

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh a realizace regulátoru dobíjení pro motorový vůz M131.1

Diplomová práce

2020

Cyril Zubalík

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Cyril Zubalík**  
Osobní číslo: **D17544**  
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**  
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**  
Téma práce: **Návrh a realizace regulátoru dobíjení pro motorový vůz řady M131.1**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

### Zásady pro vypracování

- Proveďte rešerši požadavků na regulátor dobíjení pro motorový vůz M131.1 a rešerši možných technických řešení jeho realizace
- Navrhněte regulátor dobíjení pro motorový vůz M131.1
- Zrealizujte regulátor dobíjení pro motorový vůz M131.1
- Proměřte zrealizovaný regulátor z hodnotě jeho vlastnosti

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

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

**Seznam doporučené literatury:**

- Řihák, Michal: Návrh rekonstrukce elektrické zdrojové soustavy motorového vozu M131.1; Bakalářská práce UPa – DfJP – KEEZ, Pardubice, 2018
- Jansa, František: Vozidla elektrické trakce, NADAS, Praha, 1983

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Petr Sýkora**

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce:

**23. dubna 2020**

Termín odevzdání diplomové práce:

**1. června 2020**

L.S.

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

**Ing. Dušan Čermák, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 5. května 2020

## **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., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, 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. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 28. 7. 2020

Cyril Zubalík

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé práce panu Ing. Petru Sýkorovi za poskytnuté materiály, za čas mi věnovaný při práci v laboratoři a za praktické rady směřující k úspěšnému dokončení práce. Děkuji také panu Ing. Zdeňku Maškovi, Ph.D. za pomoc při prvotním oživení regulátoru a užitečné programátorské rady.

Děkuji všem ostatním pracovníkům katedry elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě za vstřícnost, ochotu a kvalitní výuku po celou dobu mého studia.

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací regulátoru dobíjení pro motorový vůz M131.1. První část práce je věnována pojednání o motorovém voze, zdrojové soustavě, vlastnostech této soustavy a základním způsobům regulace derivačního dynama. Druhou částí práce je návrh a výroba nového regulátoru dobíjení, jehož cílem je odstranit nevýhody původního regulátoru a umožnit i některá vylepšení.

## **Klíčová slova**

derivační dynamo, regulátor dobíjení, motorový vůz, mikrokontrolér

## **Title**

Design and realisation of a charging circuit regulator for the diesel railcar Class M131.1

## **Annotation**

This master thesis deals with the design and realisation of a charging circuit regulator for the Class M131.1 diesel railcar. The first part of the thesis examines the arrangement of the railcar, its charging system, the properties of the system and the basic possibilities of regulating a shunt field coil DC generator. The construction of a new charging regulator forms the second part of the thesis. The goal is to eliminate the disadvantages of the original regulator and implement some improvements.

## **Keywords**

shunt field coil DC generator, charging circuit regulator, diesel railcar, microcontroller

# OBSAH

Úvod .....	10
1 Historické souvislosti .....	11
2 Zdroj elektrického proudu a jeho regulace .....	12
2.1 Charakteristika běhu naprázdno: .....	12
2.2 Budící charakteristika .....	13
2.3 Zatěžovací charakteristika .....	13
2.4 Způsoby regulace .....	13
2.5 Vibrační regulátor .....	14
2.6 Elektronické regulátory .....	15
2.7 MAA723 .....	15
2.8 Regulátor GC 11 .....	16
2.9 Regulátor GC 16 .....	17
2.10 Regulátor GC 56 .....	18
3 Zdrojová soustava motorového vozu .....	20
3.1 Hřídel pomocných pohonů .....	20
3.2 Dynamo .....	20
3.3 Regulátor nabíjení .....	21
3.4 Akumulátorové baterie .....	23
4 Návrh nového regulátoru nabíjení .....	24
4.1 Požadavky na nový regulátor nabíjení .....	24
4.2 Jednotlivé komponenty regulátoru .....	24
4.2.1 Arduino NANO .....	24
4.2.2 Snímač proudu .....	25
4.2.3 Napájení regulátoru .....	25
4.2.4 Snímání napětí baterie a dynama .....	25
4.2.5 Výstupní prvek .....	25
4.2.6 Nulovací dioda buzení .....	25
4.2.7 Chlazení .....	26
4.2.8 Kompenzace nabíjecího napětí .....	26
4.3 Struktura programu regulátoru .....	26
4.3.1 PI regulátor .....	26
4.3.2 Snímání napětí a proudu .....	27
4.3.3 Regulace napětí a omezení proudu .....	27
4.3.4 Ochrany .....	27

