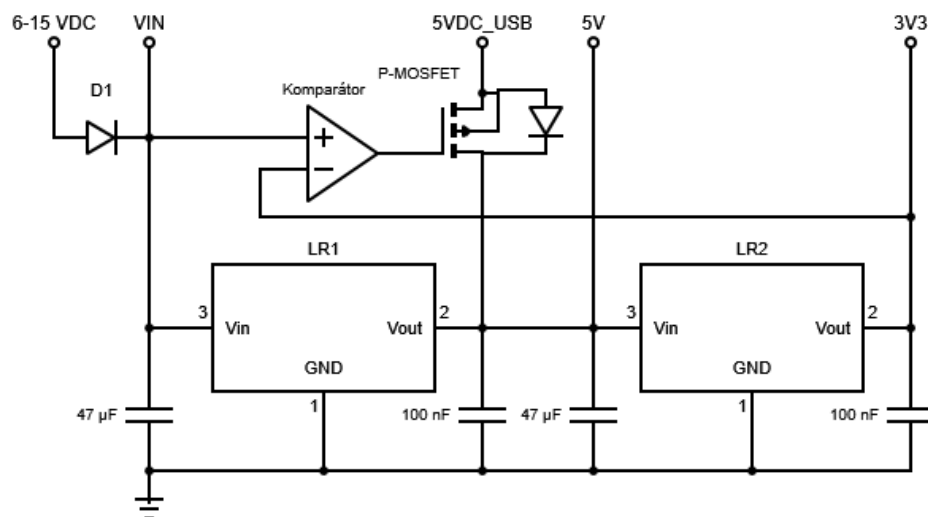


Obrázek 18 – Zapojení napájecího zdroje

Dioda D1 slouží jako ochrana proti přepolování. Kondenzátory jsou vyhlazovací. Schottkyho dioda D2 zajišťuje směr toku proudu, a zároveň se jedná o doporučení výrobce.

Na následujícím obrázku je schéma vnitřního zapojení napájení desky Arduino. Výstupní napětí 5 V a 3,3 V zajišťují dva napěťové stabilizátory. Při zapojení USB konektoru operační zesilovač zajistí otevření MOSFET tranzistoru a Arduino bude fungovat pouze na 5 V z USB. V případě připojení napájecího napětí dojde k zavření tranzistoru a 5 V bude dodávat stabilizátor a potenciál na obou stranách MOSFET tranzistoru bude přibližně stejný.

Svorka označená V_{IN} je řadová, V_{DC} je napájení pomocí sousého konekturu.

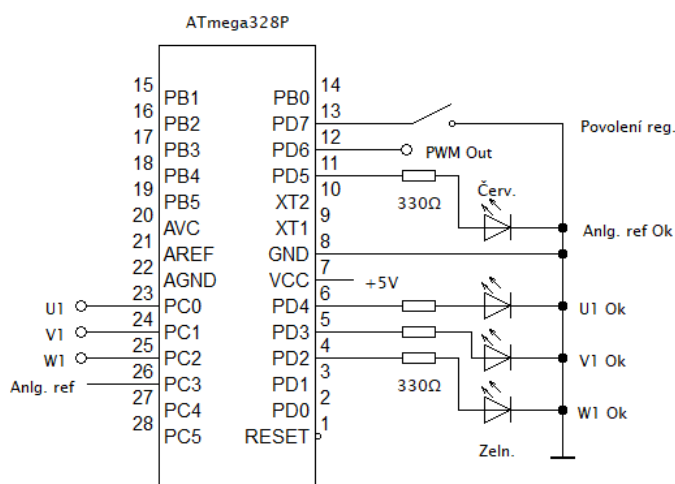


Obrázek 19 – Obvod napájení Arduino Uno [10]

5.6 Vstupy a výstupy

Zapojení analogových vstupů je zřejmé z předcházejících oddílů.

Digitální vstup je použit jeden, na ten je připojen přepínač. Poloha přepínače povoluje automatickou regulaci. Pokud bude kontakt rozepnut, výstup řízený PWM bude vždy nulový. Vstup spíná k nule. Důvodem je použití interního pull-up rezistoru procesoru. Rezistor je softwarově povolen a zajistí připojení vstupu k napětí +5 V přes rezistor 10 k Ω . V klidovém stavu je vstup v logické 1 a do nuly se dostane při uzemnění. (Veškerý úbytek napětí bude na rezistoru). Důvodem tohoto řešení spínače je, že logický vstup nemůže zůstat nezapojen. Elektromagnetická indukce je natolik velká, že napětí vstupu kolísá mezi jedničkou a nulou. Druhou možností, jak tento stav ošetřit, je použití pull-down rezistoru, který v procesoru ATmega328P není vestavěný a musel by se použít externí. Ten by zajistil přizemnění vstupu.



Obrázek 20 – Vstupy a výstupy

Na čtyři digitální výstupy jsou zapojeny svítivé diody signalizující stav. První tři jsou zelené a svítí vždy, pokud je měřené napětí v požadovaném rozsahu. Každá signalizuje jednu fázi. Čtvrtá LED je červená a signalizuje poruchu externí reference.

5.7 Rozměry a vzhled

Pro jednoduchost a snadnou náhradu vadné části zařízení bylo zvoleno modulární rozmístění jednotlivých komponent, které budou umístěny na pozinkovaném montážním plechu do rozvaděče o standardní tloušťce 3 mm. Plech má montážní otvory rozmístěny shodně s regulátorem VR3. Vzájemné propojení modulů je provedeno pomocí pružinových Wago svorek řady 236. Pro připojení vstupů/výstupů je přes řadové Wago svorky řady 2002 na DIN liště. Výkres plechu je uveden v příloze.

6 Návrh softwarové části

V této části práce je dopodrobna popsán způsob řízení, řídicí algoritmus a jeho dílčí principy. Kompletní zdrojový kód včetně komentářů je jako příloha DP na CD.

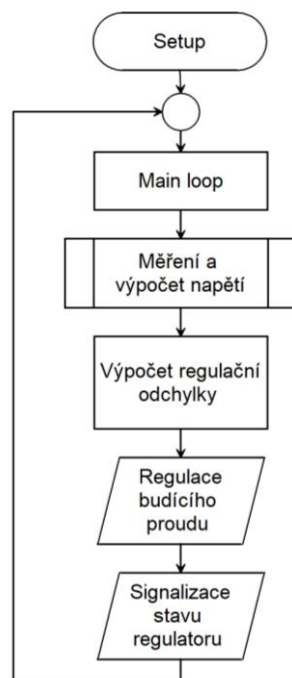
6.1 Arduino IDE

Pro tvorbu softwaru a kompilaci je použito originální rozhraní Arduino IDE, jedná se o jednoduché rozhraní, které obsahuje pouze základní funkce.

Programovacím jazykem je wiring, který je nejčastěji využíván právě programem Arduino IDE. Jazyk vychází ze struktury jazyka C++. Jeho cílem je jednoduchost, aby byl vhodný i pro začátečníky. Pro pokročilejší uživatele a složitější programy je možné zapisovat kód v C++ přímo do wiringu, protože Arduino IDE používá překladač C++.

6.2 Programová smyčka

Program lze rozdělit na dvě programové části. První se jmenuje „Setup“. Jak napovídá název, tato část je určena pro nastavení, deklaraci globálních proměnných, knihoven a příkazy, které nechceme opakovat vícekrát. Tato část programu proběhne vždy jen jednou po spuštění procesoru. Následně probíhá pouze druhá část – „Main loop“. Zjednodušený diagram posloupnosti programu je uveden na následujícím obrázku.



Obrázek 21 – Zjednodušený vývojový diagram programu

Nejdříve jsou zjištěny aktuální stavy vstupů Arduina, soupis použitých vstupů, výstupů a jejich nastavení je uvedeno v tabulce 5. Každá vstupní fáze se měří samostatně. Ze změřených hodnot je vypočtena efektivní hodnota napětí, která je požadována za skutečnou. Porovnáním skutečné a požadované hodnoty dojde k určení regulační odchylky. Její velikost určuje střidu spínání výstupu, který je určen pro tranzistor regulující velikost proudu. Stav regulátoru je signalizován LED diodami a je odeslán zprávou po sériové lince. Podrobnosti jsou uvedeny v následujících oddílech.

Tabulka 5 – Použité piny a jejich nastavení

Označení na desce	PIN	Typ signálu	Nastavení	Název proměnné
A0	PC0	Analog	IN	U
A1	PC1	Analog	IN	V
A2	PC2	Analog	IN	W
A3	PC3	Analog	IN	Nap_Ref
2	PD2	Digital	OUT	LED1
3	PD3	Digital	OUT	LED2
4	PD4	Digital	OUT	LED3
5	PD5	Digital	OUT	LED4
6	PD6	PWM	OUT	MOSFET
7	PD7	Digital	IN_PULLUP	Povoleni_regulatoru
12	PB4	Digital	IN	Externi_err
13	PB5	Digital	OUT	Signal_LED

6.3 Funkce pro měření napětí

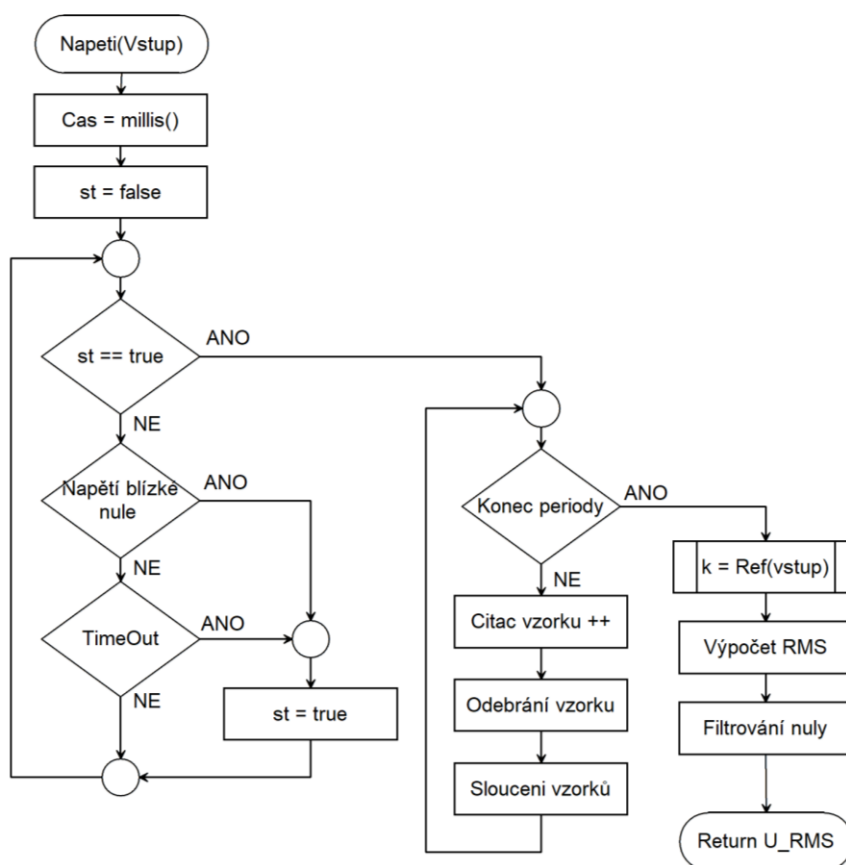
Jedním z nejdůležitějších kroků programu je správné určení vstupního napětí. Nejdříve bylo experimentováno s použitím knihoven, které jsou dostupné na internetu, tato varianta byla funkční, ale nebyla optimální. Zdrojový kód obsahoval velké množství nadbytečných bitů, zatěžoval procesor výpočty, které nebyly třeba, nešel jednoduše přizpůsobit potřebám. To vedlo k nižší rychlosti a přesnosti. Knihovna navíc není součástí složky se zdrojovým kódem, ale musí být instalována v Arduino IDE. Proto nemusí být program kompilovatelný na každém počítači.

Proto byla vytvořena funkce, která výše zmíněné nedostatky odstraňuje. Funkce se jmenuje „Napeti“. Při jejím volání ji předáváme jednu proměnnou, která říká, na jakém vstupu budeme měřit napětí. Funkce je velice přesná a rychlá.

Tabulka 6 – Funkce: double Napeti (unsigned int Vstup)

Název funkce	Napeti
Vstupní parametry	Analogový vstupní PIN
Vrací	U_RMS
Globální proměnné	Nepoužívá globální proměnné
Význam	Po dobu jedné periody vzorkuje vstupní signál, ze vzorků vypočítá efektivní hodnotu měřeného napětí a tu vrací

Její princip je zobrazen na vývojovém diagramu. (Obrázek 22) První cyklus „while“ čeká na vhodný začátek začátku měření. Pokud takový okamžik nenastane, vyprší časový limit. Druhá smyčka „while“ vzorkuje a ukládá změřené hodnoty, dokud není měření ukončeno. To se může opět stát i při překročení času.



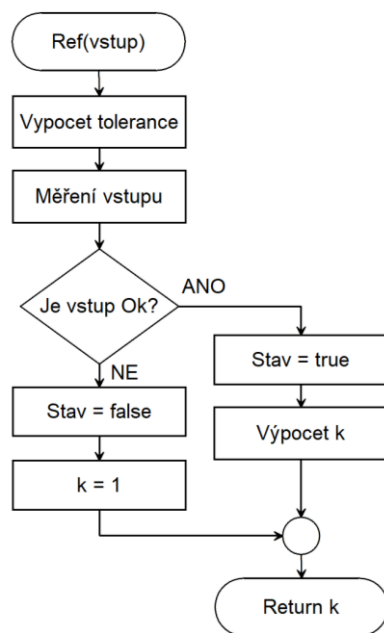
Obrázek 22 – Vývojový diagram funkce Napeti

Následuje výpočet U_{RMS} a filtrování nuly, aby nulové napětí bylo opravdu nulové. Před samotným výpočtem je volána funkce pojmenovaná „Ref“ jejím úkolem je zjištění aktuální korekční hodnoty získané z externí napěťové reference popsané v oddílu 5.3. Korekce je použita v součinu, v případě poruchy je výsledek 1 a reference nemá žádný vliv na měřené

napětí. Nejmenší rozlišení napět'ové reference je jeden bit A/D převodníku, tzn. přibližně 0,2 % vstupní hodnoty. Funkce Ref je popsána následující tabulkou a *obrázkem 23*.

Tabulka 7 – Funkce: double Ref (unsigned int Pin_vstup)

Název funkce	Ref
Vstupní parametry	Analogový vstupní PIN
Vrací	k
Globální proměnné	Stav_Ref
Význam	Přečte vstupní hodnotu, ověří její věrohodnost a dle změřeného napětí upraví korekční koeficient



Obrázek 23 – Vývojový diagram funkce Ref

Výpočet tolerance spočívá v určení intervalu, ve kterém se má nacházet vstupní napětí na referenčním vstupu.

6.3.1 Frekvence vzorkování

Jak již bylo uvedeno, taktovací frekvence procesoru je 16 MHz. Pokud tuto hodnotu vydělíme nastavením děličky pro A/D převodník, která je 128, získáme taktovací frekvenci A/D převodníku. Ta je rovna 125 kHz. Převodník potřebuje 13 taktů pro převod jedné hodnoty. Proto maximální vzorkovací frekvence při standardním nastavení je přibližně 9 600 vzorků/s. [16]

Pro frekvenci 50 Hz platí:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 20 \text{ ms} \quad (33)$$

Kde: T – perioda [s]

f – frekvence [Hz]

Maximální počet vzorků při standardním nastavení:

$$n = f_{vz} \cdot T = 9600 \cdot 0,02 = 192 \text{ vzorků} \quad (34)$$

Kde: n – počet vzorků za 20ms [-]

F_{vz} – frekvence vzorkování [Hz]

Skutečné množství odebraných vzorků se sníží, protože MCU buďto převádí hodnotu z převodníku, nebo vykonává programovou smyčku. Současně to lze provádět pouze v případě, že místo funkce `analogRead()` použijeme vlastní, tzv. Free Running mód, při kterém převodník převádí trvale. [21] Vzhledem k vlastnostem měřeného napětí to není třeba. Pokud bychom došli k závěru, že množství vzorků nestačí, pomocí bitů ADPS lze nastavení děličky snížit a dosáhnout vzorkovací frekvence až 77 kHz. Zvýšení taktovací frekvence A/D převodníku má bohužel za následek snížení rozlišení převodníku. [21]

Do zdrojového kódu byla přidána funkce `micros()`, která vrací počet mikrosekund a čítač vzorků. Tímto způsobem bylo zjištěno, že za jednu periodu je odebráno 156 vzorků. Tato hodnota je více než dostatečná.

6.3.2 Výpočet efektivní hodnoty napětí

Pro první verzi softwaru je použita klasická metoda stanovení efektivní hodnoty napětí. Tato metoda patří mezi metody v časové oblasti. Druhou možností jsou metody ve frekvenční oblasti, ale ty jsou výpočetně výrazně náročnější. Pro diskrétní systém platí následující vztah: [13]

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u^2(n)} \quad (35)$$

Kde: U_{RMS} – efektivní hodnota napětí [V]

$u(n)$ – vzorky vstupního napětí [V]

N – počet vzorků [-]

Způsob vzorkování má zásadní vliv na přesnost výpočtu efektivní hodnoty napětí. Rozlišujeme koherentní a nekoherentní vzorkování. Koherentně navzorkovaný signál je takový, který obsahuje pouze celé periody vzorkovaného signálu. [13] Nekoherentně navzorkovaný je např. i červený průběh na *Graf 1*, kterému chybí přibližně $\frac{1}{4} T$ do celé periody.

Pokud bude signál vzorkovaný koherentně, bude výsledná hodnota z rovnice (35) rovna skutečné efektivní hodnotě. V případě nekoherentního vzorkování bude vypočtená hodnota chybná v závislosti na velikosti na velikosti necelisticvého násobku periody λ . Pokud bude platit: $\lambda = \frac{1}{2} T$, bude chyba výpočtu efektivní hodnoty největší. Současně, čím je větší počet period vzorkovaného signálu, tím se chyba zmenšuje. Délka měření má zásadní vliv na délku cyklu. Minimální doba měření je jedna perioda, pro tři fáze při 50 Hz to je 60 ms a fázový posuv zapříčiní dalších $3 \times 6,67$ ms. Proto jedna smyčka programu trvá přibližně 80 ms, výpočty jsou prováděny v časech fázového posunu.

Relativní chybu vypočteme dle následujícího vztahu.

$$\delta_{RMS} = \frac{U'_{RMS} - U_{RMS}}{U_{RMS}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (36)$$

Kde: U_{RMS} – skutečná efektivní hodnota napětí [V]

U'_{RMS} – stanovená efektivní hodnota napětí [V]

Algoritmus měření napětí sleduje průběh napětí a vzorkování spustí až po průchodu signálu nulou ($U_{in} = 2,5V$) a na základě porovnání nového a předcházejícího vzorku sleduje průchody nulou. Podle počtu průchodů nulou (který musí být sudý) určujeme počet period. Tím je zajištěna podmínka přesnosti vztahu (35).

Maximální velikost mezi sousedními vzorky je vypočítaná pomocí tabulkového procesoru z největší difference funkce sinus vzorkované s frekvencí 7300 Hz a je vypočtena na 13 V.

Tolerance při průchodu nulou:

$$Tol = \frac{U'_{sin}}{U_{in} \cdot \sqrt{2}} / 2 = \left(\frac{13}{325 \cdot 2} \right) \cdot 100 = \pm 2 \% \quad (37)$$

Kde: U_{in} – vstupní napětí [V]

U'_{sin} – maximální difference vstupního napětí [V]

Větší snížení tolerance by vedlo k tomu, že při jmenovitém napětí nemusel být pokaždé rozpoznán průchod nulou a algoritmus by čekal na další. Toto čekání by způsobilo nestabilní délku jednoho cyklu. V případě nulové tolerance by se stalo, že by nedošlo k rozpoznání nuly v časovém limitu a vzorkování by bylo spuštěno při nenulovém napětí.

Dosažením a úpravou rovnice (36) dostaneme následující vztah pro výpočet relativní chyby měření. [23]

$$\delta_{RMS} = \left(\sqrt{1 - \frac{\sin(4\pi \cdot (M + \lambda) + 2 \cdot \varphi) - \sin(2 \cdot \varphi)}{4\pi \cdot (M + \lambda)}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (38)$$

Kde: M – počet celistvých period

λ – necelistvý násobek periody

φ – fázový posuv vůči počátku měřeného intervalu

Číselné dosazení, fázový posuv předpokládáme nulový.

$$\delta_{RMS} = \left(\sqrt{1 - \frac{\sin(4\pi \cdot (1 \pm 0,02))}{4\pi \cdot (1 \pm 0,02)}} - 1 \right) \cdot 100 \cong \pm 1 \% \quad (39)$$

Maximální relativní chyba by měla být do jednoho procenta měřené hodnoty.

Dalším krokem algoritmu je digitální odečet počátečního offsetu 2,5 V a provedení výpočtu dle rovnice (35). Výsledkem je efektivní hodnota na vstupu A/D převodníku, tedy v rozsahu 0 až 2,5 V. Hodnota se musí vynásobit konstantou, která odpovídá součinu převodního poměru napěťového děliče a transformátoru. Touto konstantou lze měření napětí „kalibrovat“ pro maximální přesnost.

$$U_1 = U_2 \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = U_2 \cdot 18,4 \cdot \frac{7,5}{(7,5 + 51)} = U_2 \cdot 143,52 \quad (40)$$

Kde: U_1 – vstupní napětí [V]

U_2 – výstupní napětí [V]

Funkce Napeti, která vrací efektivní hodnotu, je volána třikrát, každá fáze je měřena zvlášť. V případě poruchy, kdy není měřené napětí v povoleném rozsahu 200 – 260 V, je signalizována chyba fáze.

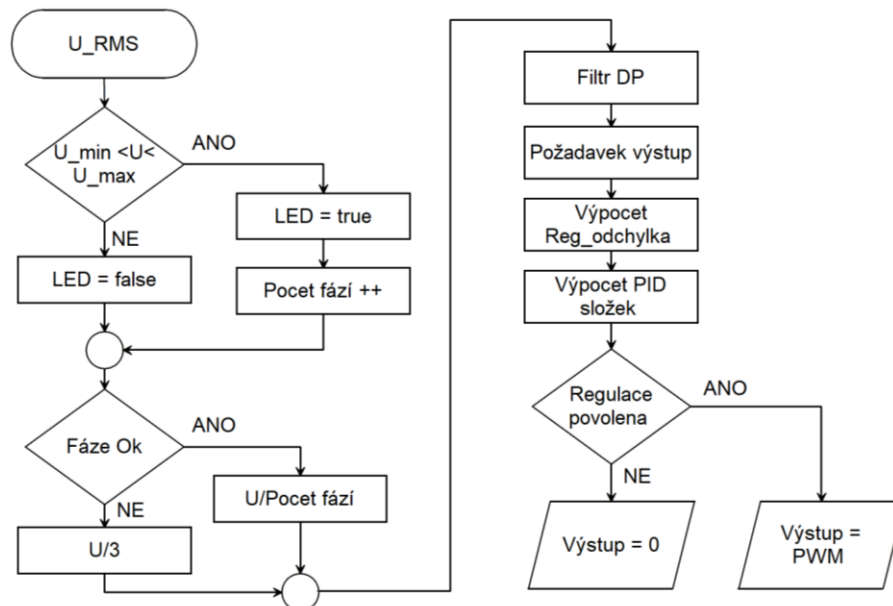
Velkou výhodou tohoto způsobu výpočtu je frekvenční nezávislost výsledku. Timeout vzorkování nastaven na 200 ms. Ten zajistí ukončení měření v případě problému se vstupním napětím. (Vstupní napětí má příliš nízkou frekvenci, nebo je DC.)

Drobnou nevýhodou je, že při toleranci dle vztahu (40) je měření pro malé napětí dost nepřesné. Pro měření do 10V téměř nepoužitelné, proto je filtrováno jako nula.

6.4 Programová smyčka – pokračování

Poté co máme zjištěné aktuální vstupní napětí všech tří fází, je počítán průměr, s kterým se nadále pracuje. V průměru jsou zohledněny pouze fáze, které se nachází ve stanoveném intervalu U_{\min} a U_{\max} . Tímto je ošetřeno přepětí regulátoru, které by vzniklo například při výpadku měření jedné z fází. Regulační proces pracuje nadále pouze na dvě fáze, to aby např. spálená pojistka nebo přechodový odpor neodstavil celou regulaci z provozu. Tento výpočet je zobrazen v první části vývojového diagramu na *obrázku 24*. Nutností je symetrické buzení, které u třífázového stroje považujeme za samozřejmost.

Pokud není ani jedna z fází v povoleném rozsahu, výpočtem je pouze aritmetický průměr. To nastane při rozbíhání a zastavování generátoru. Vzájemný rozdíl fází není vyhodnocován, protože se předpokládá použití výrazně nesymetrické zátěže, jako je jednofázový spotřebič.



Obrázek 24 – Posloupnost hlavní smyčky

Druhá polovina vývojového diagramu zjednodušeně zobrazuje zpracování aktuálně změřené hodnoty napětí. Začíná filtrováním typu dolní propust, který slouží jako

antialiasingový filtr, jeho funkcí je potlačení frekvencí, které nesplňují vzorkovací teorém (8). Filtr je možné realizovat fyzicky a zapojit ho na vstup regulátoru, nebo použít číslicovou alternativu, kde pomocí algoritmu provedeme filtraci. Tato varianta byla zvolena.

Předpokládejme požadovaný zisk amplitudy -20 dB a použití filtru 1. řádu se strmostí - 20 dB na dekádu. Skutečná vzorkovací frekvence, stanovená v oddílu 6.3.1, je 7800 Hz. Potom:

$$f_0 = \frac{f_v}{2} \cdot 0,1 = \frac{7800}{2} \cdot 0,1 = 390 \text{ Hz} \quad (41)$$

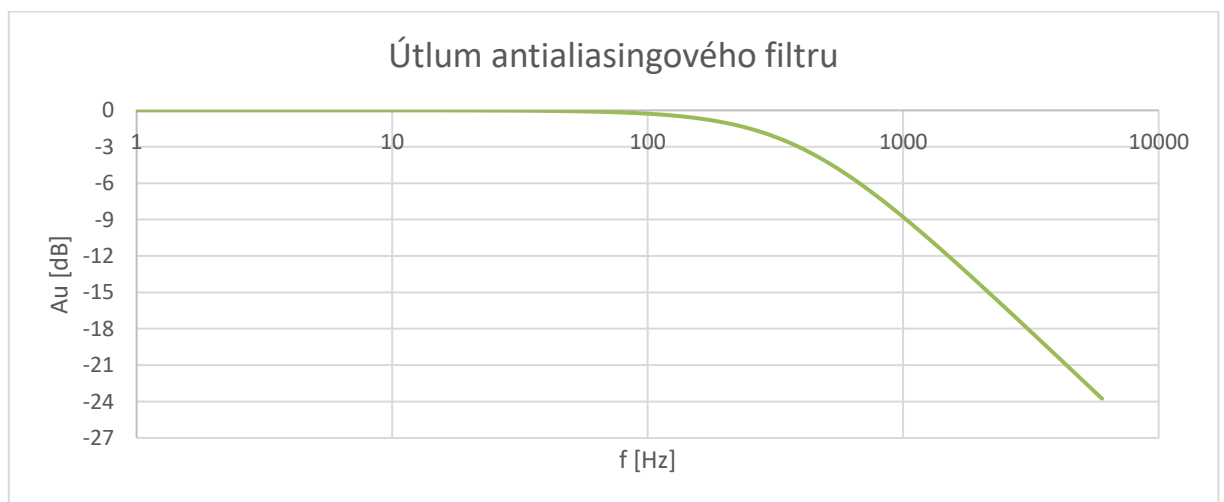
Kde: f_0 – mezní frekvence filtru [Hz]

f_v – vzorkovací frekvence [Hz]

0,1 – poměr amplitud při zisku -20 dB [-]

Útlum je vykreslen do následujícího grafu. Výpočet dle rovnice (42). Pro frekvenci 50 Hz je útlum zanedbatelný.

$$A_u = 20 \cdot \log \frac{1}{\sqrt{(R \cdot C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f)^2 + 1}} \quad (42)$$



Graf 4 – Antialiasingový filtr

Pro DP realizovanou rezistorem a kondenzátorem platí:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (43)$$

Kde: $R \cdot C$ – lze nahradit časovou konstantou τ [s]

Potom je časová konstanta rovna:

$$\tau = \frac{1}{f_0 \cdot 2 \cdot \pi} = \frac{1}{390 \cdot 2 \cdot 3,14} = 0,4081 \text{ ms} \quad (44)$$

Filtrační koeficient se rovná:

$$a = 1 - e^{-\frac{T}{\tau}} = 1 - e^{-\frac{0,128}{0,408}} = 0,27 \quad (45)$$

Kde: T – perioda vzorkování

Filtrační koeficient může nabývat hodnoty 0 až 1. Čím je větší, tím méně je hodnota filtrována. Pokud $a = 1$, vstupní veličina není filtrována vůbec. Příčinu ukazuje rovnice (46), podle který je výpočet filtru realizován.

$$U = (1 - a) \cdot u(n - 1) + a \cdot u(n) \quad (46)$$

Kde: n – pořadí vzorku

U – filtrované napětí

Po filtraci vstupního napětí pokračuje hlavní smyčka programu porovnáním požadovaného a měřeného napětí. Tím je vypočtena regulační odchylka a ta je předána do PID regulátoru popsaném v následujícím oddílu.

6.5 PID regulace

Jako regulátor je zvolen číslicový proporcionálně integračně derivační regulátor neboli číslicový PID. Nazývaný jako PSD regulátor (proporcionálně, sumačně, diferenční), protože se jedná o diskrétní regulaci. Čím větší je vzorkovací frekvence, tím více se číslicové PID přibližují spojitému PID regulátoru. Obecně platí, že vzorkování by mělo být natolik časté, aby rozdíl mezi spojitým a diskrétním regulátorem nebyl více jak 15 %. [17]

Funkce regulátoru spočívá v porovnávání požadovaného výstupního napětí a měřeného napětí na výstupu, které je považováno za skutečné. Z těchto hodnot je určena regulační odchylka.

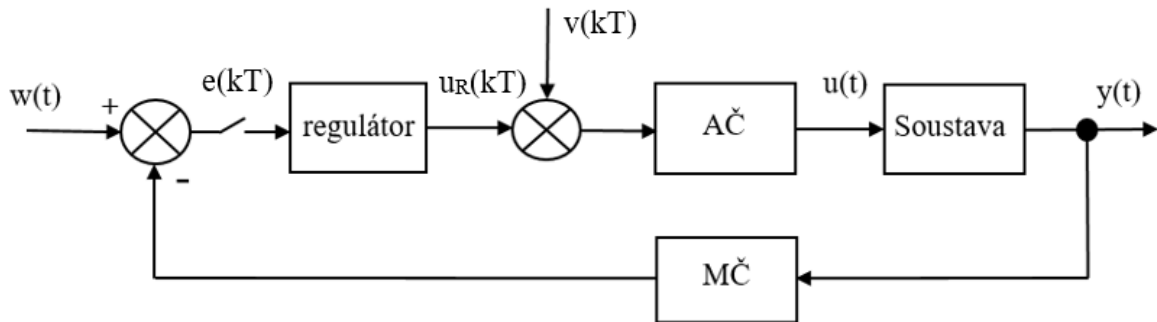
$$e(t) = w(t) - y(t) \quad (47)$$

Kde: $w(t)$ – žádaná hodnota regulované veličiny

$y(t)$ – skutečná hodnota regulované veličiny

Dle její velikosti PID regulátor vypočítá vhodnou velikost akční veličiny, kterou regulátor působí na regulovanou soustavu, pomocí akčního členu. Zjednodušené regulační schéma je na *obrázku 25*. Soustavou je myšlen generátor a budící vinutí, jejichž funkce je

analogová a spojitá. Regulátor je digitální a diskretní, ale pro přehlednost jsou A/D a D/A převodník vynechány.



Obrázek 25 – Zjednodušené regulační schéma

Kde: (t) – spojitá časová rovina, (kT) – diskretní časová rovina

$w(t)$ – žádaná hodnota regulované veličiny

$y(t)$ – skutečná hodnota regulované veličiny

$e(kT)$ – regulační odchylka

$u_R(kT)$ – akční veličina na výstupu regulátoru

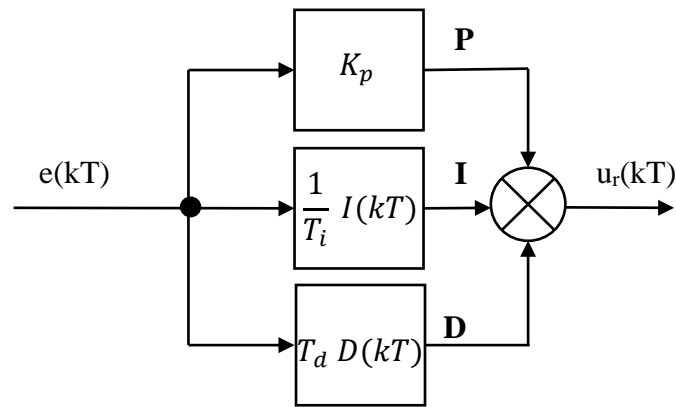
$v(kT)$ – poruchová veličina

$u(t)$ – akční veličina na vstupu soustavy

V našem případě je regulovanou veličinou výstupní napětí generátoru. To je měřeno pomocí měřicího členu, který je fyzicky realizován měřicími transformátory a A/D převodníkem Arduino. Výpočet $e(kT)$ je prováděn jednou za smyčku programu, proto je zdůrazněno, že se jedná o diskretní veličinu.

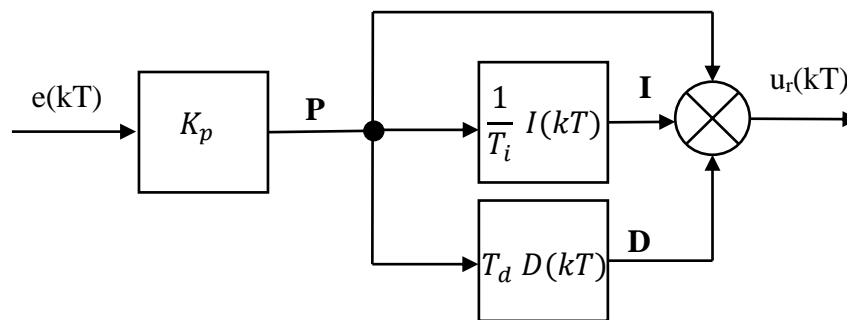
Regulátor provede výpočet PID složek, který je podrobně popsán v pododdílu 6.5.2. Jejich velikost je zesílena/zeslabena podle nastavení konstant K_p , K_i , K_d , které reprezentují proporcionální, integrační, derivační zesílení a následně jejich sloučení. Výsledkem je akční veličina $u_R(kT)$, která je reprezentována číslem 0 – 255. Toto číslo vyjadřuje střihu PWM výstupu Arduino. Na výstup je připojen tranzistor – tedy akční člen. Tranzistorem je řízen budicí proud generátoru. Budicí proud je akční veličinou $u(t)$, která působí na soustavu a určuje velikost $y(t)$. Poruchová veličina $v(kT)$ reprezentuje veškeré vnější vlivy, které negativně ovlivňují přesnost regulátoru.

Regulátor může pracovat bez interakce konstant, tak jak je znázorněno na následujícím obrázku.



Obrázek 26 – Blokové schéma číslicového PID regulátoru bez interakce

Jednotlivé složky jsou regulátoru počítány paralelně a jsou na sobě nezávislé. Druhou možností je použití „standardního“ PID regulátoru, kde je proporcionální složka předřazena a proporcionální zesílení ovlivňuje integrační a derivační část regulátoru. Potom rovnice (48) zobrazuje výpočet akční veličiny. [17]



Obrázek 27 – Blokové schéma „standardního“ PID regulátoru s interakcí

$$u_R(kT) = K_p \cdot \left[e(kT) + \frac{1}{T_i} \cdot I(kT) + T_d \cdot D(kT) \right] \quad (48)$$

Kde: $I(kT)$ – hodnota integrálu v čase $t = kT$

$D(kT)$ – hodnota derivace v čase $t = kT$

T_i – integrační časová konstanta $K_i = K_p/T_i$

T_d – derivační časová konstanta $K_d = K_p \cdot T_d$

Obě varianty si jsou rovnocenné, rozdíl je v zadávání konstant. Zatímco u první přímo zadáme velikost zesílení, u standardního PID regulátoru pracujeme s časovými konstantami. Změna proporcionálního zesílení ve stejném poměru změní i integrační a derivační. Během laboratorního měření bylo experimentováno s oběma variantami, v konečné verzi softwaru je použit regulátor s interakcí konstant.

6.5.1 Vliv jednotlivých složek PID

Proporcionální regulátor se chová jako ideální zesilovač. Akční veličina je přímo úměrná regulační odchylce a zesílení K_p . Zkracuje dobu regulace za cenu většího překmitu. Při regulaci statické soustavy nedokáže odstranit trvalou regulační odchylku.

Integrační regulátor integruje velikost regulační odchylky. Pamatuje si velikost integrálu a tu zesiluje zesílením K_i . Tímto způsobem dokáže integrační člen odstranit trvalou regulační odchylku. Zvyšuje přesnost regulace, ale má negativní vliv na stabilitu a překmit.

Derivační regulátor počítá derivaci regulační odchylky, reaguje pouze na změny a neřeší její absolutní hodnotu. Má pozitivní vliv na stabilitu regulace a snížení překmitu. Negativem jsou reakce na šum a rušení. Bez ošetření tohoto jevu může stabilitu i zhoršovat.

$$K_i = K_p \cdot \frac{1}{T_i} \quad a \quad K_d = K_p \cdot T_d \quad (49)$$

Kde: K_i – integrační zesílení

K_d – derivační zesílení

Vliv jednotlivých zesílení na regulační proces je uveden v následující tabulce.

Tabulka 8 – Vliv velikosti zesílení na přechodný děj [17]

Parametr	Doba náběhu na žádanou hodnotu	Překmit	Doba ustálení	Trvalá regulační odchylka
K_p	Zkrácení	Zvětšení	Malý vliv	Snížení
K_i	Zkrácení	Zvětšení	Prodloužení	Odstranění
K_D	Malý vliv	Zmenšení	Zkrácení	Malý vliv

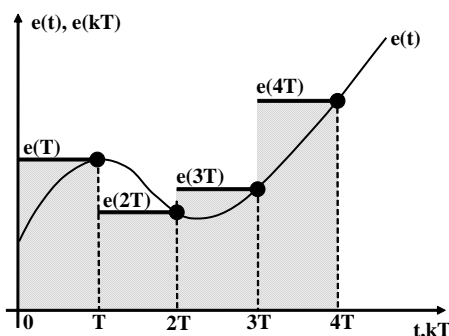
6.5.2 Algoritmus výpočtu PID složek

Podmínkou výpočtu je, aby ani jeden koeficient regulátor nebyl záporný (správně nastavené konstanty). Výpočet začíná zapsáním aktuálního času a určením doby do posledního výpočtu PID složek. Pro první průchod smyčkou je tento čas roven času od spuštění procesoru, který nemusí být přesný. Pro druhý průchod už je čas správný.

Následuje výpočet regulační odchylky dle rovnice (47). Běžné požadované napětí je nastaveno jako konstanta na 231 V, ale pokud bude regulátor zablokován přepínačem, bude požadované napětí 0, stejně tak při přesáhnutí hranice 250 V. Tím je zajištěno maximální odbuzování při riziku přepětí.

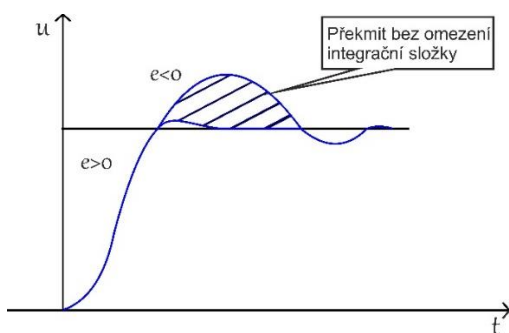
Proporcionální člen je vypočítán jako součin proporcionálního zesílení a regulační odchylky.

Pro určení výstupu integračního členu je použita zpětná obdélníková metoda. Jedná se o nejběžnější digitální náhradu integrace. K výsledku dojdeme jako k součtu ploch obdélníků nahrazující plochu pod skutečným integrálem. Jedná se tedy o sumaci místo integrace. Viz *obrázek 28*. Šířka obdélníku je dána vzorkovací frekvencí. Zase platí, že s rostoucí frekvencí roste přesnost.



Obrázek 28 – Zpětná obdélníková metoda [17]

Důležitou funkcí je omezení integrační složky regulátoru. Integrační člen je vypočítán jako součin integračního zesílení a integrálu regulační odchylky. V případě velké regulační odchylky bude veliký i integrační člen. Dřív, než dojde k jeho snížení, nastane velký překmit regulované veličiny. Toho je docíleno omezením maximální velikosti integrační složky a povolení integrace pouze pokud není akční veličina, tedy střída spínání tranzistoru, na limitní hodnotě.



Obrázek 29 – Ustálení přechodného děje s velkou regulační odchylkou

Výpočet derivace je nahrazen metodou zpětné diference, kdy je počítán rozdíl mezi novou a předcházející regulační odchylkou a ta je dělena časovým posunem vzorků. Výsledek je zesílen derivačním zesílením a potom je roven výstupu diferenciálního členu regulátoru.

6.5.3 Filtrování PID složek

Diskrétní systémy jsou více náchylné na šum oproti systémům spojitým. Proto je u diskrétních regulátorů potřeba filtrovat vstupní hodnotu regulátoru, aby vlivem šumu nedocházelo k prudkým změnám regulační odchylky. Lze předpokládat, že rušivý signál je vždy na vyšší frekvenci, a proto většinou postačuje použití filtru typu dolní propust.

Použitý typ filtrování se nazývá EMA (Exponential Moving Average Filter), klouzavý průměr s exponenciálním zapomináním. Tento filtr je odvozen od rovnice filtru DP 1. řádu a je tedy principiálně shodný s antialiasingovým filtrem popsaným v oddílu 6.4.

Proporcionální a integrační regulátor regulují podle absolutní hodnoty regulační odchylky, proto je vliv šumu malý. Zatímco derivační regulátor reaguje pouze na velikost změny a absolutní hodnotu nerozlišuje. Filtrování regulační odchylky ovlivní funkci celého regulátoru, proto se nabízí varianta filtrovat pouze derivační část regulátoru. Principiálně, doplněním derivačního členu o setrvačnost 1. řádu (EMA filtr).

6.5.4 Vliv regulované soustavy

Matematický popis regulované soustavy a matematický popis regulátoru se neliší, používají se stejné postupy, platí stejná pravidla. [17] Rozdíl je v tom, že soustava je zpravidla fixně dána a nelze měnit její vlastnosti, zatímco regulátor lze nastavit a přizpůsobit potřebám.

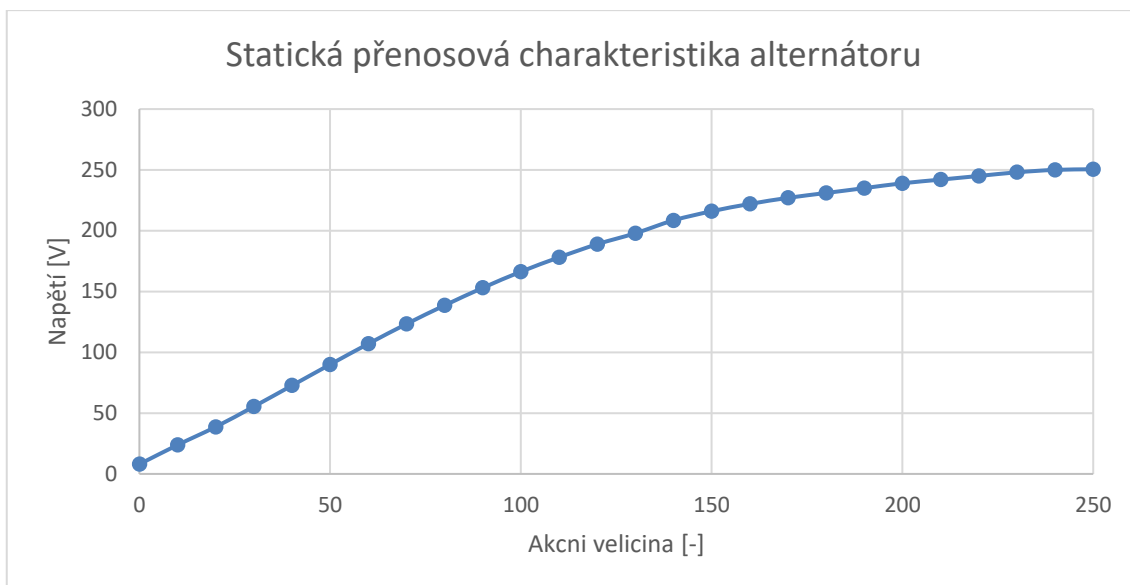
Náš první předpoklad je následující:

- Pokud je regulovanou soustavou synchronní generátor buzený ze statického zdroje napětí, jedná se o statickou soustavu se setrvačností prvního řádu. Statický, neboli proporcionální člen, po vychýlení z ustáleného stavu zaujme nový rovnovážný stav.
- Pokud je zdrojem budicího napětí dynamo na společné hřídeli s generátorem, jedná se o statickou soustavu druhého řádu. Soustava druhého řádu je obecně méně stabilní a většinou má tendence více kmitat.

6.5.5 Popis systému diferenciální rovnicí

Statická přenosová charakteristika (charakteristika naprázdno) zobrazuje závislost vstupní veličiny soustavy, tedy výstupní veličiny regulátoru, na výstupní veličině regulované soustavy. Tou je výstupní napětí generátoru. Charakteristika je experimentálně změřená při následujících podmínkách a je vykreslena v *grafu 5*:

- napětí zdroje 23,8 V
- otáčky generátoru 1500 ot/min



Graf 5 – Přenosová charakteristika

Křivka byla aproximována polynomem n-tého stupně. Protože přesnost Excelu byla nízká, k výpočtu byl použit MATLAB. Funkce polyfit(). Vypočítané koeficienty jsou uvedeny v následující tabulce. Hodnoty jsou zaokrouhleny na 6 platných číslic. Označeny podle obecné lineární diferenciální rovnice (50) pro popis statické soustavy n-tého řádu.

$$a_n(t)y^{(n)}(t) + \dots + a_1(t)y'(t) + a_0(t)y(t) = b_0(t)u(t) \quad (50)$$

Kde: t – čas (nezávislá proměnná)

$b_i(t)$, $a_i(t)$ – koeficienty závislé pouze na čase

$u(t)$, $y(t)$ – vstupní a výstupní veličina (závislé proměnné)

Tabulka 9 – Koeficienty polynomu

Řád p.	a3	a2	a1	a0	b0
2.	-	-	-0,00422114	2,043782	1,844578
3.	-	-3,980673 e -07	-0,00406738	2,028255	2,145182
4.	1,045398 e- 07	-5,401227 e -05	0,00465914	1,552857	7,181659

Z tabulky vyplývá následující zjištění - regulovaná soustava generátoru s cizím buzením musí být minimálně druhého řádu. Pro první řád platí, že poloha pólu je dána podílem $-a_0/a_1$. Aby byla soustava stabilní, pól musí být záporný. Pro splnění této podmínky musí mít oba koeficienty stejné znaménko, ale v tomto případě nemají.

Druhým důkazem o vyšším řádu je tvar přechodové charakteristiky při následujících měřeních uvedených dále v textu. Začátek charakteristiky je zaoblený, statická soustava se setrvačností prvního řádu má zaoblený pouze konec, před ustálením v klidovém stavu.