4.4	Shrnutí hardwaru.....	28
4.5	Shrnutí softwaru.....	28
5	Deska snímače proudu a deska regulátoru .....	29
5.1	Deska snímače proudu .....	29
5.1.1	Vyhlazovací kondenzátory: .....	31
5.1.2	Světelné diody a předřadné rezistory: .....	31
5.1.3	Pojistka .....	31
5.1.4	Konektory .....	32
5.1.5	Shrnutí .....	32
5.1.6	Návrh a fotografie hotové desky .....	33
5.2	Deska regulátoru .....	34
5.2.1	Napájecí stabilizátory .....	34
5.2.2	Chlazení stabilizátorů .....	36
5.2.3	Vstupní přepět'ová a nadproudová ochrana.....	36
5.2.4	Externí reference napětí.....	36
5.2.5	Děliče napětí.....	37
5.2.6	Snímací rezistor proudu.....	38
5.2.7	Měření teploty akumulátor .....	38
5.2.8	Indikační světelné diody.....	39
5.2.9	Výstupní tranzistor a nulovací dioda buzení .....	39
5.2.10	Arduino NANO .....	41
5.2.11	Konektory .....	42
5.2.12	Návrh a fotografie hotové desky.....	43
5.3	Zapojení regulátoru .....	44
6	Popis programu regulátoru .....	45
6.1	Regulační schéma.....	45
6.2	Ladění regulátoru .....	45
6.3	Vývojový diagram.....	45
6.4	Knihovna PID_v1 .....	46
6.5	Popis zdrojového kódu .....	46
7	Měření regulátoru v laboratoři.....	54
7.1	Schéma zapojení.....	54
7.2	Měřicí pracoviště.....	55
8	Měření regulátoru na motorovém voze .....	56
8.1	Měřicí pracoviště.....	58
8.2	Start motoru.....	59
8.3	Volnoběžné otáčky.....	62



8.4	Zvýšené otáčky.....	63
8.5	Změna otáček .....	64
8.6	Zatížení.....	66
8.7	Odlehčení .....	68
8.8	Měření teplotní kompenzace .....	69
8.9	Závěr měření .....	69
	Závěr.....	71
	Seznamy .....	72
	Seznam literatury.....	72
	Seznam tabulek.....	73
	Seznam obrázků .....	74
	Seznam grafů .....	75
	Seznam příloh.....	76

## ÚVOD

Železniční vozidlo je soubor mnoha komponent, které zajišťují jeho bezpečný a spolehlivý chod. Jsou to základní mechanické konstrukční prvky, jako je rám vozidla, dvojkolí, skříň, brzdy. V případě hnacích vozidel též pohonné soustrojí, v případě osobních vozů zařízení pro pohodlné cestování jako je WC, osvětlení, vytápění a mnoho dalších zařízení. Jedním z těchto nejdůležitějších zařízení je zdrojová soustava, sestávající ze zdroje elektrické energie, který zásobuje vozidlo a z úložiště této energie, která vozidlo zásobuje v případě, že zdroj energie nepracuje. Tímto úložištěm je nejčastěji akumulátor. Požadavky na zdrojovou soustavu jsou v celku náročné. Musí dodávat potřebné množství elektrické energie při různých provozních stavech, měnícím se zatížení, musí také dobíjet akumulátor a k tomu je potřeba tuto soustavu přesně regulovat.

Má práce se věnuje regulaci stejnosměrného derivačního dynama v motorovém voze M131.1454. Během své činnosti v železničních spolcích a pracích na vozidlech jsem se seznámil s různými způsoby regulace. V případě nejstarších vozidel se jedná o mechanické vibrační regulátory, ve kterých proti sobě pracují elektrické a mechanické síly. Bohužel se stárnutím mechanických prvků (pružiny, planžety) je třeba věnovat regulátorům pozornost, čistit kontakty a častěji je seřizovat. V novějších vozidlech, která vznikla v období použitelných polovodičů, je situace znatelně lepší, nicméně již začíná být problém s náhradami vadných součástí, neboť se již nevyrábějí. Nejmodernější koncepcí je použití mikroprocesorových systémů, čemuž se chci ve své práci věnovat. Mým úmyslem je zkonstruovat tento regulátor a instalovat jej do zmíněného motorového vozu jako náhradu staršího elektronického regulátoru, který nahradil ještě starší elektro-mechanický. Ale vzhledem k velké podobnosti zdrojových soustav různých historických železničních vozidel bych v budoucnu chtěl regulátor tohoto typu aplikovat i do dalších vozidel v případě, že se provozně osvědčí.