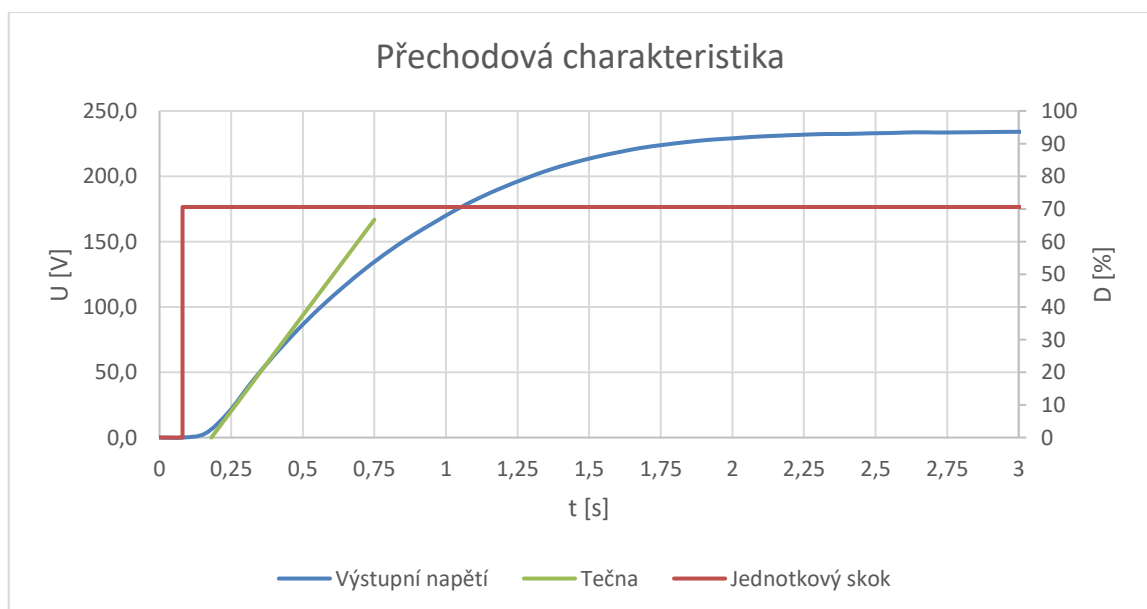
Abychom měli představu o tom, jak je aproximace přesná, byla provedena suma čtverců odchylek. [24] Aproximace polynomem třetího řádu se odchyľuje od změřené charakteristiky ještě více, než pro polynom druhého řádu. Proto do diferenciální rovnice použijeme hodnoty pro čtvrtý řád polynomu a generátor považujeme za soustavu se setrvačností třetího řádu.

6.5.6 Nastavení PID regulátoru

Při ožiování a odstraňování chyb ve zdrojovém kódu regulátoru byl ověřen vliv jednotlivých regulačních složek. Již zde se potvrdila vhodnost použití PI regulátoru místo PID. Derivační zesílení, jak bylo později dokázáno měřením (*Graf 20*), ztelně zhoršoval kmitavost v ustáleném stavu.

Proto je použit pouze PI regulátor, jde o velmi často používaný typ regulátoru. Spojuje výhody P a I regulátoru. Hodí se pro regulaci soustav statických i astatických se setrvačností vyššího řádu s libovolnými časovými konstantami, i s větším dopravním zpožděním, při velkých a pomalých změnách zatížení. [17]

Výpočet nastavení regulátoru provedeme ze znalosti reakce soustavy na jednotkový skok na vstupu. Tedy z přechodové charakteristiky.



Graf 6 – Odezva na jednotkový skok střídavy

Nevýhodou tohoto postupu je nutnost určení inflexního bodu křivky. Ten nastane při napětí 46,3 V v čase 339 ms. Tento bod proložíme tečnou a zjistíme průsečík její s časovou osou. Čas v tomto bodě je označován jako doba průtahu (T_u). Druhý čas, který musíme z charakteristiky zjistit je doba náběhu (T_n). Zjištěné hodnoty dosadíme do empirických vztahů dle *tabulky 10*. Nastavení touto metodou je univerzální a prakticky vždy se musí ještě ručně doladit. Proto jsou výpočty trochu zjednodušeny na úkor přesnosti.

Tabulka 10 – Výpočet zesílení a časových konstant [17]

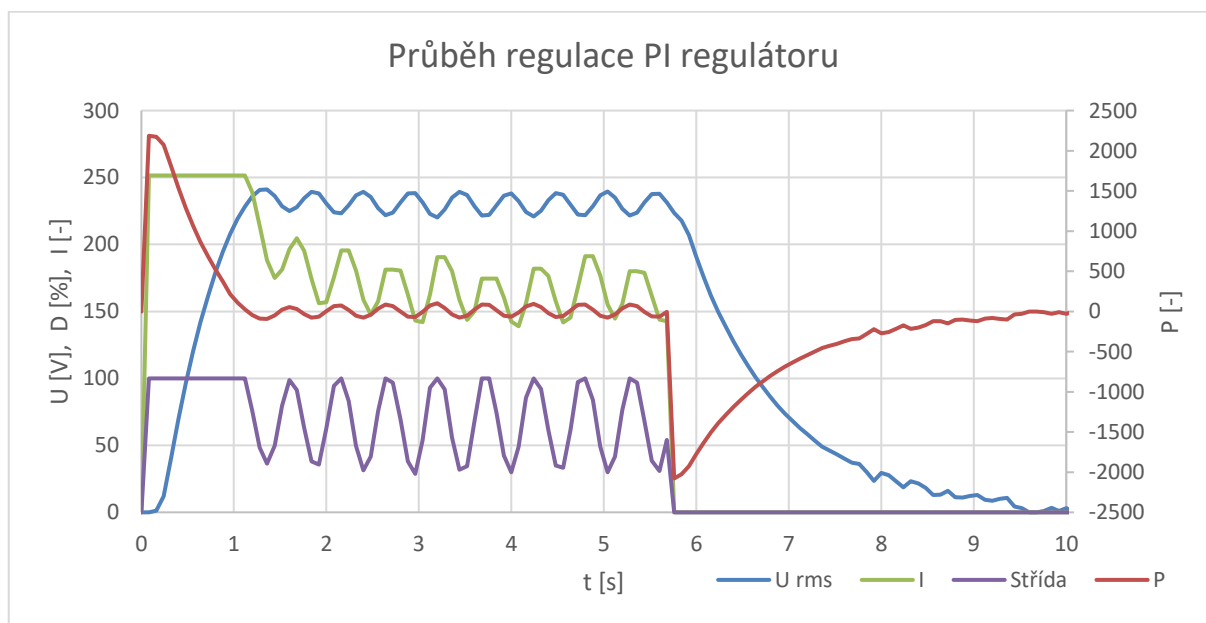
Typ regulátoru	K_p	T_i	T_D
P	$\frac{T_n \cdot 1}{T_u \cdot k_s}$	-	-
PI	$0,9 \cdot \frac{T_n \cdot 1}{T_u \cdot k_s}$	$3,5 \cdot T_u$	-
PID	$1,25 \cdot \frac{T_n \cdot 1}{T_u \cdot k_s}$	$2 \cdot T_u$	$0,5 \cdot T_u$

Kde: K_s - zesílení soustavy

$$K_p = 0,9 \cdot \frac{1,040}{0,101} \cdot \frac{1}{1,27} = 7,3 \quad (51)$$

$$T_i = 3,5 \cdot 0,101 = 0,35 \quad (52)$$

Dosazení vypočítaných hodnot do PID regulátoru a spuštění regulace způsobí následující průběh veličin.



Graf 7 – Regulátor s vypočítanými konstantami

Z grafu je patrný rozkmit způsobený příliš velkým proporcionálním zesílením. Kmity jsou ustálené, v rozsahu 221 – 239 V. Při použití pouze P regulátoru byla regulace stabilní, ale trvalá regulační odchylka na nezátíženém generátoru byla více jak 15 V.

6.6 Vyhodnocení poruch

Sledované stavy a poruchy jsou uvedeny v následující tabulce. Číslo odpovídá jednomu bitu z celého bytu v logické jedničce, zobrazenému v desítkové soustavě. Součet čísel tvoří stavové slovo regulátoru. Arduino neumožňuje čtení aktuální velikosti vnitřních proměnných jako je tomu v průmyslovém PLC. Proto je využito sériové komunikace, přes kterou je odesíláno stavové slovo dle tabulky. Důvodem sloučení stavů do jednoho je nižší zatěžování procesoru komunikací, která „zdržuje“ hlavní programovou smyčku. Každý stav je signalizován stavem některého z výstupů.

Tabulka 11 – Provozní stavy regulátoru

číslo	Stav	Vyhodnocení	Signalizace
1	Vstup A0, A1, A2 není 2,5V při střídě D6 větší než 0	Běžný provozní stav – regulátor je v provozu	Výstup D13 nastaven na úroveň High
2	Vstup A0, A1, A2 je 2,5V při nulové střídě D6	Regulace je vypnuta	Výstup D13 nastaven na úroveň Low
4	Vstup A0, A1, A2 je 2,5V při maximální střídě D6	Generátor se neotáčí, nebo jsou jeho otáčky příliš nízké	Výstup D6 trvale na úroveň High
8	Vstup A0 není v provozních mezích	Výpadek měření první fáze, nebo porucha vinutí	Výstup D2 nastaven na úroveň Low
16	Vstup A1 není v provozních mezích	Výpadek měření druhé fáze, nebo porucha vinutí	Výstup D3 nastaven na úroveň Low
32	Vstup A2 není v provozních mezích	Výpadek měření třetí fáze, nebo porucha vinutí	Výstup D4 nastaven na úroveň Low
64	Vstup A3 není roven 2,5V	Porucha externí reference	Výstup D5 nastaven na úroveň High
128	Vstup D8 na úrovni High	Nadproud budiče	Výstup D6 trvale na úroveň Low

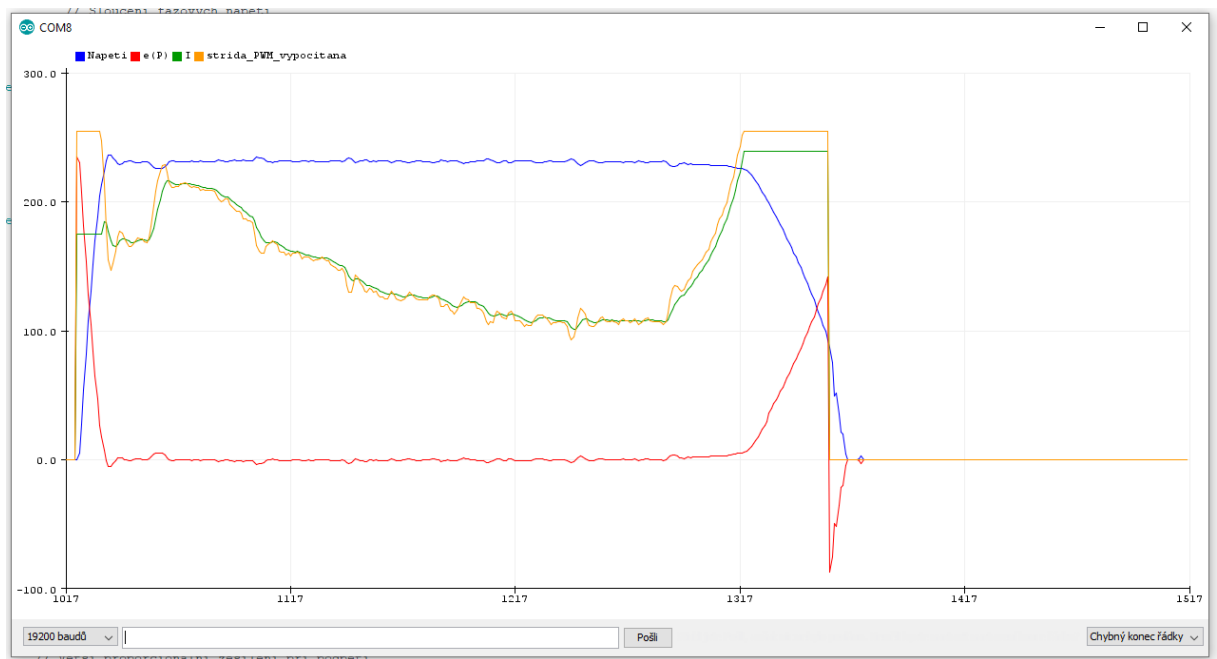
Správa sériové komunikace je zobrazena binárně. Na výstupu D13 je připojena pouze LED, která je osazena na řídicí desce Arduina.

6.7 Komunikace

V inicializační smyčce „setup“, která proběhne vždy jen jednou po spuštění kontroléru, funkcí Serial.begin() zahájíme sériovou komunikaci s určitou rychlostí. Rychlost si určíme sami, nejpoužívanější rychlostí je 9 600 bitů za sekundu.

Standardní rychlosti jsou 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200 bit/s. S rostoucí rychlostí roste datová propustnost, ale zvyšuje se chybovost sběrnice a zhoršuje se stabilita. Proto byla nakonec zvolena rychlost 19 200 bit/s, kdy k žádnému problému nedochází.

Po zahájení komunikace už můžeme kdykoli volat funkci Serial.println() a předat do ní proměnnou, nebo řetězec, který potřebujeme přenést. Komunikaci lze samozřejmě využívat obousměrně, ale tato možnost není využita. Přenesená data jsou k dispozici jako číselný (textový) výpis, nebo v grafickém zobrazení (Obrázek 30). Při dodržení formátu zprávy lze vykreslovat více proměnných. Měřítko zobrazení je automatické.



Obrázek 30 – Sériový ploter

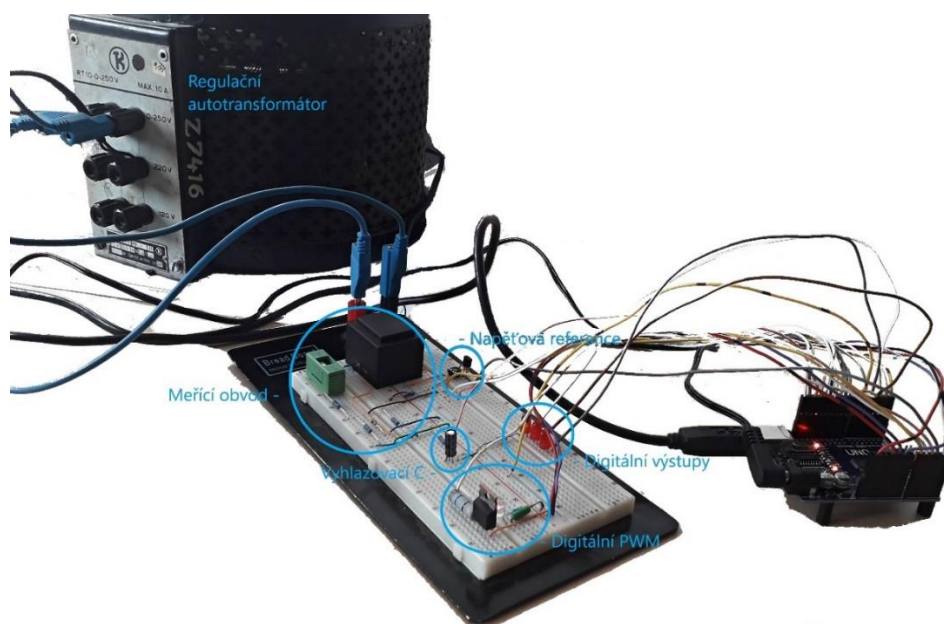
Vzorkovací frekvence následujících grafů vykreslených z hodnot zaznamenaných pomocí Arduina a sériové komunikace je 12,5 Hz.

7 Realizace

Výsledkem návrhu je elektronický, galvanicky oddělený rychloregulátor napětí. Regulátor je rozdělen na měřicí část, řídicí část a výkonovou část. Tedy na tři samostatné plošné spoje. Každá část je navržena samostatně.

7.1 Vývoj

Testování jednotlivých prvků regulátoru, a hlavně softwaru, probíhalo na nepájivém poli. Zapojena je pouze jedna měřicí fáze a nezbytné komponenty. Zjištěné poznatky jsou použity pro kapitoly o návrhu.

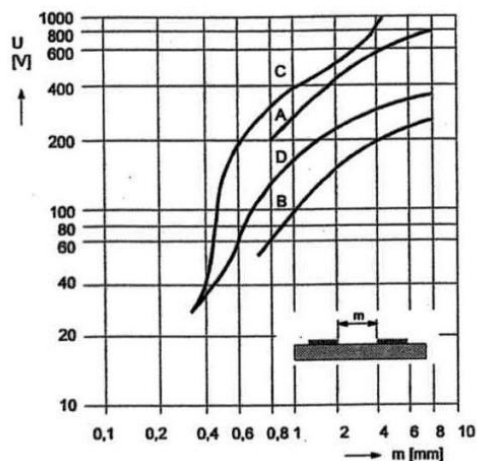


Obrázek 31 – Testovací pracoviště při vývoji hardwaru a softwaru

7.2 Návrh plošných spojů

Minimální šířka mezery mezi spoji se mění v závislosti na rozdílu potenciálu, většina spojů je určena pro malé napětí a izolační vzdálenost postačuje pouze 0,4 mm. [20]

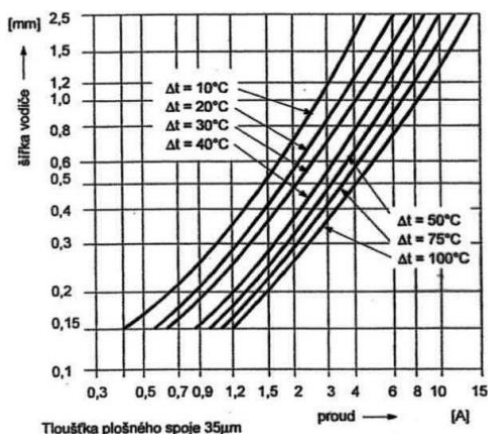
Závislost doporučené mezery na napětí zobrazuje *obrázek 32*. Charakteristika C a D je uvedena pro lakovaný DPS. A a B jsou bez ochranného laku. Druhý rozdíl je v atmosférickém tlaku. S klesajícím tlakem se snižuje elektrická pevnost plynu, ale pouze do určité hodnoty. Poté se začne znovu zvyšovat a pravděpodobnost výboje klesá (Paschenův zákon). Charakteristika C a A je pro výšku do 3000 m, D a B pro výšku do 15 tis. m.



Obrázek 32 – Závislost jmenovitého napětí na šířce mezery [20]

Největší sdružené napětí je $400 \text{ V} \pm 10 \%$ na měřicí desce, kde byla dodržena vzdálenost 7,5 mm. Pro fázové napětí je dodrženo 5 mm.

Proudová zatížitelnost vodivé cesty plošného spoje se u různých zdrojů rozchází. Nakonec byla zvolena hodnota dle následující charakteristiky.



Obrázek 33 – Proudová zatížitelnost plošného spoje [20]

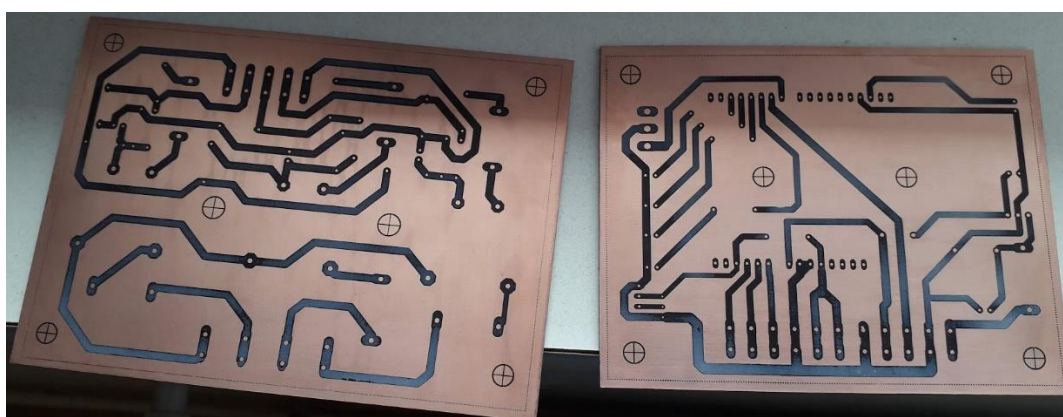
Spoj o šíři 2,5 mm a tloušťce 35 μm by měl stačit pro přenesení 8A, při oteplení o 30 °C, i při zvýšené pracovní teplotě je dost daleko od maximální pracovní teploty cuprexitu, která nesmí přesáhnout hranici 125°C. Návrh plošných spojů je proveden v prostředí EAGLE a je součástí přílohy.

7.2.1 Výroba plošného spoje

Původní předpoklad byl, že výroba DPS proběhne v prostorách univerzity s použitím laboratorního vybavení technologií fotocesty. Z důvodů mimořádných opatření se situace zkomplikovala a bylo třeba nalézt alternativní způsob výroby. Pro svoji jednoduchost a

nenáročnost byla zvolena nažehlovací metoda, kterou lze realizovat i v domácích podmínkách. Postup je následující.

- Navrhnutý plošný spoj je vytisknut laserovou tiskárnou na papír s nízkou savostí, možností je více. V našem případě byl použit fotopapír.
- Druhým krokem je přiložení vytisknutého vzoru na důkladně očištěnou destičku cuprextitu a následném zalisování při teplotě 180 – 200 °C. Tím toner přeneseme na měď. K tomuto úkonu se perfektně hodí kancelářská laminovačka.
- Třetím krokem je odstranění papíru, ten necháme odmočit ve vodě. Změklý papír lze prstem setřít. Zde je třeba dát pozor na poškození vrstvy toneru nehtem.



Obrázek 34 – Cuprextit připravený k leptání

Nyní můžeme přejít k vyleptání, očištění od toneru, lakování, vrtání a osazení součástkami.

7.3 Parametry výrobku

Skutečné parametry regulátoru:

Tabulka 12 – Technické vlastnosti regulátoru

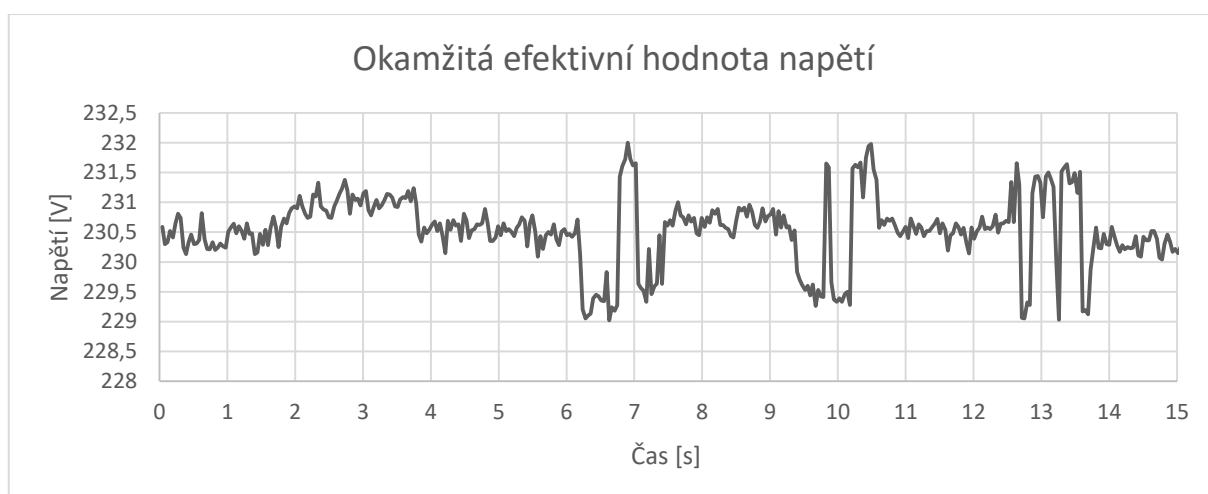
Parametry	Jmenovitá hodnota	Povolený rozsah	Jednotky
Vstupní fázové napětí (AC)	230	12 - 270	V
Frekvence	50	5 - 100	Hz
Počet regulovaných fází	3	1 - 3	-
Budicí napětí	110	0 - 199	V
Budicí proud	2	0 – 9	A
Budicí výkon	220	0 - 660	W

Jeho fotografie je uvedena v příloze: příloha c – hotový regulátor.

8 Testování v laboratoři

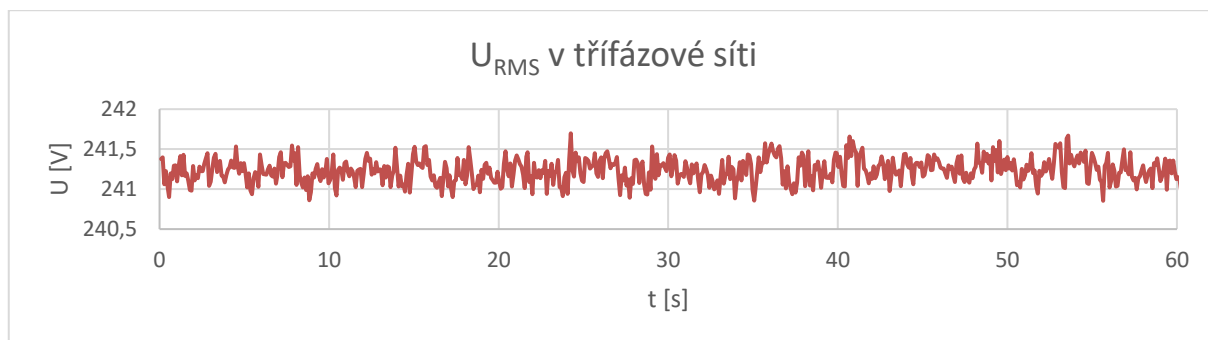
8.1 Měření napětí

První zkušební měření probíhalo na síťovém napětí přes autotransformátor Křižík RT10, 0-250V, pomocí kterého byly měřeny různé napěťové úrovně. Hodnota změřená regulátorem byla zaznamenána pomocí sériové komunikace přes USB a ověřena digitálním multimetrem s přesností $1\% \pm 8$ dgt. Zaznamenaný průběh je vykreslen do *grafu 8*, protože jde o skutečnou, zatíženou síť, hodnota napětí kolísá podle aktuální změny zátěže. Změřená hodnota není ovlivněna žádným filtrem a je měřena pouze pro jednu fázi, proto je hodnot trojnásobek, než u třífázového měření.



Graf 8 – Napětí v síti (počet vzorků = 500)

V tomto režimu byla funkce měření napětí odladěna, pro spolehlivou funkci. Správně určené napětí je jednou z nejdůležitějších vlastností regulátoru. Dalším krokem bylo třífázové měření a sloučení napětí a jeho filtrace tzn. celý proces měření. Měřena byla síť v průmyslové zóně, nedaleko transformátoru, která není v odpoledních hodinách příliš zatěžována. Výsledkem je *graf 9*.

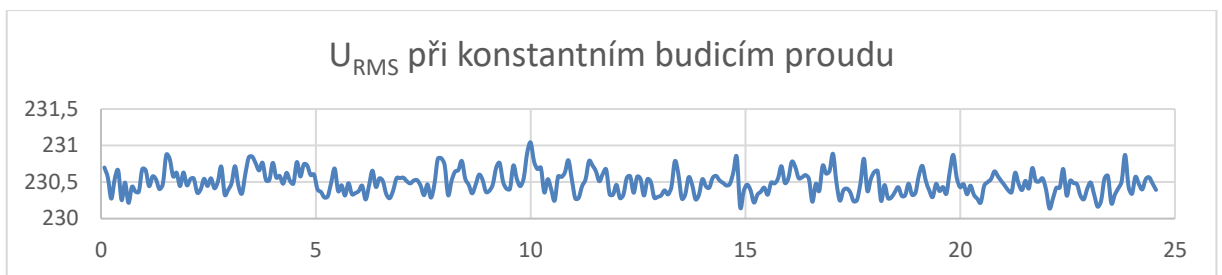


Graf 9 – Třífázové měření síte

Vzhledem k tomu, jak dokazuje rovnice (10), rozlišovací schopnost převodníku je 0,7 V. Navíc je tu řada parametrů snižujících přesnost měření. Kolísání napětí v rozmezí 0,5V je perfektní výsledek. Průměrná odchylka od střední hodnoty je 0,123 V.

Absolutní hodnota byla kalibrována upravením konstanty z rovnice (40). Přesnost měření napětí byla ověřena digitálním revizním přístrojem EUROTTEST MI3102BT s platným kalibračním listem č. 19090405.

Při měření sítě nelze určit, do jaké míry má vliv kolísání napětí v síti na měřenou hodnotu. Uskutečněno bylo tedy měření na generátoru při konstantních otáčkách a budícím proudu – přímé připojení na zdroj napětí. Filtrační koeficient $a = 0,23$.

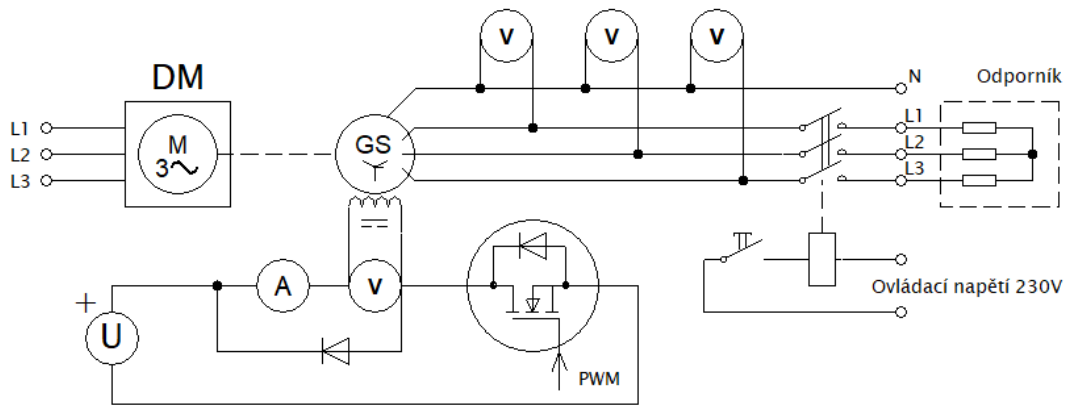


Graf 10 – Efektivní hodnota na generátoru

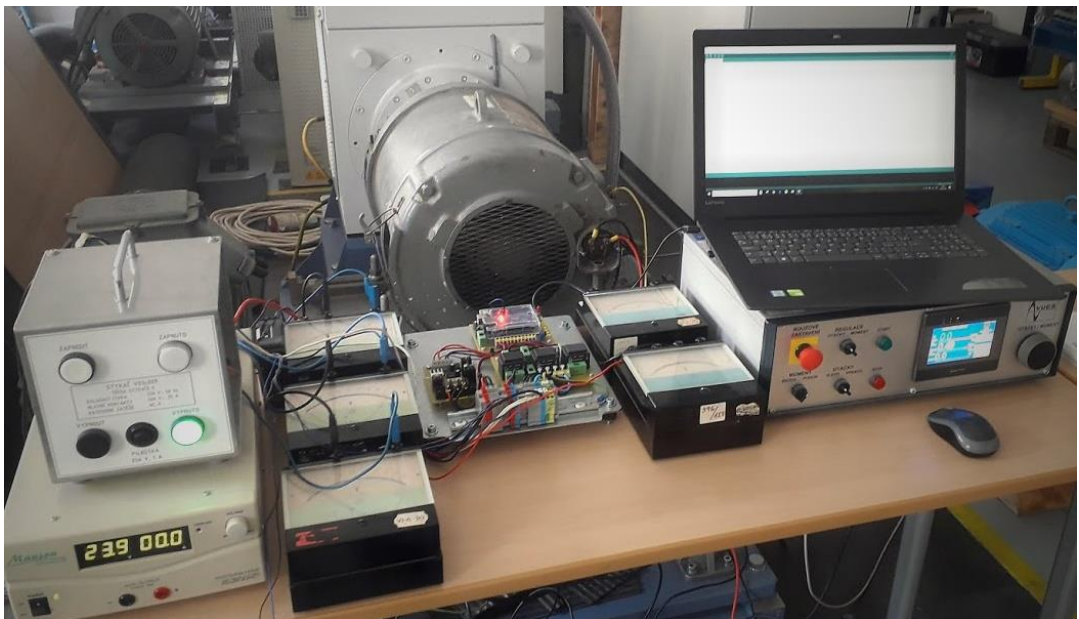
Navzdory předpokladu o zlepšení, napětí kolísá téměř stejně. Průměrná odchylka od střední hodnoty je 0,128 V. Nutno podotknout, že byla zvýšena tolerance nuly, rovnice (37), na 2,34 %. Stabilita otáčkového regulátoru generátoru není známá, ale nepřisuzujeme mu významnou chybu. K výraznému potlačení kolísání nedošlo ani při snížení filtračního koeficientu. Použití jiného filtru, např. výpočet klouzavého průměru, by mělo negativní vliv na odezvu. Pořád platí, že jde o kolísání na hraně rozlišení 10-ti bitového převodníku. Pro lepší přesnost by bylo nutné použití 12-ti bitového převodníku.

8.2 Měřicí pracoviště

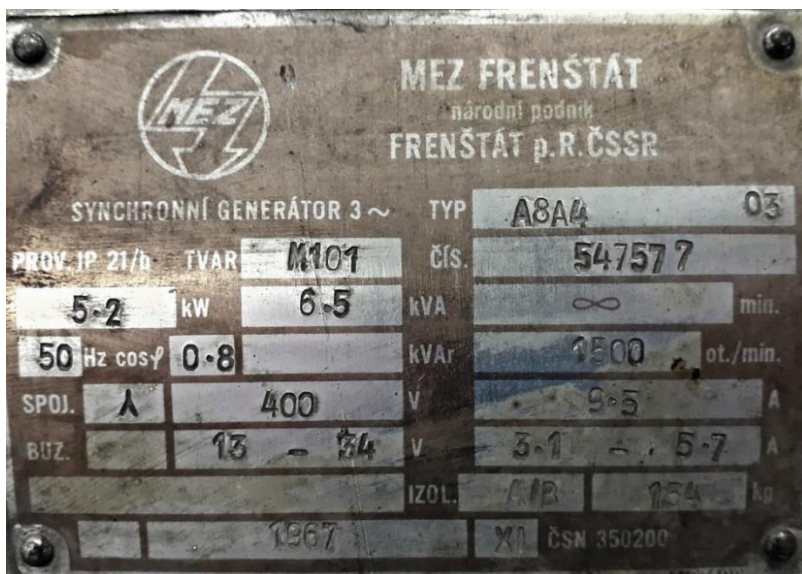
Rotor alternátoru má čtyři póly, jde tedy o rotor s vyniklými póly. Proto pro výstupní frekvenci 50 Hz potřebujeme udržovat 1500 ot/min. Zapojení statorového vinutí je do hvězdy. Jako pohon slouží asynchronní dynamometr ASD P050-4 v otáčkové regulaci. Budičem je laboratorní zdroj stejnosměrného napětí. Pro měření stejnosměrných veličin jsou použity magnetoelektrické přístroje. Střídavé veličiny jsou měřeny analogovými elektromagnetickými měřáky nebo osciloskopem Tektronix. Zapojení je na *obrázku 35*, dalším obrázkem je fotka pracoviště a následuje štítek synchronního generátoru, na kterém celé měření obsažené v této kapitole.



Obrázek 35 – Zapojení laboratorního pracoviště



Obrázek 36 – Skutečné laboratorní pracoviště



Obrázek 37 – Štítek laboratorního generátoru

8.3 Seřízení regulátoru

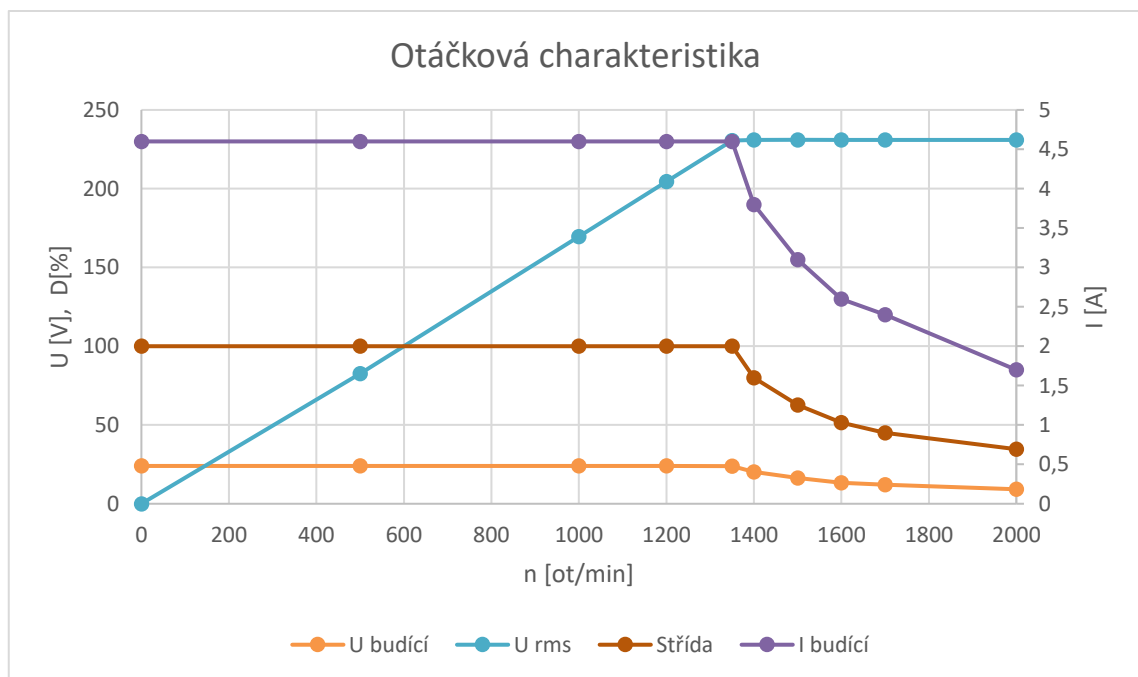
Výchozí konstanty regulátoru K_p , T_i a T_d byly upraveny na konečné hodnoty dle *tabulky 13*. Tyto hodnoty jsou brány jako výchozí pro všechny změřené charakteristiky, pokud není uvedeno jinak. Seřízení konstant proběhlo ručně na základě požadavku optimálního průběhu charakteristik v následujících dvou oddílech.

Tabulka 13 – Konstanty regulátoru

K_p	T_i	T_d
4,2	0,22	0

8.4 Statické charakteristiky

U statických charakteristik měříme ustálenou hodnotu, první charakteristikou je otáčková charakteristika, kde napětí zdroje je konstanta. Voltmetr na budicím vinutí ukazuje napětí 24 V při maximální střídě. Nezávislá proměnná jsou otáčky.



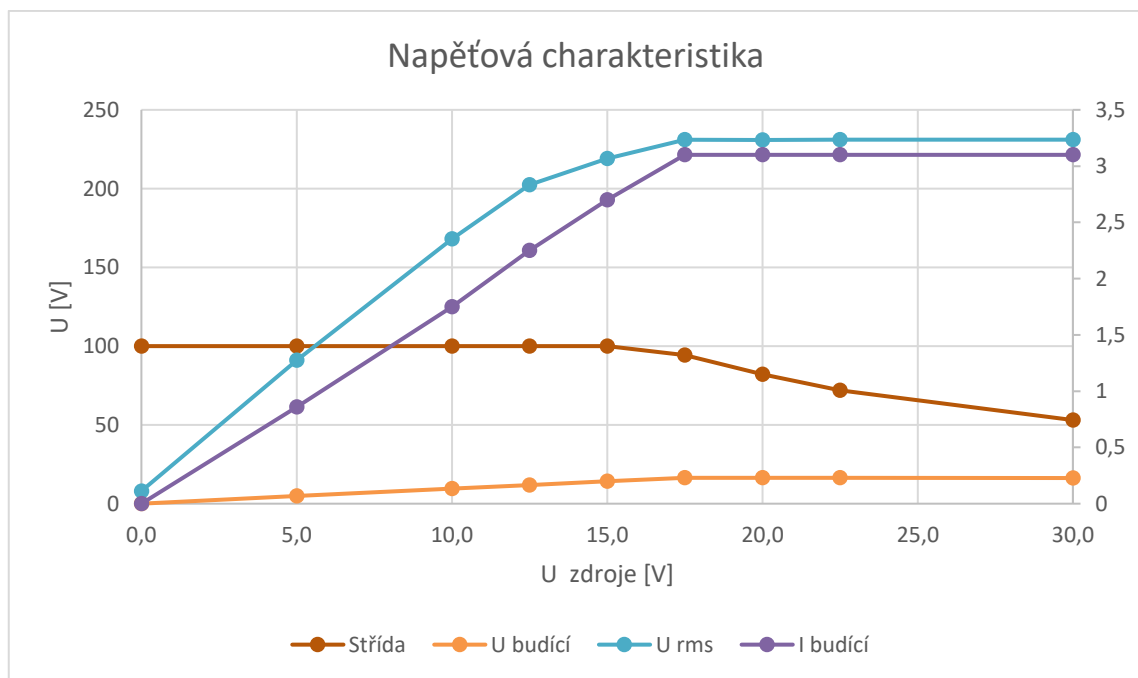
Graf 11 – Otáčková závislost

Graf ukazuje lineární závislost napětí a otáček, až do hodnoty cca 1350 ot/min, kde regulátor začíná zasahovat a omezovat budicí proud a pokles všech veličin kromě výstupního napětí je exponenciální. Nelze si nevšimnout podobnosti s momentovou charakteristikou stejnosměrného stroje s cizím buzením v režimu odbuzování.

- Měřená charakteristika je na prázdko a výkon odebíraný ze svorek alternátoru je nulový.

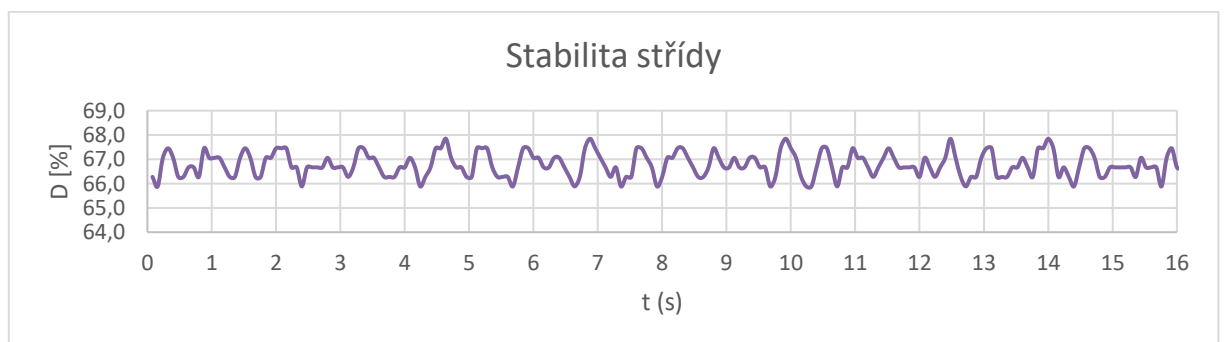
Se změnou otáček se mění i frekvence výstupního napětí. Teoreticky nejnižší měřitelnou frekvencí je cca 6 Hz. Tomu odpovídá 240 ot/min. V případě potřeby je možné nejnižší frekvenci snížit.

Druhým zobrazeným grafem je napěťová charakteristika. Zobrazuje závislost výstupního napětí na napětí budicím. Otáčky generátoru jsou udržovány na konstantní hodnotě 1500 ot/min. Budicí proud narůstá lineárně, až do hodnoty 3,1 A, která odpovídá požadovanému napětí naprázdno. Napětí má tvar shodný s přenosovou charakteristikou transformátoru z grafu 5. Opět je příčinou sycení magnetického obvodu.



Graf 12 – Napěťová charakteristika

Z grafu 13 lze vyčíst stabilitu výstupní střídý v ustáleném stavu. Střední hodnotou je 66,7 %. Kolísání se pohybuje v rozsahu ± 1 %. Dosazením do diferenciální rovnice (50) pro polynom 4. řádu, získáme rozsah napětí $\pm 0,89$ V požadované hodnoty.

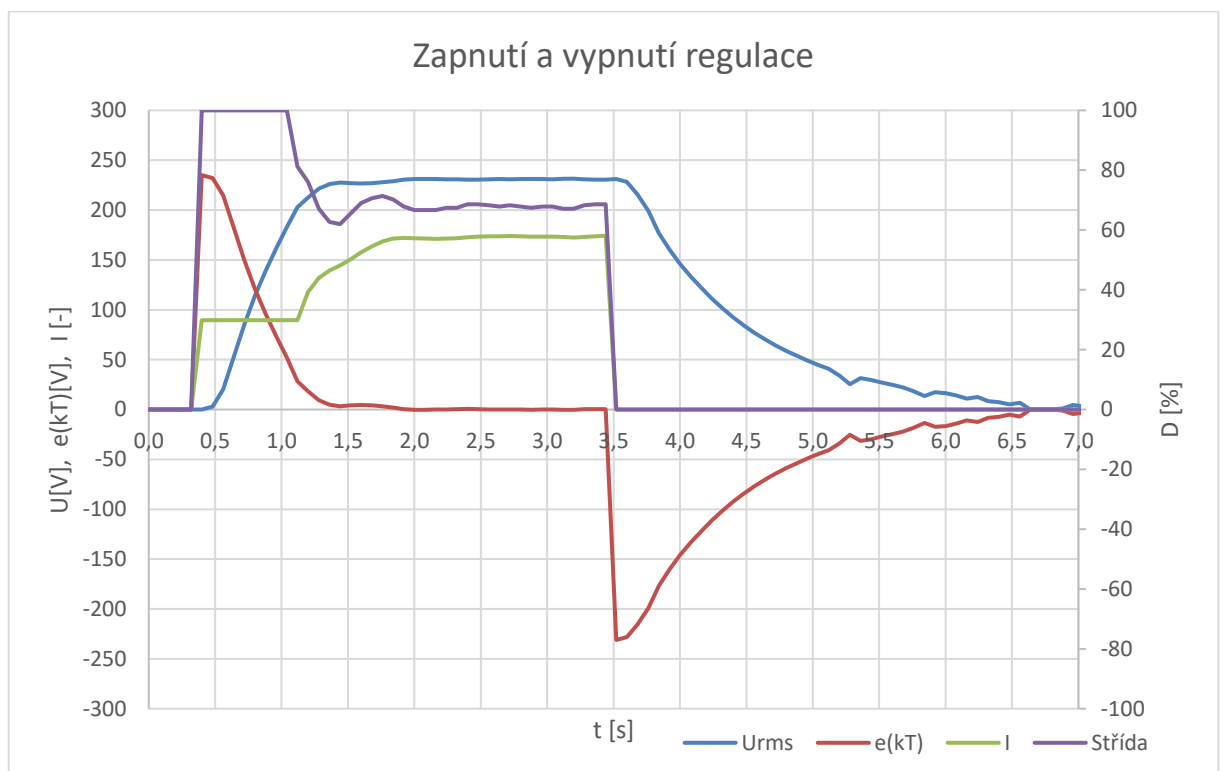


Graf 13 – Stabilita

8.5 Dynamické charakteristiky

Tato část je zaměřena na přechodné děje regulátoru. Výstupní napětí točícího se generátoru při nulovém budicím proudu je zpravidla v následujících charakteristikách zobrazeno jako nulová hodnota. Ve skutečnosti je napětí přibližně 8 V při 1500 ot/min díky remanentnímu magnetismu. Účel filtrování (viz strana 39) je zobrazení nulového napětí, pokud je opravdu nulové. 8 V je kousek pod hranicí filtru. Na měření se to projevuje tak, že napětí je většinou zobrazeno jako nula a občas poskočí na pár voltů, důvodem je nepřesnost měření pro malé napětí a způsob výpočtu - aritmetický průměr všech fází.

Běžným provozním dějem může být vypnutí a zapnutí regulace při roztočeném soustrojí. Průběh veličin při jmenovitých otáčkách je zobrazen v *grafu 14*. Ke spuštění regulace došlo v čase 0,4 s. Akční veličina na výstupu z regulátoru (střída) okamžitě dosahuje 100 %. Následuje 200 ms, než výstupní napětí dosáhne 10% požadované hodnoty. Zde se začíná měřit čas, označený jako doba náběhu. Ten je definován jako čas, potřebný k přechodu z 10 % na 90 % ustálené hodnoty.