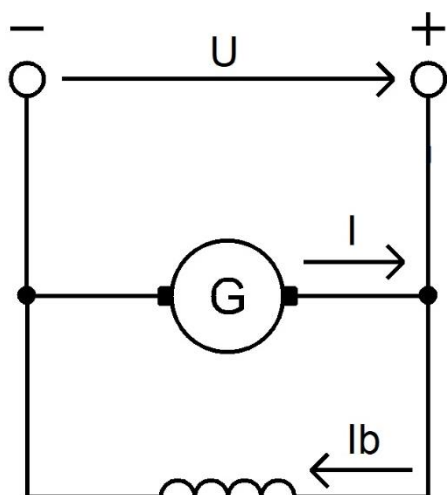
# 1 HISTORICKÉ SOUVISLOSTI

Motorový vůz M131.1454 byl vyroben roku 1955 v kooperaci kopřivnického závodu Tatra, n.p a Vagónka Tatra, n.p. ze Studénky. V Kopřivnici probíhala výroba pohonného agregátu a ve Studénce výroba rámu, skříně a kompletace motorového vozu. Technicko-policejní zkoušku absolvoval vůz na trati Studénka-Hranice na Moravě dne 14. 3. 1955. Během služby pod hlavičkou Československých státních drah sloužil v různých depech na celém území bývalého Československa. Po vyřazení z provozu se v 80. letech přesunul na pomník v severočeském městě Rumburk, odkud jej na začátku 21. století, jako holou skřín bez pohonného agregátu, elektroinstalace atd., zakoupil pan Foltýn z Krnova. Ve svých dílnách OLPAS Krnov provedl rozsáhlou a nákladnou renovaci. Bohužel se společnost v roce 2015 dostala do insolvence. Díky tomu se našemu sdružení Kroměřížská dráha z.s. podařilo jej odkoupit a nyní motorový vůz provozujeme na nostalgických vlacích.

Pod naší hlavičkou vůz absolvoval v zimě let 2017/2018 generální opravu spalovacího motoru a mimo jiné také dvě opravy nabíjecího dynama, kterému se budu ve své práci věnovat. První oprava v roce 2015 obnášela převinutí stroje ve společnosti MEZOPRAVNA spol. s.r.o. Vsetín. Druhá oprava realizovaná z jara letošního roku, tedy 2020, byla důsledkem vůle mezi řemenicí a hřídelí, kdy došlo postupně k úplnému zničení drážky a klínku. Bylo potřeba vyvázat kotvu, hřídel vyvařit, vyfrézovat novou drážku a vše vyvážit. Opravu provedlo ČMŽO Přerov.

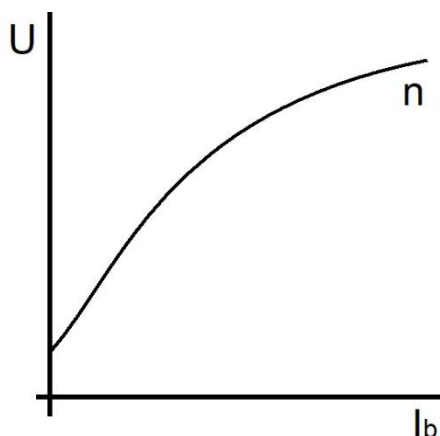
## 2 ZDROJ ELEKTRICKÉHO PROUDU A JEHO REGULACE

V minulosti bylo nejčastějším zdrojem elektrické energie v motorových vozidlech stejnosměrné derivační dynamo, jehož charakteristiky a způsob regulace jsou velmi vhodné pro tento účel. Regulace výstupního napětí se děje změnou velikosti proudu protékajícího budícím vinutím. Výhodou derivačního dynama je malý sklon zatěžovací charakteristiky v pracovní oblasti, z čehož plyne malá změna napětí při velké změně zatížení a zároveň odolnost proti zkratu, při kterém se samo odbudí.