Graf 14 – Skok požadovaného napětí o 231 V

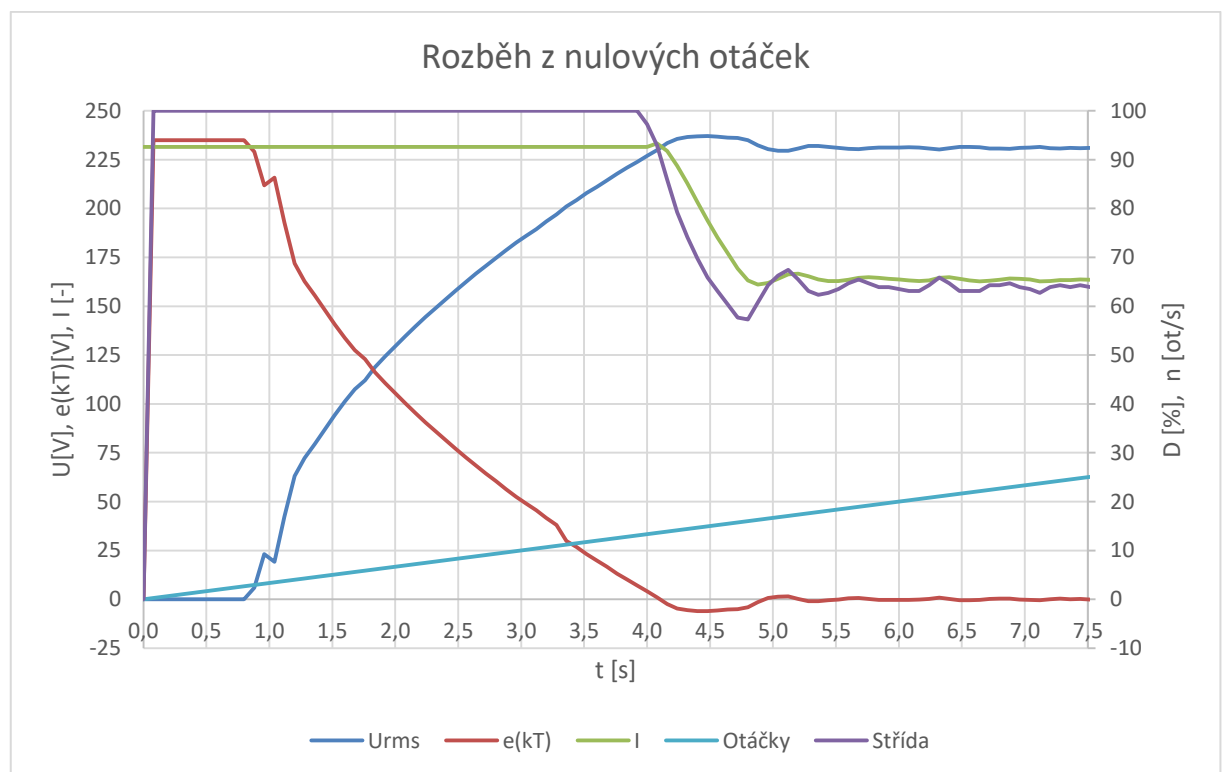
- Doba náběhu t_r (rise time) je dlouhá 760 ms.
- Doba zpoždění t_d (delay time) je čas potřebný pro dosažení 50 % ustálené hodnoty, a trvá 410 ms.

- doba regulace (doba ustálení) t_s (settling time) je čas potřebný k tomu, aby se absolutní hodnota regulační odchylky ustálila pod 5 % požadované hodnoty výstupu, a trvá 860 ms
- Přechod je prakticky bez překmitu, někdy pár voltů, záleží na velikosti integrace při skoku žádané veličiny.

Červená křivka je velikost regulační odchylky, při vypnutí regulace je požadovaná hodnota nulová, proto je regulační odchylka záporná. Proporcionální zesílení má stejný průběh jako regulační odchylka, liší se pouze měřítkem, proto není vykresleno.

Zelená křivka je výstup z integračního členu regulátoru, v prvním cyklu od zapnutí je integrace počítána z plné regulační odchylky, v druhém cyklu je již akční veličina na maximální hodnotě, proto je integrace pozastavena až do jejího snížení. Tři vteřiny trvá doběh po vypnutí regulace. Tento čas je dán magnetickou setrvačností alternátoru. Hodnota pod 25 V je zvlněná z důvodu nízké přesnosti měření.

Druhou možností zapnutí regulátoru je zapnutí regulace při nulových otáčkách a následném roztočení (Graf 15). Rozběhová rampa dynamometru je nastavena na 5s/1000ot. Rozběh tedy trvá 7,5 vteřiny a je znázorněn tyrkysovou barvou. Pro snížení měřítka je rychlost otáčení uvedena v otáčkách za sekundu.



Graf 15 – Rozběh generátoru

Zub na napěťové křivce je způsoben výpadkem měření jedné hodnoty díky nízkým otáčkám.

Další charakteristikou, pravděpodobně nejdůležitější, je reakce na skokovou zátěž. Zátěží byl odporník zapojený do hvězdy, připojovaný přes stykač. Odpor jednoho segmentu odporníku byl 35 Ω. Napětí, proud a výkon byl změřen měřicím kufrem METRA.

Tabulka 14 – Změřené parametry zátěže

Napětí (sdružené)	Proud	Výkon
400 V	5,41 A	3 733 W

Poměrné zatížení generátoru:

$$P_p = \frac{P_z}{P_G} \cdot 100 = \frac{3\,733}{5\,200} \cdot 100 = 71,8\% \quad (53)$$

Kde: P_z – příkon zátěže [W]

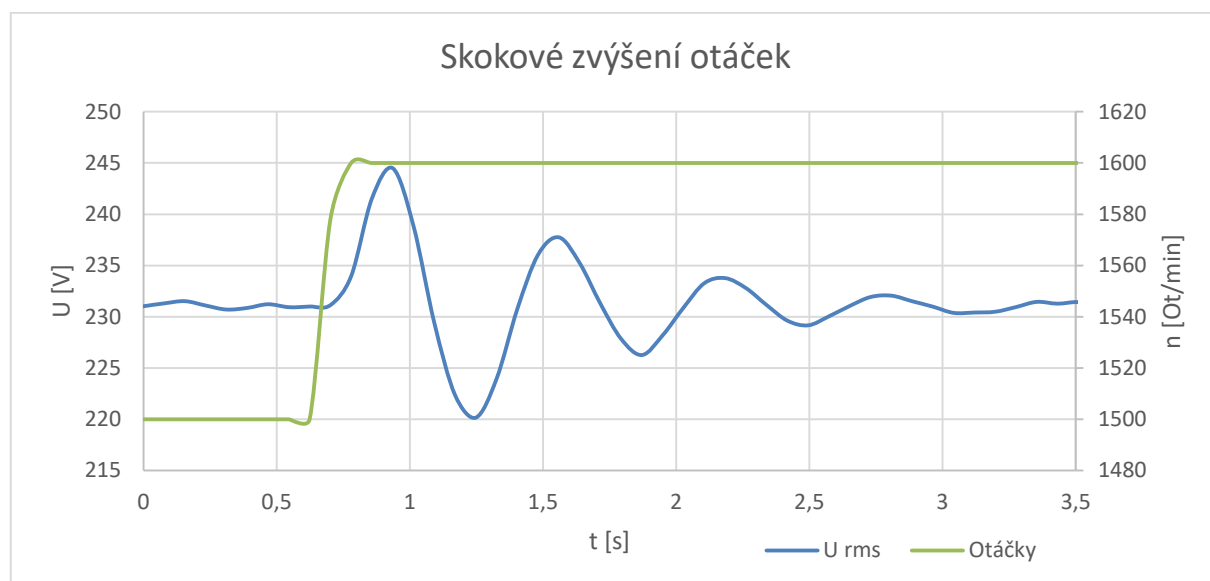
P_G – činný výkon generátoru [W]

Zátěž přesahuje 2/3 jmenovitého výkonu generátoru, její vliv na efektivní hodnotu výstupního napětí je na následujícím grafu.



Graf 16 – Skok zátěže

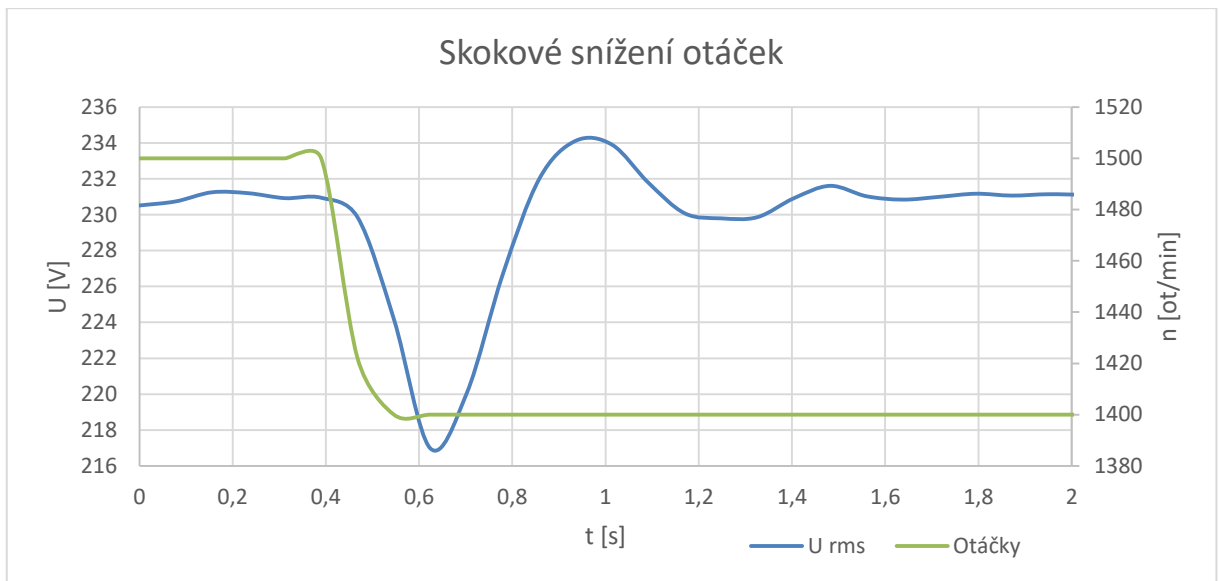
Pokles napětí je necelých 6 V, tj. 2,5 % ze jmenovitého napětí. Celý děj trvá 320 ms, poté se ustálí v nové rovnovážné poloze. Novou rovnovážnou polohu regulátor najde i při prudké změně otáček, viz *graf 17*.



Graf 17 – Skok otáček nahoru

Rampa je nastavena se strmostí 1000 ot/s. Přejchod otáček by tedy měl trvat 0,1s. Křivka zobrazující otáčky je spíše ilustrativní, její přesnou podobu neznáme. Je tvořena otáčkovým regulátorem dynamometru. Při takto prudké změně je překmit výrazně větší, ale k povolené hranici 253 V zbývá dostatečná rezerva. Doznění přechodného děje je zřetelně delší.

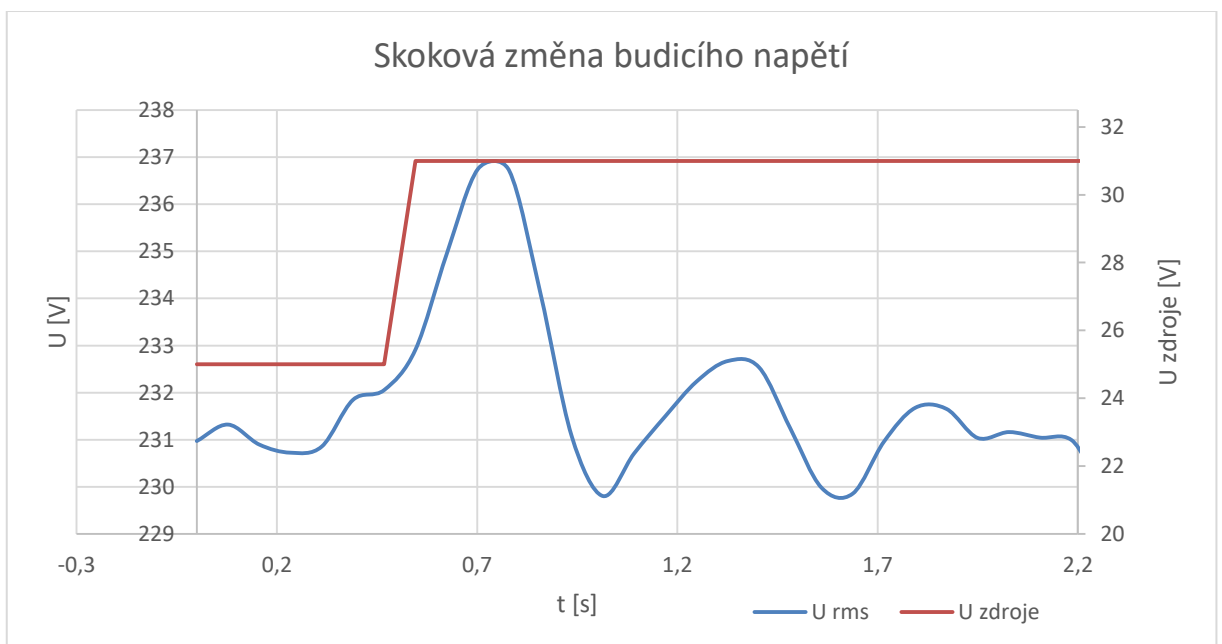
Stejným způsobem bylo testováno snížení otáček. Podpětí je stejné velké, jako přepětí v předchozím grafu, tedy 14 V. Rozdíl je v rychlosti ustálení kmitů, při snížení otáček postačuje poloviční čas. Důvodem je regulovaná soustava, která potřebuje poměrně velkou akční veličinu i při odběru nulového výkonu.



Graf 18 – Skok otáček dolů

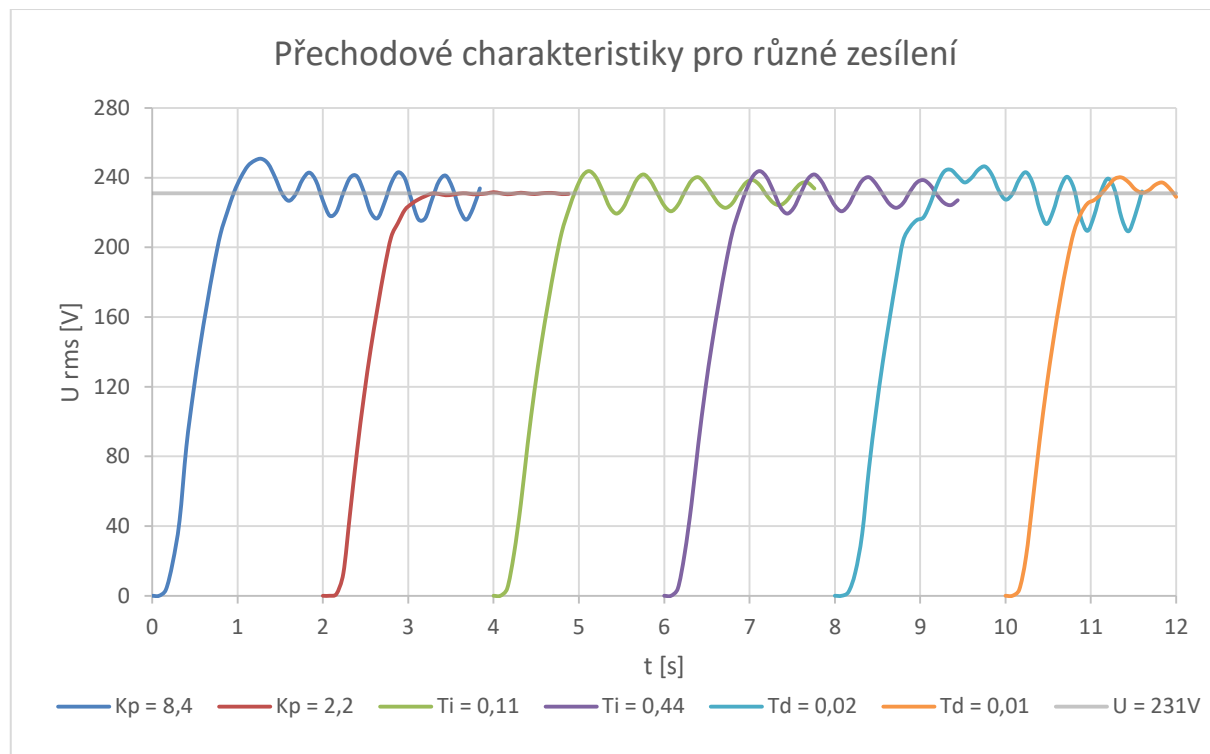
Stejně jako se regulátor musí přizpůsobit změně otáček, musí být schopen pracovat s proměnným budicím napětím. Jak se s tímto dějem vypořádá, je vykresleno na *grafu 19*. Průběh je více méně podobný skokové změně otáček. Rozdíl je v tom, že změna napětí proběhla ruční regulací zdroje budicího napětí. To vnáší jistou nepřesnost a horší opakovatelnost identického průběhu. Překmit je sice nižší, ale to bude pravděpodobně způsobeno pomalejší změnou napětí.

Pro snížení napětí platí stejná závislost jako mezi snížením a zvýšením otáček, proto je zbytečné průběh uvádět.



Graf 19 – Skok napětí zdroje

Poslední zobrazenou charakteristikou v tomto oddílu je změřená přechodová charakteristika pro různé nastavení regulátoru. Jako výchozí nastavení je použito nastavení dle *tabulky 13*. Vždy je změněn pouze jeden parametr a jeho hodnota je uvedena v legendě. Časový průběh je posunut o 2 s, aby se křivky příliš nepřekrývaly.



Graf 20 – Vliv nastavení regulátoru na přechodovou charakteristiku

Šedá čára zobrazuje požadovanou hodnotu, společnou pro všechny regulátory. Jediné ustálené nastavení je při snížení proporcionálního zesílení, všechny ostatní regulátory jsou na mezi stability. Kmity jsou ustálené, nezvětšují se ani nezmenšují. Oranžový průběh ukazuje, že i při drobném zvýšení derivační složky regulátoru se znatelně zhorší stabilita.

Nutno připomenout, že se jedná o regulátor s interakcí konstant a změna proporcionálního zesílení má vliv i na integrační. Při snížení K_p je negativem prodloužená doba regulace bez zjevných výhod oproti přechodové charakteristice při výchozím nastavení.

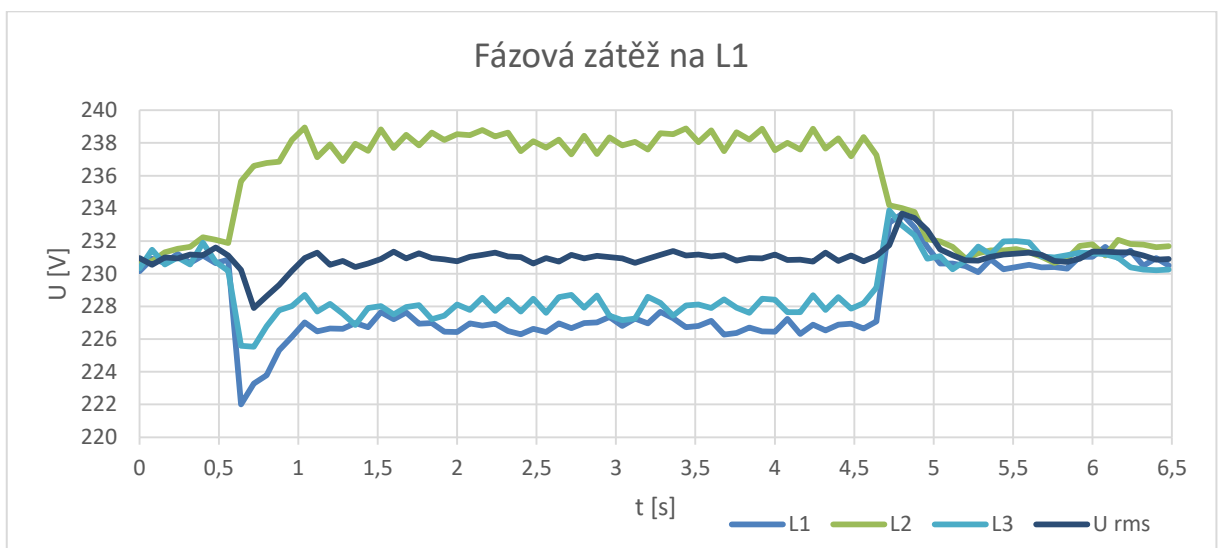
Měřením byla ověřena funkčnost a přesnost regulátoru. V následující tabulce jsou shrnuty zjištěné hodnoty. Tyto parametry jsou spojené s nastavením regulátoru a regulovanou soustavou.

Tabulka 15 – Kvalitativní parametry regulátoru

Parametr	Typická hodnota
Přesnost měření napětí	$\pm 0,5 \%$
Napěťová citlivost regulátoru	0,5 V
Stabilita napětí	$\pm 0,9 \text{ V}$
Stabilita střídá	$\pm 1 \%$
Trvalá regulační odchylka	0 V
Doba zpoždění	410 ms
Doba náběhu	760 ms
Doba regulace (doba ustálení)	860 ms
Překmit	5 V

8.6 Nesymetrická zátěž generátoru

Při symetrickém zatížení byla funkce regulátoru ověřena. Proto bylo uskutečněno měření značně nesymetrické zátěže. Opět byl generátor zatížen odporníkem s ohmickou hodnotou 35Ω přes spínací stykač. Zatížena byla fáze označená jako L1 proti středu hvězdy značeného N. Postupně byly měřeny všechny tři fáze s podobným výsledkem, proto je zobrazen pouze jeden průběh. Měřením byla ověřena symetrie vinutí, pro oba směry otáčení.



Graf 21 – Fázové nesymetrické zatížení

Výpočtový proud a výkon:

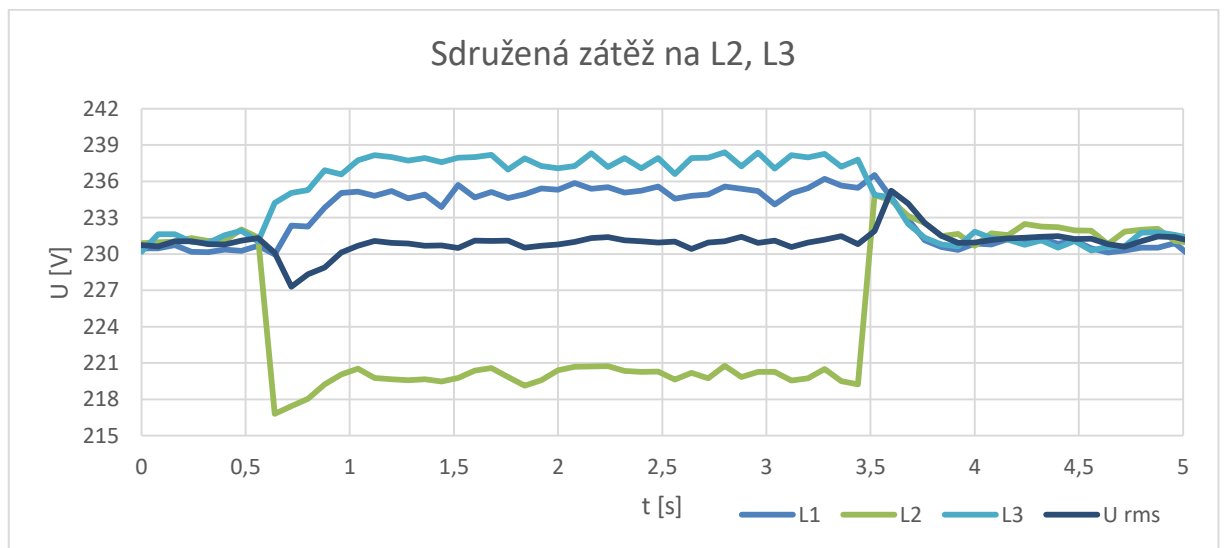
$$I = \frac{U}{R} = \frac{230}{35} = 6,6 \text{ A} \quad (54)$$

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{230^2}{35} \cong 1,511 \text{ kW} \quad (55)$$

Efektivní hodnota sloučených napětí se zátěží trochu poklesla, ale bezprostředně byla doregulována na požadovanou hodnotu. Zajímavější je hodnota v jednotlivých fázích. Místo očekávaného poklesu napětí pouze v zatížené fázi došlo k poklesu dvou fází. Tento děj vysvětluje reakce kotvy. Proud tekoucí do zátěže vyvolá vlastní magnetické pole, které deformuje magnetické pole rotoru. To přestane být rovnoměrné.