Obrázek 1- Derivační dynamo

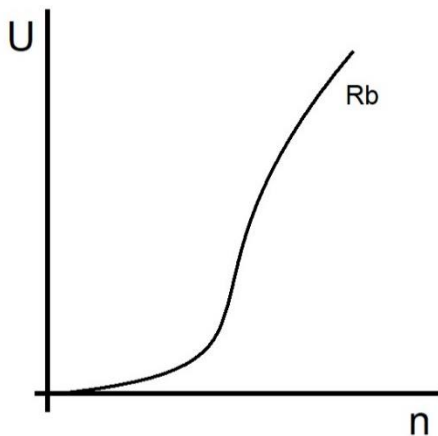
### 2.1 Charakteristika běhu naprázdno



Graf 1- Charakteristika běhu naprázdno

Charakteristika nám udává změnu velikosti výstupního napětí v závislosti na proudu protékajícího budícím vinutím při konstantních otáčkách stroje.

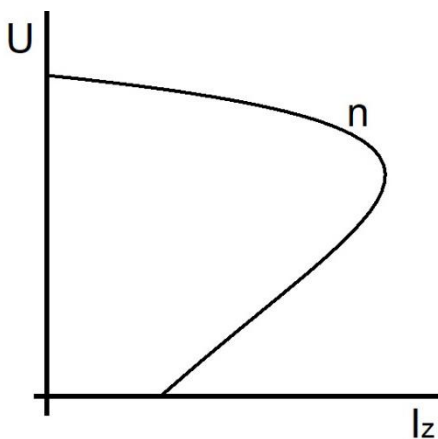
## 2.2 Budící charakteristika



Graf 2 - Budící charakteristika

Charakteristika nám udává změnu velikosti výstupního napětí v závislosti na otáčkách stroje při konstantním odporu budícího vinutí.

## 2.3 Zatěžovací charakteristika



Graf 3 - Zatěžovací charakteristika

Charakteristika nám udává změnu velikosti výstupního napětí v závislosti na zatěžovacím proudu při konstantních otáčkách stroje.

## 2.4 Způsoby regulace

Základní požadavky na regulaci derivačního dynama ve zdrojové soustavě jsou dva. Základním druhem regulace je regulace proudová, kdy musí dojít k omezení výstupního proudu, aby nedošlo k přetížení stroje či patřičně dimenzované elektroinstalace. Druhým požadavkem, jenž je podřízen prvnímu, je regulace napěťová, kdy dochází k regulaci

na konstantní výstupní napětí. Oba druhy regulace musejí pracovat v celém rozsahu pracovních otáček stroje.

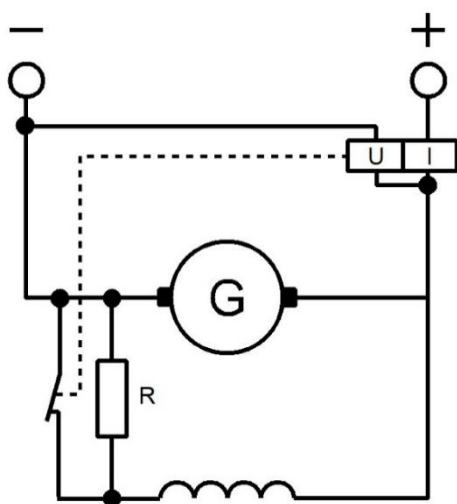
V případě nabíjení akumulátorové baterie po startu motoru nastává následující stav:

Elektrický startér během startu odebere značné množství energie uložené v akumulátoru. Tuto energii ihned po startu vrací nabíjecí dynamo zpět, pracuje v maximálním zatížení, a je tedy potřeba proudové omezení v regulátoru. Po částečném dobití akumulátoru začne nabíjecí proud klesat, regulátor přejde z regulace na konstantní proud na regulaci konstantního napětí, které nadále udržuje, a proud klesá až k nule. To je stav, kdy je akumulátor plně nabit. energii pro vozidlo (osvětlení, větrání apod.) po dobu běhu spalovacího motoru dodává dynamo.