Druhou nesymetrickou zátěží jsou dva segmenty odporníku zapojené do série připojené na sdružené napětí fází L2,L3.

Opět byly měřeny všechny tři kombinace pro oba směry otáčení s podobným závěrem. Generátor je navinut symetricky a při změně smyslu otáčení se změní pouze směr rotace vektoru magnetického pole a pořadí fází.



Graf 22 – Sdružené nesymetrické zatížení

Výpočtový proud a výkon:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{400}{70} = 5,7 \text{ A} \quad (56)$$

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{400^2}{70} \cong 2,285 \text{ kW} \quad (57)$$

Reakce kotvy se zde opět výrazně projevuje na velikosti napětí. Napětí fáze označené L3 je největší, přitom je zatíženě stejně jako fáze L2. Napětí fáze L2 je nižší, než při předchozím měření, přitom je zatíženo nižším proudem.

9 Testování v provozu na skutečném generátoru

9.1 Popis generátoru

Dieselelektrická pojízdná centrála je pro všeobecné použití v normálních i těžkých podmínkách s vysokou spolehlivostí a minimálními nároky na údržbu. Motor je vznětový, nepřepřehňovaný, čtyřtákní, řadový tříválec s nepřímým vstřikováním paliva, chlazený vodou o objemu 4,5 l s udávaným výkonem 45 HP (33,56 kW). Spouštění motoru zajišťuje samostatný startér napájený z dvou olověných dvanácti voltových baterií o kapacitě 100 Ah zapojených do série. Baterie jsou dobíjeny samostatným alternátorem. [15] Alternátor pro výrobu výstupního napětí je třífázový s derivačním dynamem jako budičem.

Tabulka 16 – Jmenovité hodnoty elektrických strojů

Synchronní generátor		Derivační dynamo	
Výstupní výkon	28,8 kW	Výstupní výkon	1,2 kW
Zdánlivý výkon	36 kVA	Proud	10,9 A
Otáčky	1500 ot/min	Otáčky	1500 ot/min
Výstupní napětí do hvězdy	400 V	Výstupní napětí	110 V
Výstupní proud	52 A	Výstupní proud	9,1 A
Budicí proud	2,9 – 8,3 A	Vlastní spotřeba	1,8 A
Budicí napětí	25 – 107 V		
Frekvence	50 Hz		
Účinnost	0,8		

Poměr výkonu budiče a výkonu generátoru.

$$P_p = \frac{I_{out} \cdot U}{S} = \frac{9,1 \cdot 110}{36\,000} \cdot 100 = 2,78 \quad (58)$$

Dieselelektrická centrála byla v původní konstrukci pojízdný kolový přívěs, tato byla upravena a posazena na železniční podvozek úzkorozchodné trati o rozchodu 600 mm. Její fotografie je na obrázku 38.

Pro zatížení byly použity topné spirály zapojené do trojúhelníku o celkovém příkonu 10,5 kW připojované stykačem.



Obrázek 38 – Pojízdňá elektrocentrála

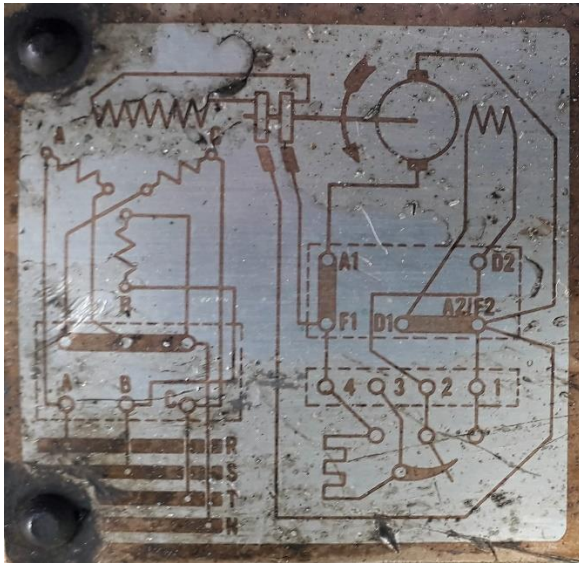
9.2 Původní stav

Po nastartování spalovacího motoru (Příloha L) je nutné ručně nastavit volnoběžné otáčky na naftovém čerpadle. Otáčky jsou nastavovány podle frekvence indukovaného napětí. V současnosti byl regulátor napětí již vyřazen z činnosti a agregát (*Obrázek 39*) fungoval pouze v provizorním ručním režimu. Ten spočíval v ručním nastavení budicího proudu reostatem na požadovanou hodnotu. Proud byl konstantní a nebyl při provozu regulován.



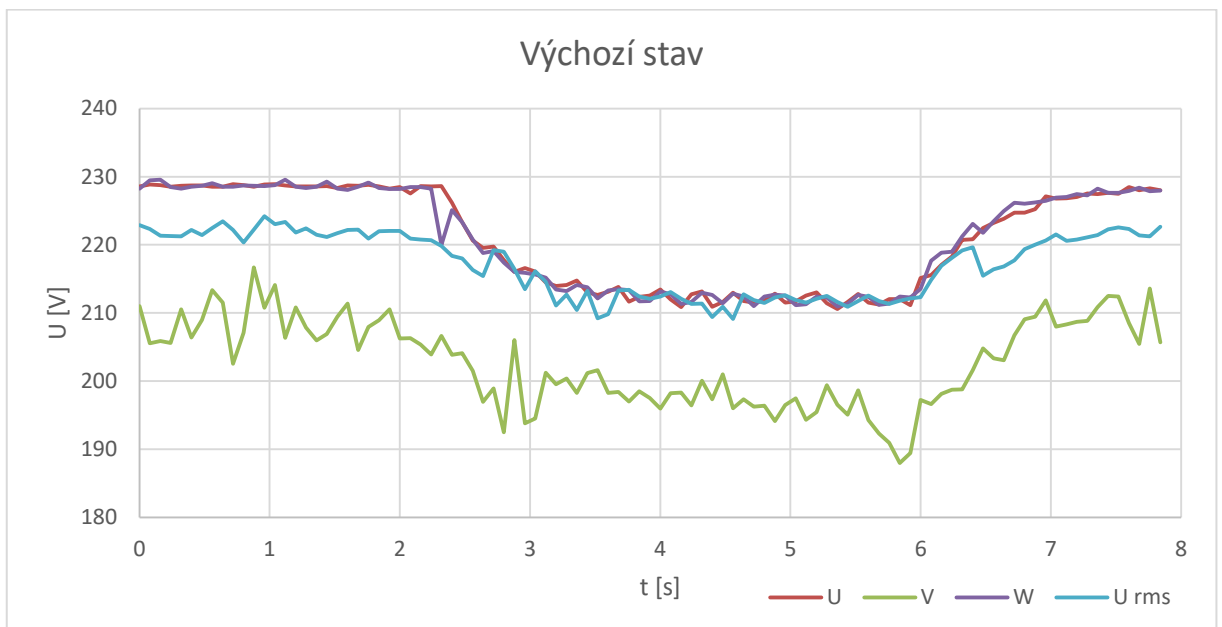
Obrázek 39 – Sestava dynama, alternátoru a spalovacího motoru

Zapojení dynama a alternátoru souhlasilo se zapojením dle štítku motoru. Výřez štítkového zapojení je uveden na *obrázku 40*. Jedinou úpravou bylo nahrazení propojky mezi svorkami A1 a F1 ampérmetrem.



Obrázek 40 – Štítkové zapojení stroje

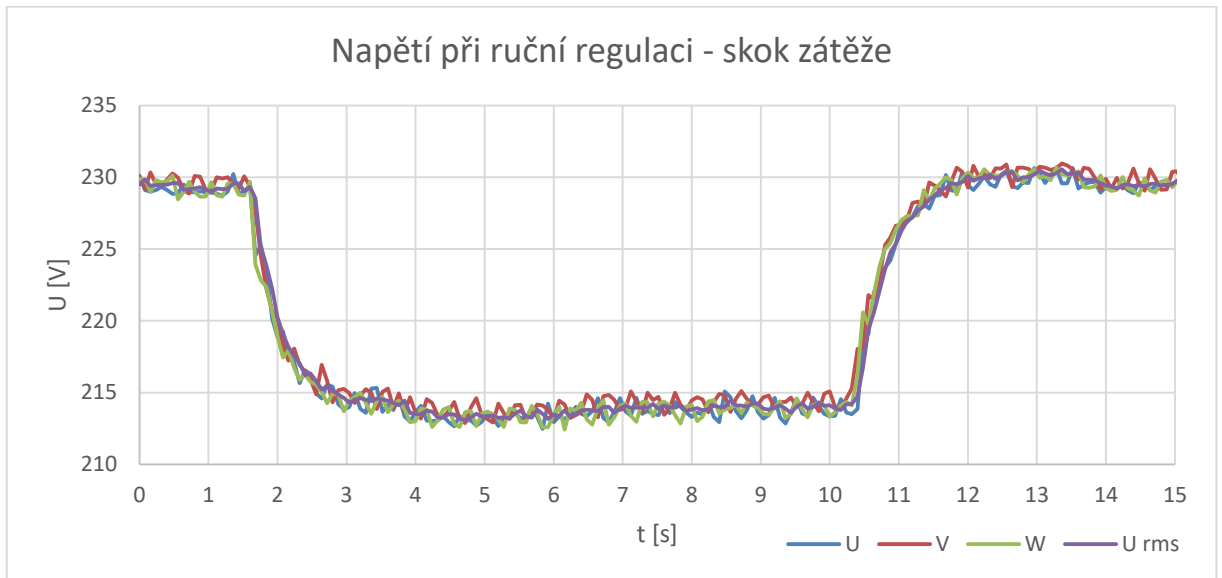
Pro měření výchozího stavu byl použit vyrobený regulátor jako třífázový voltmetr. Připojen byl na původní vedení k regulátoru VR3T. Změřené průběhy napětí jsou na následujícím grafu.



Graf 23 – První měření napětí

První a třetí fáze je identická, druhá fáze je o 20 V slabší. Po zatížení klesne pod 200 V a přestane být započítávána do efektivní hodnoty. Příčinou byl uvolněný spoj na přepínači

provozu. Po odstranění závady bylo napětí měřeno znovu. Zaznamenaný průběh je na následujícím grafu.

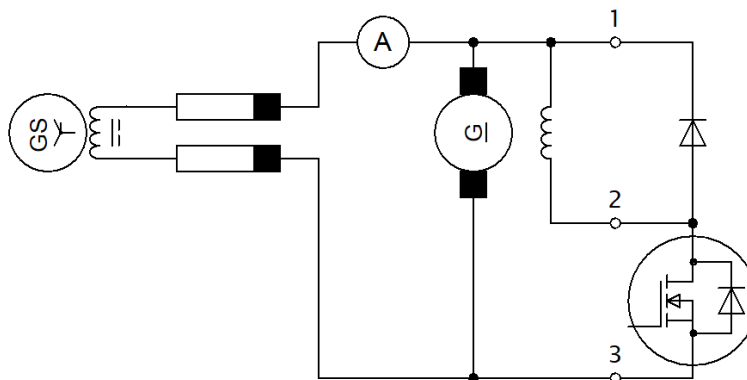


Graf 24 – Měření napětí v ručním provozu

Patrný je pokles napětí o 18 V, který v následujících tři vteřinách po zatížení nastane. Pokud by zátěž ještě více vzrostla, napětí by kleslo pod minimální napětí stanovené v kapitole 4.

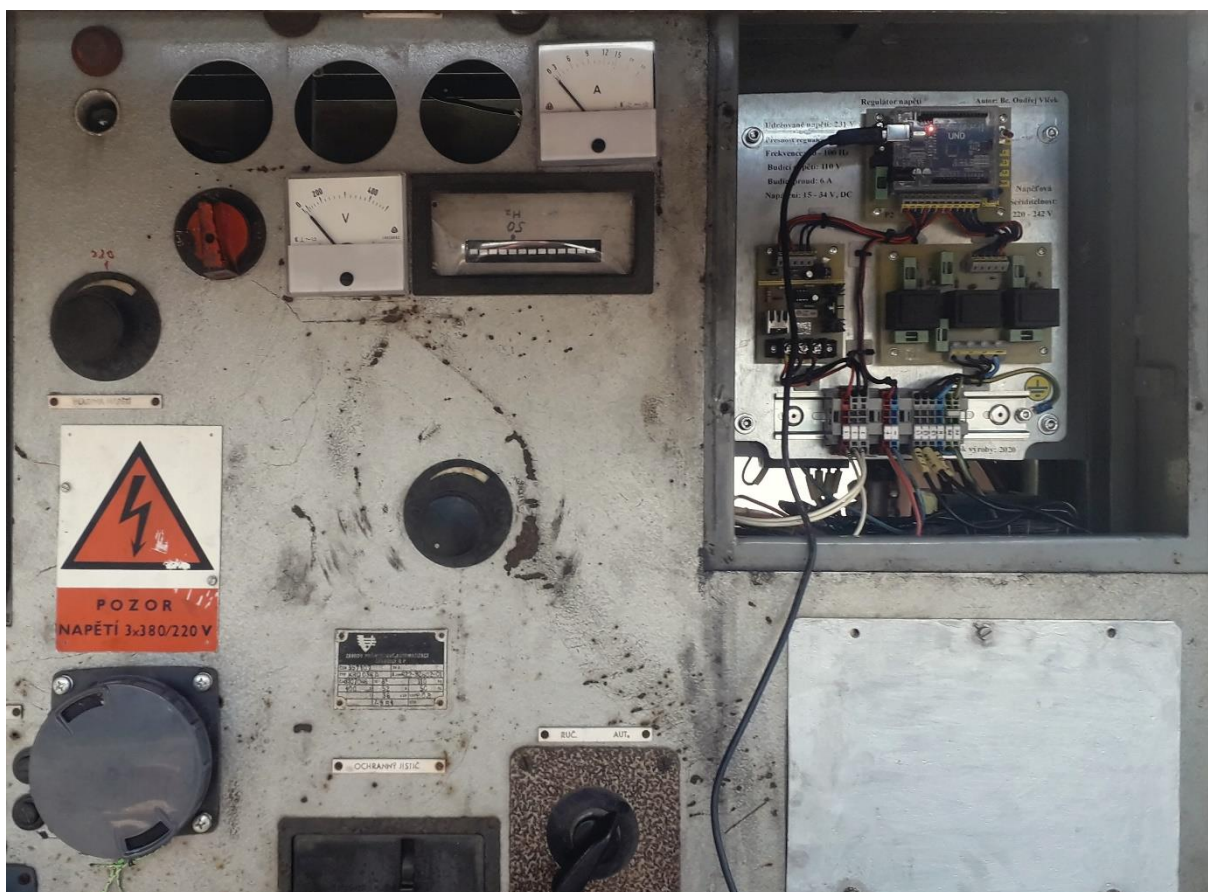
9.3 Integrace regulátoru

Odporová regulace nahrazena vyrobeným regulátorem dle následujícího schématu.



Obrázek 41 – Nové zapojení buzení

Regulátor byl namontován místo regulátoru VR3T. Viz obrázek 42.



Obrázek 42 – Zapojený elektronický regulátor

Pro první spuštění bylo použito nastavení z laboratoře. Rozdílnost soustavy buzené dynamem byla velice výrazná. Při roztočení soustavy došlo k rozkmitání napětí netlumenými kmity. Kmitání bylo natolik velké, že byl rozběh ukončen bez zaznamenání hodnot.

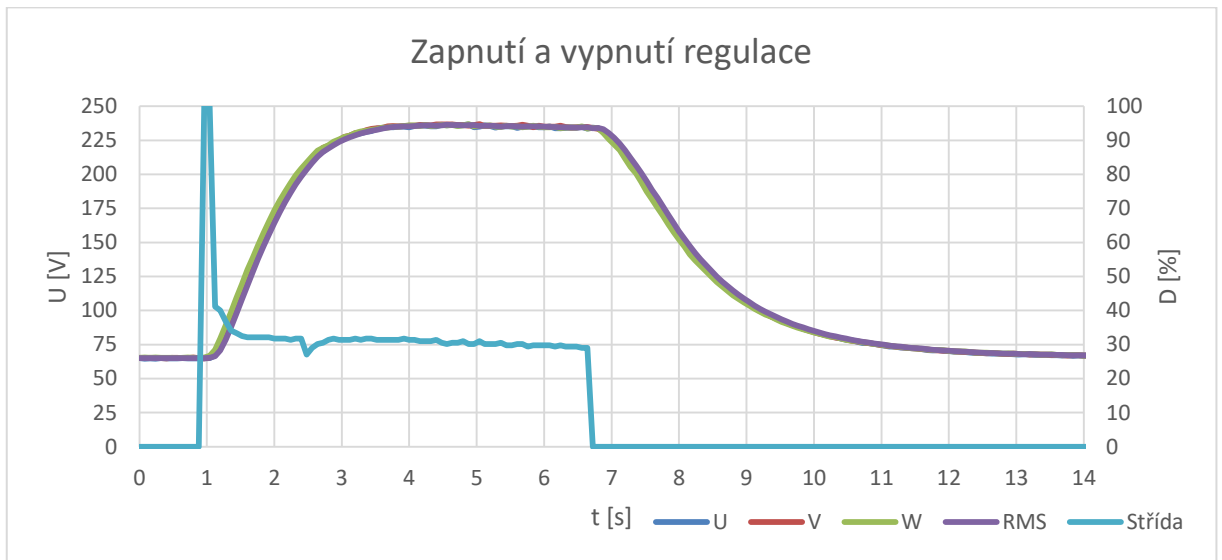
Následovalo hledání vhodného nastavení regulátoru a přizpůsobení soustavě. Soustava má velkou setrvačnost. Proto muselo být zesílení sníženo. Po úpravě konstant regulátoru, dle průběhu charakteristik s ohledem na maximální velikost překmitu 10 V, byla regulace velmi pomalá. Při skokovém zatížení trvalo odstranění regulační odchylky déle jak 10 s. Proto bylo experimentováno s použitím derivačního zesílení a s kladným výsledkem.

Derivační složka regulátoru omezila překmit a stabilizovala výstupní napětí. Tím dovolila značné zvýšení integračního zesílení při zachování překmitu 10 V. Konečné nastavení regulátoru je uvedeno v následující tabulce.

Tabulka 17 – Seřízení regulátoru

Kp	Ti	Td
0,6	0,92	0,40

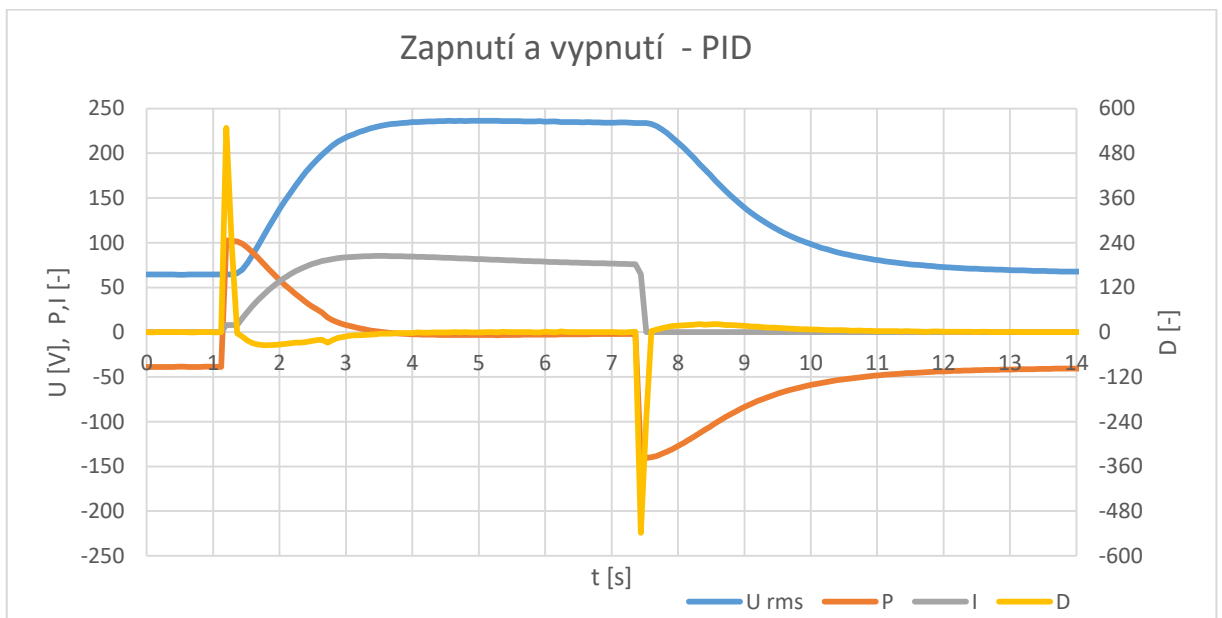
Následující dva grafy zobrazují průběh napětí a dalších veličin po zapnutí regulace.



Graf 25 – Napětí po zapnutí

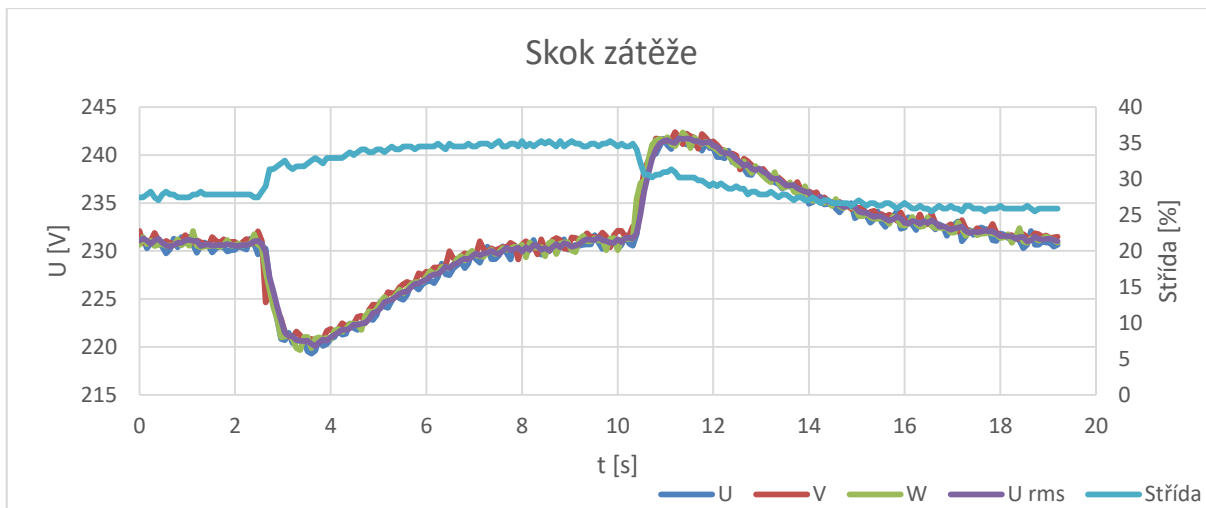
V grafu 25 je vidět souměrnost napětí, vliv remanentního magnetismu derivačního dynama, napětí je 60 V i s nulovou střídou. Překmit střídy je způsoben derivační složkou, stejně tak zub v čase 2,5 s. Při vypínání je zřejmá velká magnetická setrvačnost sestavy. Oproti generátoru v laboratoři je více než dvojnásobná. Důvodem je hlavně setrvačnost budiče.

Následující graf vykresluje průběh dílčích složek PID regulátoru a napětí.



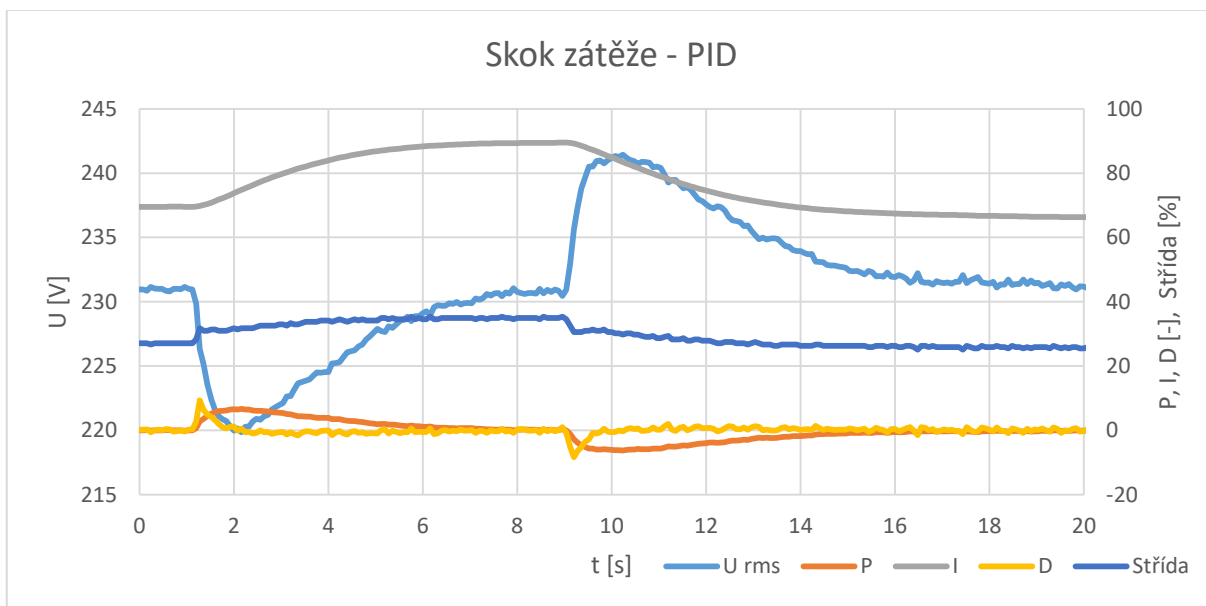
Graf 26 – PID regulátor po zapnutí

Nyní, když je regulace bez nechtěného překmitu, bylo provedeno testování regulátoru při skokové změně zátěže. Opět jsou průběhy vykresleny do dvou grafů.



Graf 27 – Napětí při změně zátěže

Pokles napětí je pouze 10 V a v následujících vteřinách se ustálí na požadované hodnotě, takže zlepšení je jednoznačné. Derivační zesílení okamžitě reaguje na změnu, ale vlivem setrvačnosti napětí i nadále klesá. Při odpojení zátěže vlivem setrvačnosti nastane překmit.



Graf 28 – PID regulátor při změně zátěže

Z důvodů překmitu již nešlo proporcionální a integrační zesílení zvyšovat. Požadavek bezpečnosti na přepětí je důležitější, než přesná napěťová hladina. Ovšem po analýze naměřených dat to vypadá, že derivační zesílení by si zasloužilo ještě přidat. Pravděpodobně by to bylo možné, bez kritických důsledků na stabilitu. Tato změna může být provedena, ale bohužel až po termínu dokončení této práce.

Závěr

První část práce je věnovaná teoretickým znalostem z problematiky alternátorů, jejich vlastnostem a způsobům regulace. Budicí soustavy a regulátory jsou velmi široké téma, do této práce se vešly pouze základy. Uvedeno je jejich rozdělení, vlastnosti a základní regulační sestavy. Zvláštní pozornost je věnována vibračnímu regulátoru VR3T. Právě tento typ používaný od roku 1961 se stal podnětem pro vypracování této práce. Tímto je splněn první bod zadání práce.

Návrh hardwaru nevykazuje žádné závažné nedostatky. Měřicí část fungovala bez jakýkoliv závad. Výkonová také, pouze bylo třeba vyměnit výkonový MOSFET. Ten první byl určen pro vyšší napětí, ale vykazoval příliš velký odpor kanálu v otevřeném stavu. Proto se více zahříval a větší chladič by nebyl vhodný, vzhledem k otřesům a vibracím elektrocentrály. Řídící deska Arduino je konstruována pro úplně začátečníky, proto nebyl problém naučit se vše, co bylo třeba k jejímu zapojení a naprogramování. Jisté problémy vznikly s kvalitou první osazené desky. Při zkušebním měření po zapojení USB se pokazil komunikační převodník a napěťový stabilizátor na desce. Druhá je snad kvalitnější.

Software je základním kamenem celé regulace, jistě by bylo možné napsat jej úplně jinak. Zvolené řešení se ukázalo jako funkční a proto byla navržená struktura programu zachována. Provedeny byly pouze drobnější úpravy, které vyplynuly při testování. Pro alternátor buzený dynamem je rychlost řízení regulátoru dostatečná, pro soustavy s velmi malou setrvačností by stačit nemusela. Většinu času regulátor měří napětí a čeká na konec periody, řešením by bylo počítat PID regulátor mezi každým měřením a efektivní hodnotu počítat průběžně. Vše by se muselo stihnout v čase fázového posunu měřených napětí, aby nebyla úprava kontraproduktivní. Z tohoto požadavku vyplývá i požadavek na správný sled fází. Opačné pořadí sníží rychlost programové smyčky.

Po dokončení návrhu hardwaru a softwaru jsme pokračovali realizací regulátoru napětí, dle návrhu a úspěšným oživením regulátoru v laboratorních podmínkách. Po seřízení a přizpůsobení PID regulátoru soustavě došlo na měření charakteristik. Měření se prokázala rychlost, přesnost a stabilita provozu. Při změně okolních veličin jako změna zátěže, budicího napětí a rychlosti otáčení vždy regulátor dokáže udržet výstupní napětí v požadované toleranci a v krátkém čase se vrátí na požadovanou hodnotu. Díky způsobu výpočtu napětí je odolný proti výpadku fáze, a zároveň si dokáže poradit i se značně nesymetrickou zátěží.

Zapojení regulátoru na elektrocentrále v kapitole 9 také proběhlo úspěšně. Pouze bylo třeba najít správné konstanty regulátoru. Agregát má dlouhé časové konstanty, proto bude jeho dynamika vždy horší, oproti soustavě v laboratoři.

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout funkční regulátor napětí pro synchronní generátor. Existuje mnoho způsobů, jak tento úkol vyřešit. My se rozhodli vydat touto cestou. Zvolená koncepce je plně funkční, schopná provozu i při ztížených podmínkách. Proto můžeme bez zaváhání prohlásit, že cíl práce byl splněn. Zároveň se nebojíme přiznat, že vyrobený prototyp má další možnosti, jak jej dále upravit a vylepšit. Realizovat tyto úpravy nebylo třeba, protože i bez nich regulátor dobře plnil funkci. Mezi uvažované zlepšení by mohlo být například - zvýšení přesnosti použitím A/D převodníku s větším rozlišením. Funkci pro měření napětí a regulátor vykonávat odděleně pro rychlejší zpracování.

Výstupní napětí generátoru vyhovuje normě: *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. Proto je regulátor shledán jako funkční. Závěrem tedy zbývá dodat – zadání diplomové práce včetně všech zásad pro vypracování bylo úspěšně splněno.

Použitá literatura

- [1] PAVELKA, Jiří. *Elektrické pohony*. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 222 s. ISBN 978-80-01-03588-7.
- [2] PAVELKA, Jiří, Zdeněk ČEŘOVSKÝ a Jiří LETTL. *Výkonová elektronika*. Dotisk 3. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2009, 227 s. ISBN 978-80-01-03626-6.
- [3] POSTLER, Ladislav. *Ochranné, řídicí a regulační přístroje v elektrizačních soustavách*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1961.
- [4] POSTLER, Ladislav. *Samočinné přístroje pro generátory*. Praha: Elektrotechnický svaz českomoravský, 1943.
- [5] NOVÁK, Jaroslav. *Electric drives: study material*. Ed. 1st. Pardubice: University of Pardubice, Jan Perner Transport Faculty, 2014. ISBN 978-80-7395-798-8.
- [6] *Regulace buzení synchronního generátoru* [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30280871.pdf>. Bakalářská práce. VUT.
- [7] VYBÍRAL, Bohumil. *Elektromagnetická indukce: Elektrodynamika 3* [online]., 76 [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/indukce.pdf>
- [8] *Návrh generátoru s permanentními magnety* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30283213.pdf>. Bakalářská práce. VUT.
- [9] *Ostrovní režim synchronních strojů* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/9437/1/BP_Martin_Vaclavik.pdf. Bakalářská práce. ZČU.
- [10] SVOBODA, Aleš. Vše o napájení Arduina. In: *Arduino návody* [online]. 2018 [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://navody.arduino-shop.cz/technikuv-blog/napajeni-arduina.html>
- [11] VODA, Zbyšek. *Průvodce světem ARDUINA* [online]. 2. vyd. 2018 [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://www.robotikabrno.cz/docs/arduino/Pr%C5%AFvodce-sv%C4%9Btem-Arduina-CZ.pdf>
- [12] *Měření spotřeby elektrické energie s využitím proudového transformátoru a mikropočítače* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=152526. Bakalářská práce. VUT.
- [13] *Algoritmy pro stanovení efektivní hodnoty napětí* [online]. Brno, 2016 [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=124180 Diplomová práce. VUT.
- [14] Nyquistův–Shannonův vzorkovací teorém. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Nyquist%C5%AFv%E2%80%93Shannon%C5%AFv_vzorkovaci%C3%AD_teor%C3%A9m
- [15] ATM3. In: *Servis dieselcentrál: 2010* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://www.dieselcentrally.cz/stroje/5.html>

- [16] *Garretlab* [online]. Japan, 2016 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: https://garretlab.web.fc2.com/en/arduino/inside/hardware/arduino/avr/cores/arduino/wiring_analog.c/analogRead.html
- [17] MAŠEK, Zdeněk. *Regulace a automatizace: Studijní opora* [online]. Pardubice [cit. 2020-03-18]. Skriptum. UPCE.
- [18] MOSFET vs IGBT: vědomá volba. *Vyvoj.hw* [online]. 2014 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/vykonove-obvody/mosfet-vs-igbt-vedoma-volba.html>
- [19] *Plošné spoje* [online]. PRAHA: ČVUT, 2016 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/60343/mod_resource/content/1/KEO2011-2.pdf
- [20] *Výpočty chlazení elektronických součástí s řešenými příklady*. SOU technické Chotěboř [online]. [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <http://www.souch.cz/dok/e/chlazení.pdf>
- [21] *Arduino Slovakia: Blog pre fanúšikov Arduina a elektroniky* [online]. 2018 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.arduinosllovakia.eu/blog/2018/10/a/d-prevodnik---free-running-mod?lang=cs>
- [22] Language Reference. *Arduino.cc* [online]. Chiasso, Switzerland: Arduino SA, 2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/reference/en>
- [23] NOVOTNÝ, M. a M. SEDLÁČEK. *Měření efektivní hodnoty s využitím algoritmů DSP v prostředí MATLAB* [online]. : 4 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab04/novotny_sedlacek.pdf
- [24] *MATLAB: Ústav počítačové a řídicí techniky* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/majerova/matlab/>
- [25] ATMEL CORPORATION. *Atmel: 8-bit AVR Microcontroller* [online]. 2012 [cit. 2020-1-29]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf>
- [26] MĚŘIČKA, Jiří. *Elektrické stroje*. Praha: ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01020-1.
- [27] TKOTZ, Klaus et al. *Příručka pro elektrotechniku*. 2. doplněné vyd. Praha: Europa – Sobotáles, 2006. ISBN 80-86706-13-3.
- [28] CENELEC. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí: ČSN EN 50160*. Ed. 3. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [29] *Vishay Siliconix: IRF640, SiHF640* [online]. 2015 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/91036/sihf640.pdf>
- [30] *International rectifier: IR2121* [online]. 2004 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IR2121-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c84fa31691
- [31] *Texas instruments: LM136-5.0, LM236-5.0, LM336-5.0* [online]. 2013 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/snvs750d/snvs750d.pdf?&ts=1589630606046>
- [32] *Recom: DC/DC Converter, ROM Series* [online]. 2019 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://recom-power.com/pdf/Econoline/ROM.pdf>

[33] *Recom: DC/DC Converter, ROM Series* [online]. 2019 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://recom-power.com/pdf/Innoline/R-78-0.5.pdf>

[34] *Cosmo: K1010 Series* [online]. [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <http://www.cosmoic.com/object/products/K1010.pdf>

[35] ZNAMIROVSKY, Karel. *Údržba a opravy československých naftových motorů*. 2. vyd, upravené. Praha: SNTL.

[36] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Budící soustavy alternátorů a regulace napětí* [online]. Brno: VUT, 2013 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/OPVK_ePower/MELE/Ucebni_text_MELE.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Mechanická reprezentace zátěžného úhlu [9].....	3
Obrázek 2 – Momentová charakteristika [26].....	4
Obrázek 3 – Provozní stavy synchronního stroje [26].....	7
Obrázek 4 – Regulátor VR3T	10
Obrázek 5 – Zapojení regulátoru VR3T [3].....	11
Obrázek 6 – Soustava hlavního a pomocného budiče [36].....	13
Obrázek 7 – Statická budičí soustava s tyristory [36].....	13
Obrázek 8 – Řídicí deska Arduino Uno R3 (klon).....	16
Obrázek 9 – Deformace sinusovky transformátorem při 400 V	21
Obrázek 10 – Napěťový dělič	21
Obrázek 11 – Zapojení měřicího obvodu.....	22
Obrázek 12 – Zapojení napěťové reference	24
Obrázek 13 – Galvanické oddělení výstupu	26
Obrázek 14 – Zapojení tranzistoru.....	26
Obrázek 15 – Znázornění parazitních kapacit na tranzistoru.....	27
Obrázek 16 – Napětí na řídicí elektrodě G	29
Obrázek 17 – Náběžná napěťová hrana	30
Obrázek 18 – Zapojení napájecího zdroje.....	33
Obrázek 19 – Obvod napájení Arduino Uno [10].....	33
Obrázek 20 – Vstupy a výstupy	34
Obrázek 21 – Zjednodušený vývojový diagram programu.....	35
Obrázek 22 – Vývojový diagram funkce Napeti	37
Obrázek 23 – Vývojový diagram funkce Ref	38
Obrázek 24 – Posloupnost hlavní smyčky	42
Obrázek 25 – Zjednodušené regulační schéma.....	45
Obrázek 26 – Blokové schéma číslicového PID regulátoru bez interakce	46
Obrázek 27 – Blokové schéma „standartního PID regulátoru s interakcí.....	46
Obrázek 28 – Zpětná obdélníková metoda [17].....	48
Obrázek 29 – Ustálení přechodného děje s velkou regulační odchylkou	48
Obrázek 30 – Sériový ploter	54
Obrázek 31 – Testovací pracoviště při vývoji hardwaru a softwaru.....	55
Obrázek 32 – Závislost jmenovitého napětí na šířce mezery [20].....	56

Obrázek 33 – Proudová zatížitelnost plošného spoje [20]	56
Obrázek 34 – Cuprextit připravený k leptání	57
Obrázek 35 – Zapojení laboratorního pracoviště	60
Obrázek 36 – Skutečné laboratorní pracoviště	60
Obrázek 37 – Štítek laboratorního generátoru	60
Obrázek 38 – Pojízdna elektrocentrála	72
Obrázek 39 – Sestava dynama, alternátoru a spalovacího motoru	72
Obrázek 40 – Štítkové zapojení stroje	73
Obrázek 41 – Nové zapojení buzení	74
Obrázek 42 – Zapojený elektronický regulátor	75

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Základní technické údaje regulátoru [35]	11
Tabulka 2 – Přehled základních vlastností Arduino UNO.....	16
Tabulka 3 – IRL640 datasheet	25
Tabulka 4 – Význam kapacit	27
Tabulka 5 – Použité piny a jejich nastavení.....	36
Tabulka 6 – Funkce: double Napeti (unsigned int Vstup)	37
Tabulka 7 – Funkce: double Ref (unsigned int Pin_vstup).....	38
Tabulka 8 – Vliv velikosti zesílení na přechodný děj [17]	47
Tabulka 9 – Koeficienty polynomu	50
Tabulka 10 – Výpočet zesílení a časových konstant [17].....	52
Tabulka 11 – Provozní stavy regulátoru	53
Tabulka 12 – Technické vlastnosti regulátoru	57
Tabulka 13 – Konstanty regulátoru.....	61
Tabulka 14 – Změřené parametry zátěže	65
Tabulka 15 – Kvalitativní parametry regulátoru.....	69
Tabulka 16 – Jmenovité hodnoty elektrických strojů	71
Tabulka 17 – Seřízení regulátoru	75

Seznam grafů

Graf 1 – Vzorkovaný signál	18
Graf 2 – Přenosová charakteristika transformátoru na prázdko	20
Graf 3 – Buzení tranzistoru, výpočet dle rov. (22) a (23)	28
Graf 4 – Antialiasingový filtr	43
Graf 5 – Přenosová charakteristika	50
Graf 6 – Odezva na jednotkový skok střídý	51
Graf 7 – Regulátor s vypočítanými konstantami	52
Graf 8 – Napětí v síti (počet vzorků = 500)	58
Graf 9 – Třífázové měření sítě	58
Graf 10 – Efektivní hodnota na generátoru	59
Graf 11 – Otáčková závislost	61
Graf 12 – Napěťová charakteristika	62
Graf 13 – Stabilita	62
Graf 14 – Skok požadovaného napětí o 231 V	63
Graf 15 – Rozběh generátoru	64
Graf 16 – Skok zátěže	65
Graf 17 – Skok otáček nahoru	66
Graf 18 – Skok otáček dolů	67
Graf 19 – Skok napětí zdroje	67
Graf 20 – Vliv nastavení regulátoru na přechodovou charakteristiku	68
Graf 21 – Fázové nesymetrické zatížení	69
Graf 22 – Sdružené nesymetrické zatížení	70
Graf 23 – První měření napětí	73
Graf 24 – Měření napětí v ručním provozu	74
Graf 25 – Napětí po zapnutí	76
Graf 26 – PID regulátor po zapnutí	76
Graf 27 – Napětí při změně zátěže	77
Graf 28 – PID regulátor při změně zátěže	77

Seznam příloh

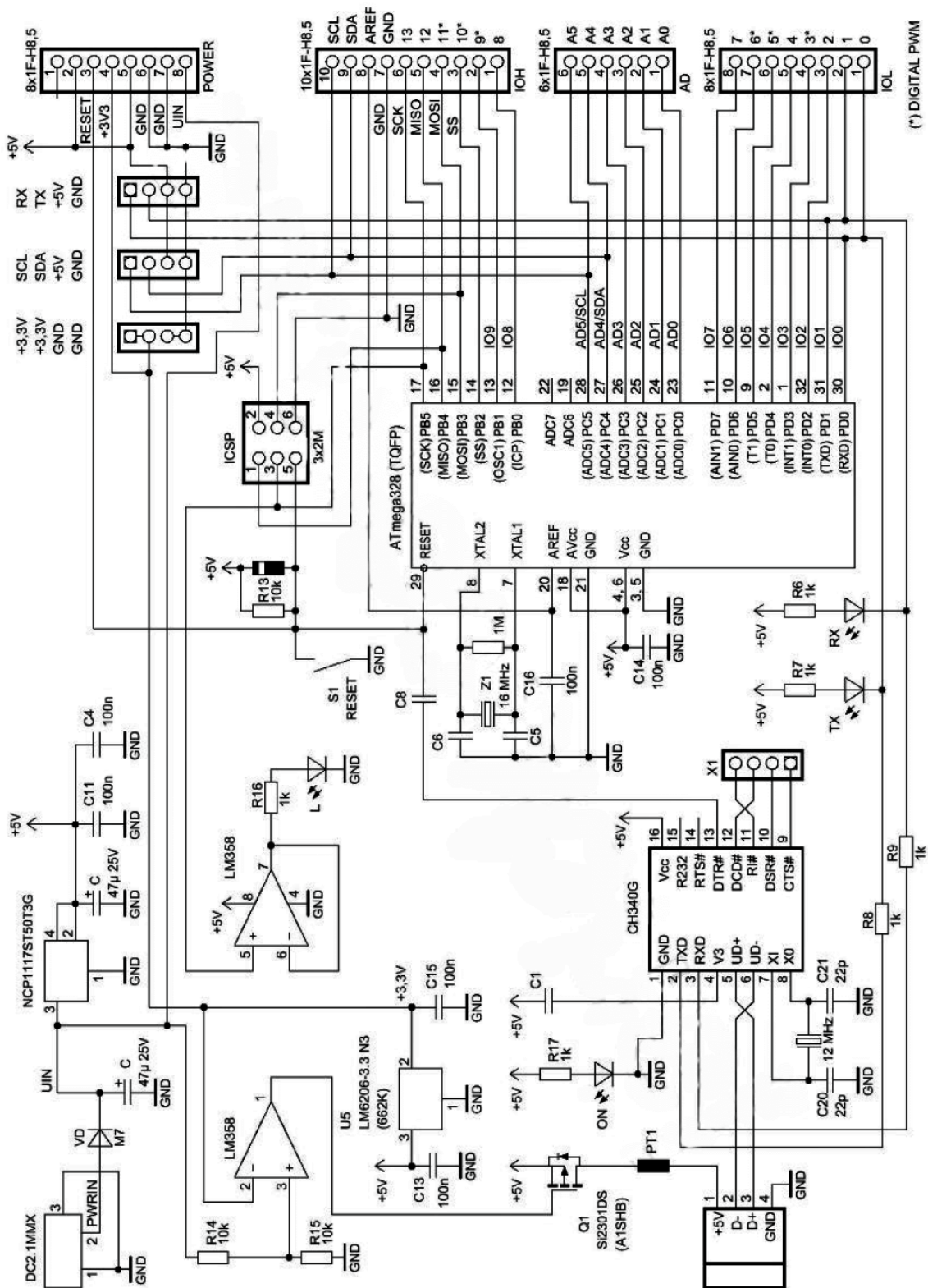
Příloha A – Schéma zapojení klonu Arduino uno R3	89
Příloha B – Výkres montážního plechu	90
Příloha C – Hotový regulátor	91
Příloha D – Schéma zapojení měřicí desky	92
Příloha E – Schéma zapojení řídicí desky.....	93
Příloha F – Schéma zapojení výkonové desky.....	93
Příloha G – Výrobní výkres měřicí desky.....	94
Příloha H – Výrobní výkres řídicí desky	94
Příloha I – Výrobní výkres výkonové desky.....	95
Příloha J – Vnější spoje.....	95
Příloha K – Regulátor VR3T	96
Příloha L – Diesellový motor se setrvačником	96
Příloha M - Příložené CD s elektronickou dokumentací	

Seznam zkratek

A/D	Analogově digitální převodník
AC	Střídavý proud (Alternating current)
DC	Stejnoseměrný proud (direct current)
DP	Dolní propust
DS	Drain-source
EMA	Exponenciální klouzavý průměr (Exponential Moving Average)
EMC	Elektromagnetická komptabilita (Electromagnetic compatibility)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LED	Svitivá dioda (Light-Emitting Diode)
LLG	Logic Level Gate
MCU	Mikrokontrolér
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field effect transistor
PID	Proporcionálně integračně derivační - regulátor
PLC	Programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller)
PSD	Proporcionálně sumačně diferenciální - regulátor
PWM	Pulsně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
RMS	Efektivní hodnota (Root Mean Square)

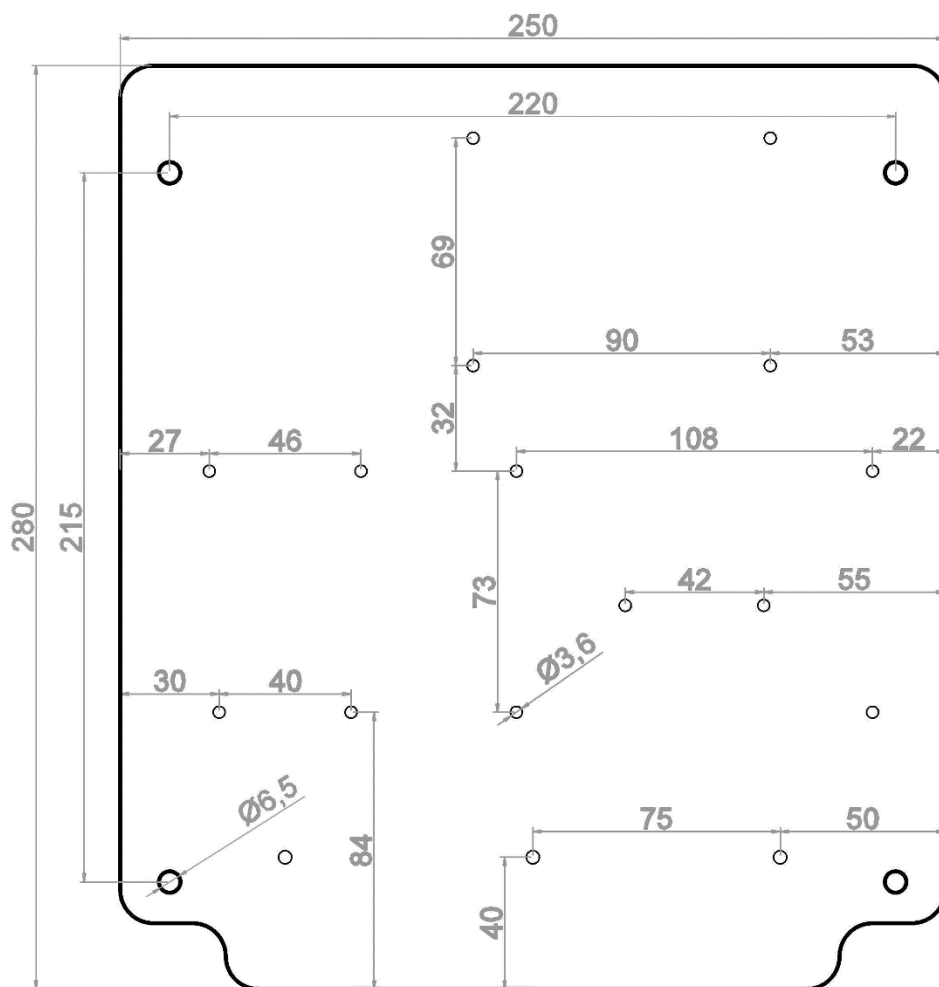
Пřílohy

Пříloha A – Schéma zapojení klonu Arduino uno R3

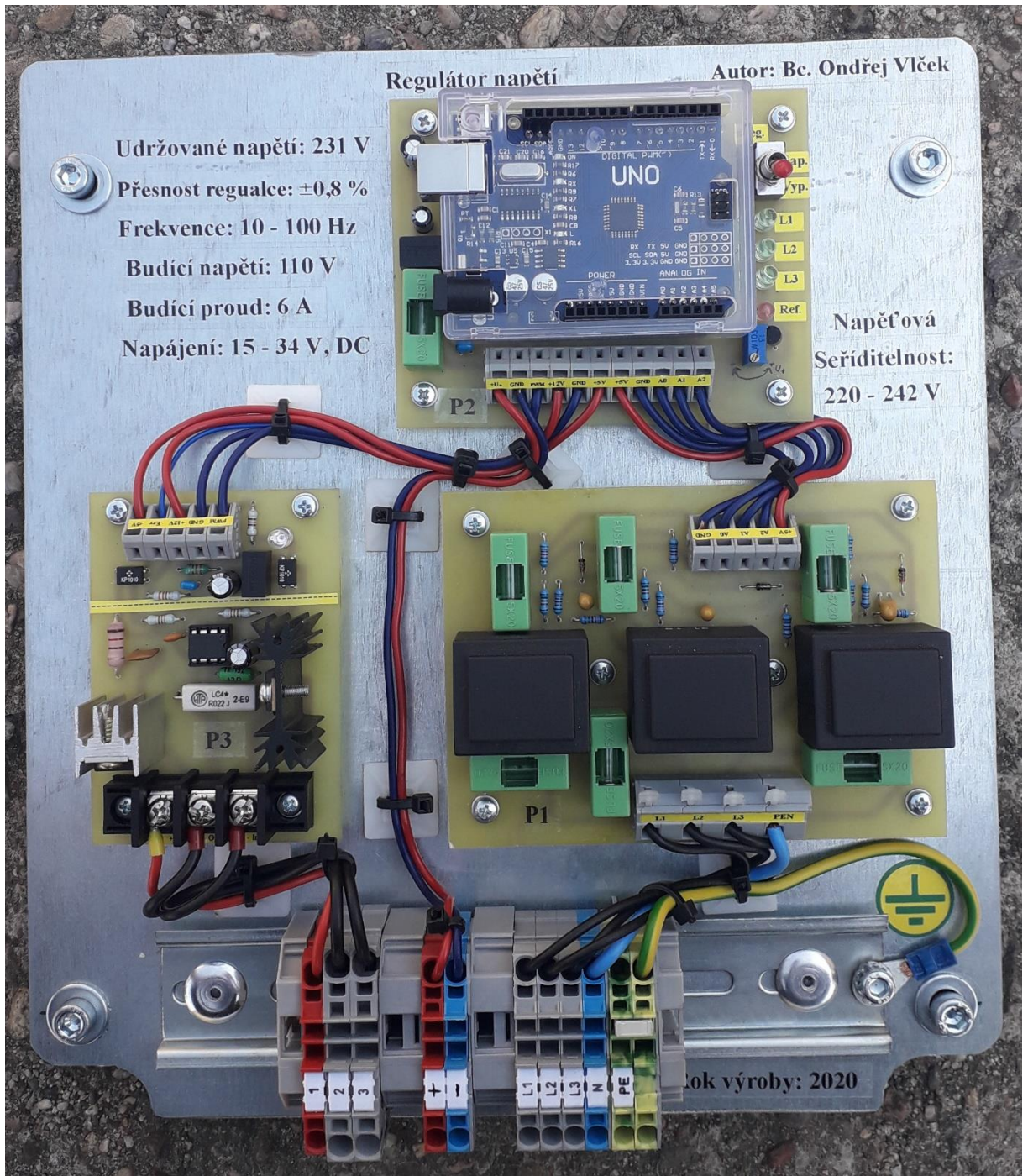


(Zdroj: <https://micro-pi.ru/arduino-uno-rev3-r3-описание-платы/>)

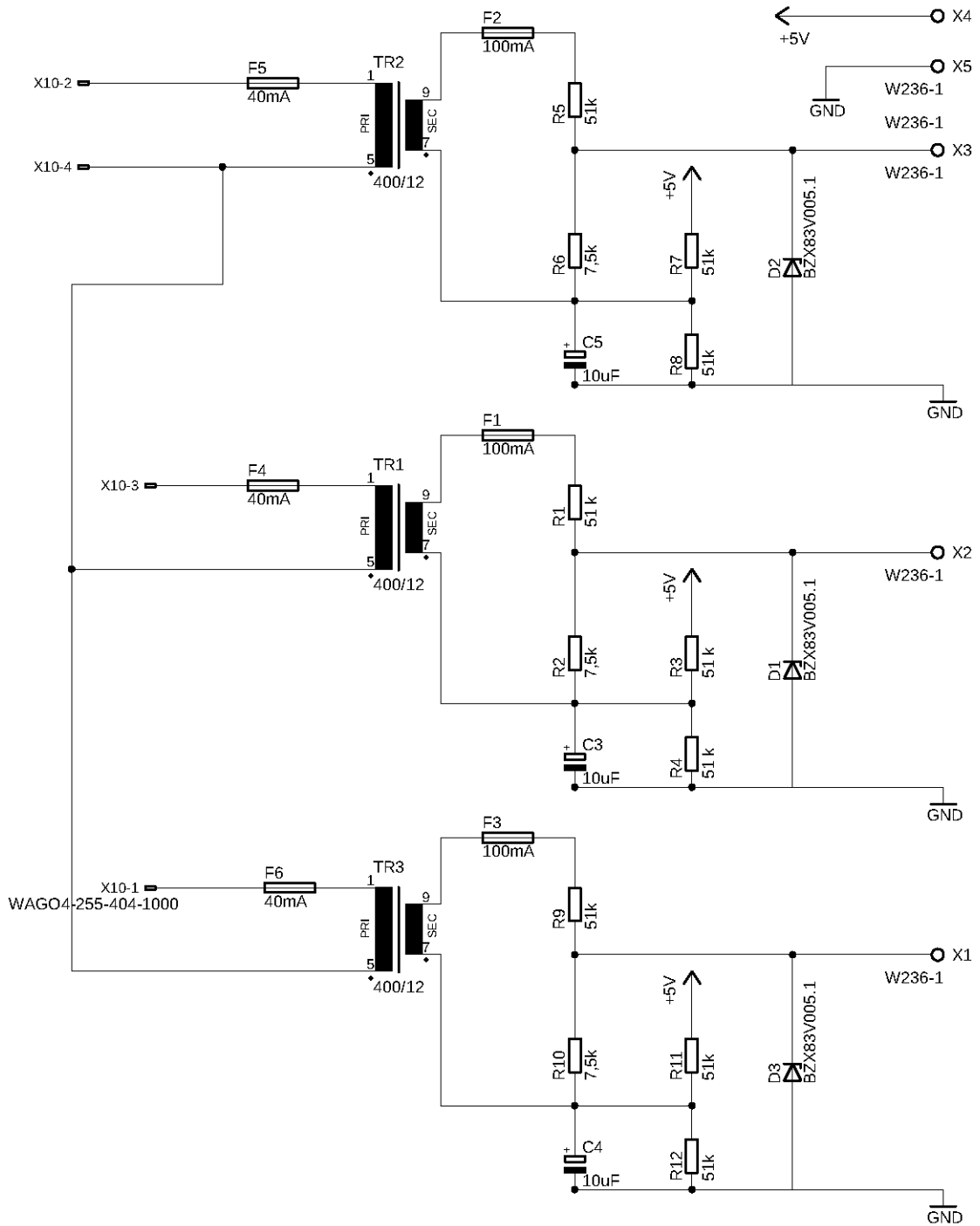
Příloha B – Výkres montážního plechu



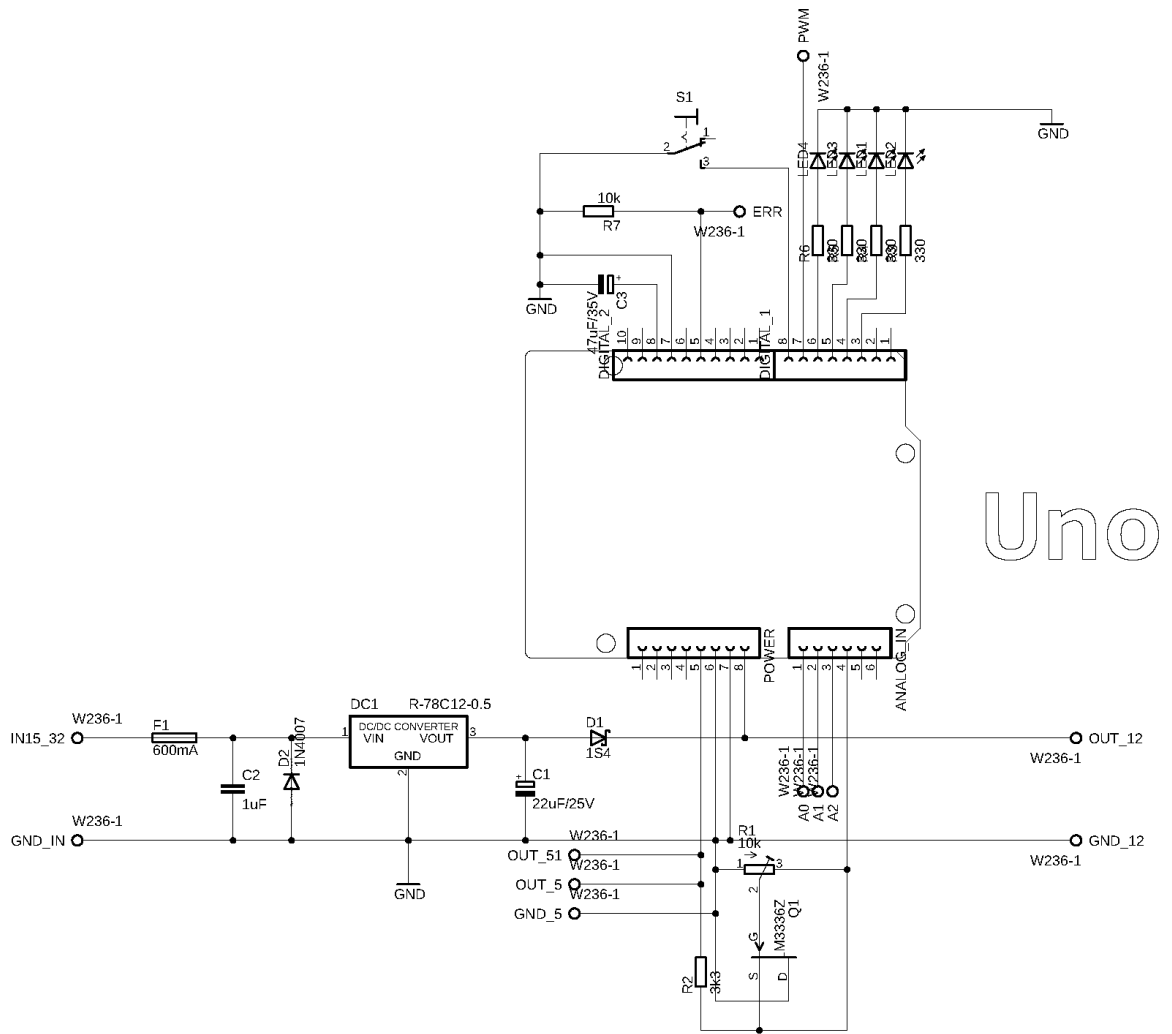
Příloha C – Hotový regulátor



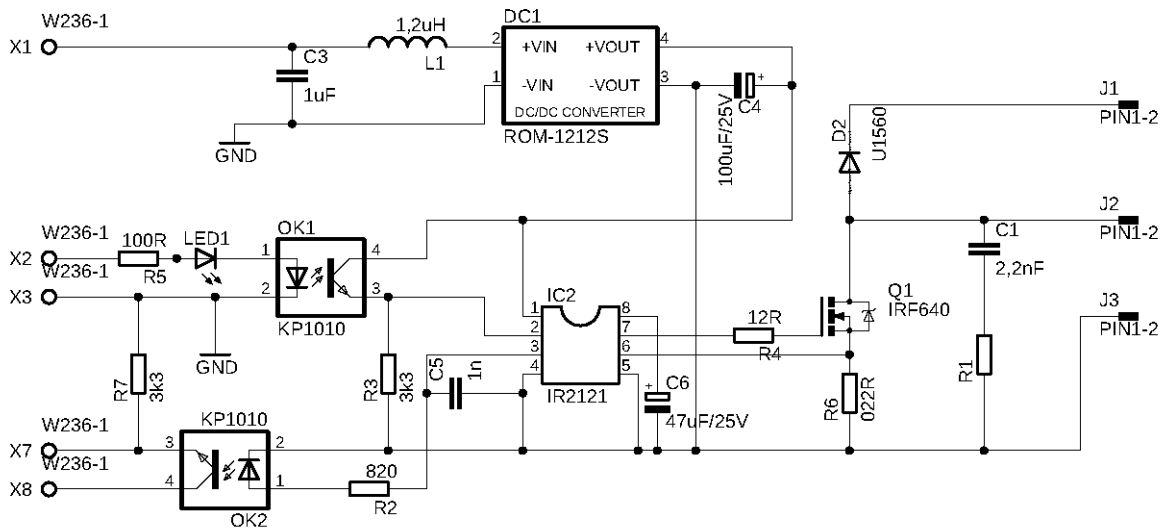
Příloha D – Schéma zapojení měřicí desky



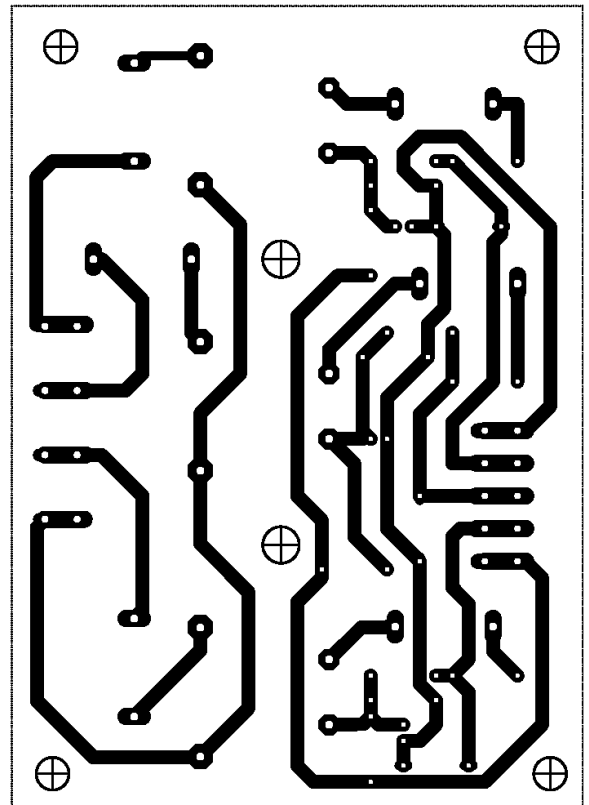
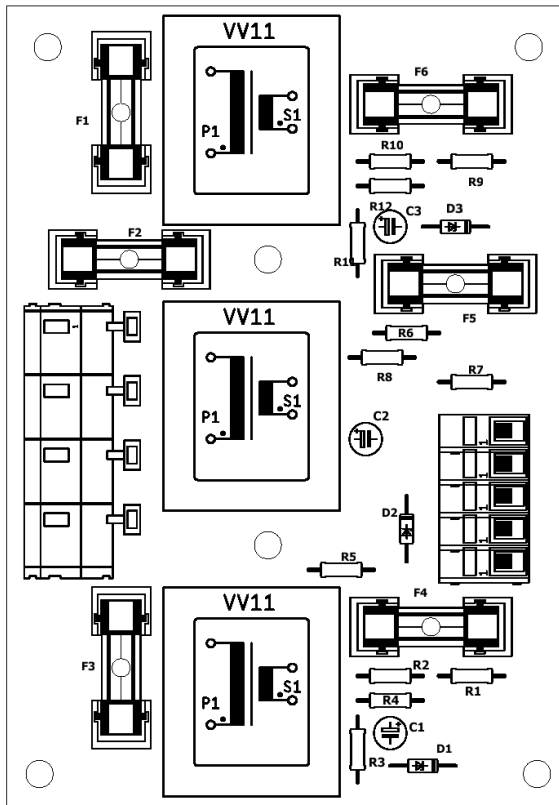
Příloha E – Schéma zapojení řídicí desky



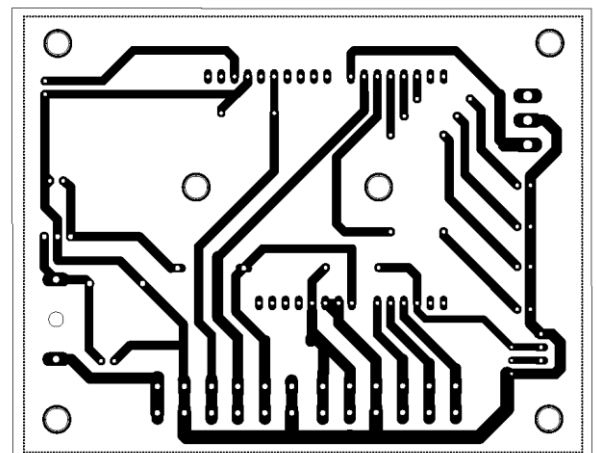
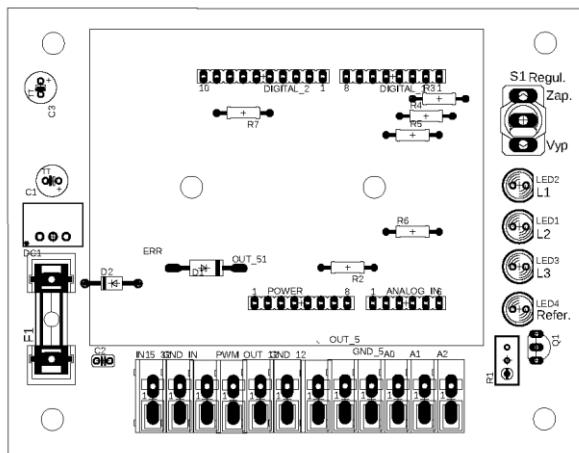
Příloha F – Schéma zapojení výkonové desky



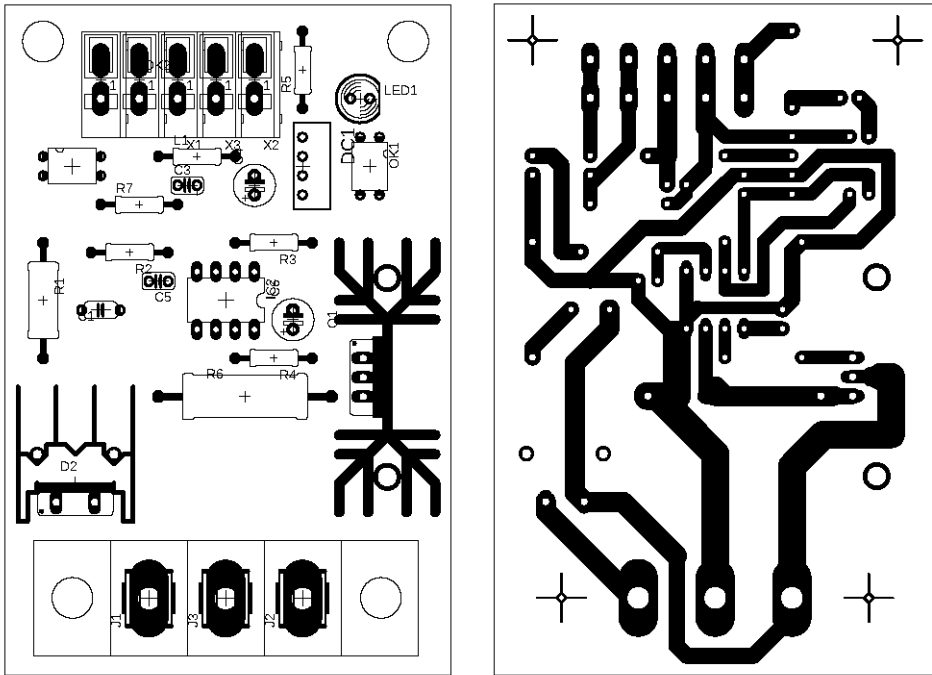
Příloha G – Výrobní výkres měřicí desky



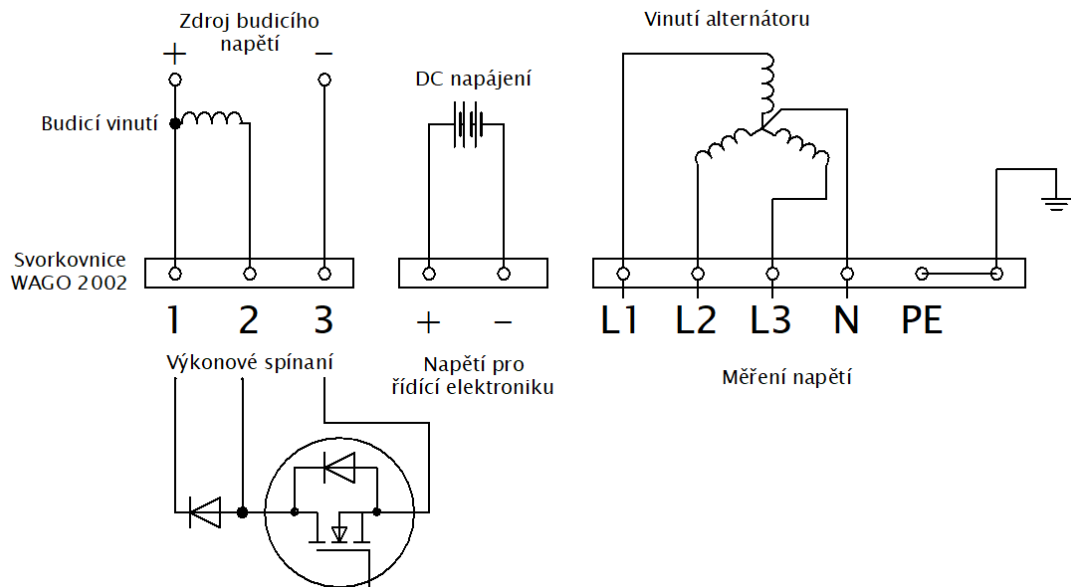
Příloha H – Výrobní výkres řídicí desky



Příloha I – Výrobní výkres výkonové desky



Příloha J – Vnější spoje



Příloha K – Regulátor VR3T



Příloha L – Dieselový motor se setrvačnickem