Důležitou součástí každého regulátoru nabíjení je zařízení, které obvody regulace a dynamo odpojí od akumulátoru v případě, že motor neběží. Jinak by totiž dynamo začalo pracovat jako motor. Dříve se používala mechanická napěťová relé, které připojila výstup z dynama na akumulátor, když napětí dynama stouplo nad napětí akumulátoru. Později s rozvojem polovodičů se tímto zařízením stala dioda, která se používá dodnes. Bohužel nevýhodou diody je úbytek napětí, který se musí v regulačním procesu kompenzovat, nejnázne tak, že čidlo napětí pro regulátor se umístí mezi diodu a akumulátor.

## 2.5 Vibrační regulátor

Nejstarším a v minulosti velmi rozšířeným způsobem regulace byl mechanický vibrační regulátor.



Obrázek 2 - Schéma vibračního regulátoru

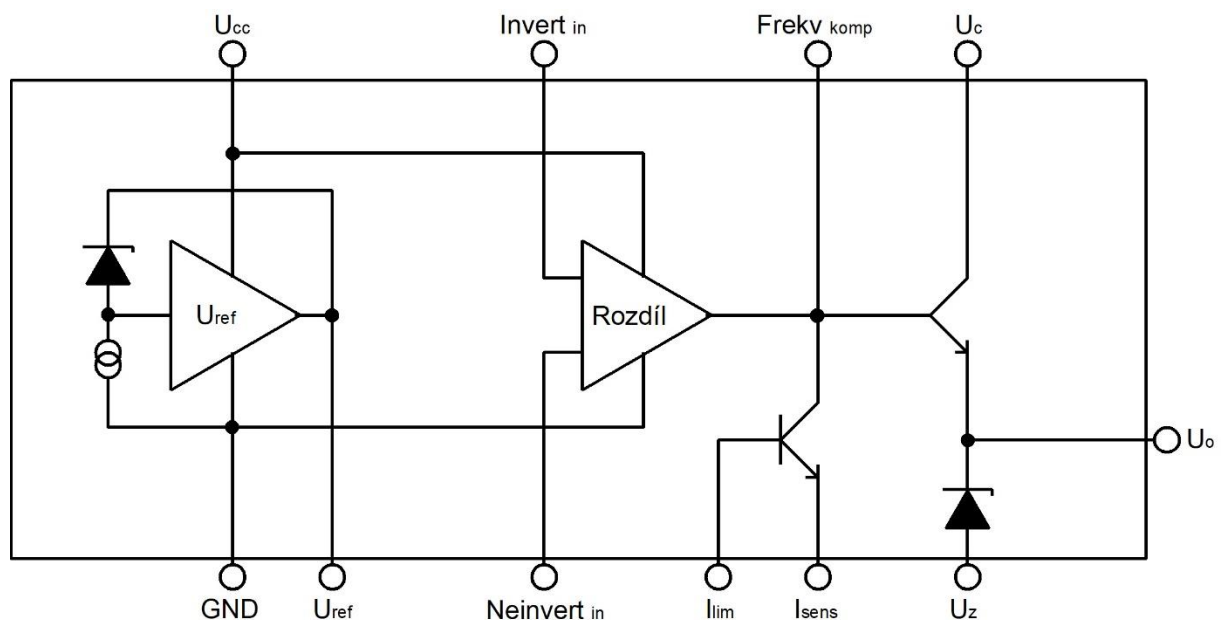
Nejjednodušší provedení je znázorněno na schématu, tzv. jednostupňový regulátor. Do obvodu buzení je vřazen omezovací rezistor a kontakt ovládaný pomocí proudové a napěťové cívky na výstupu. Pokud požadované napětí či proud překročí určenou mez, rozpne se kontakt regulátoru a proud tekoucí budícím vinutím je omezen rezistorem. Uvedený děj se děje mnohokrát za sekundu, kontakt regulátoru tak neustále „vibruje“, proto název vibrační regulátor.

V průběhu let byly regulátory upravovány, byl zvyšován počet regulačních stupňů, což znamená, že v obvodu bylo zařazeno několik rezistorů různých hodnot. Regulátor tak měl více kontaktů a s nárůstem napětí dynama se postupně zvětšovala hodnota omezovacího odporu.

## 2.6 Elektronické regulátory

V 70. letech se velmi rozšířila aplikace polovodičů v mnoha odvětvích, regulace derivačního dynama ve zdrojové soustavě nebyla výjimkou. Uplatnil se zde integrovaný obvod MAA723 výrobce TESLA Rožnov pod Radhoštěm.

## 2.7 MAA723

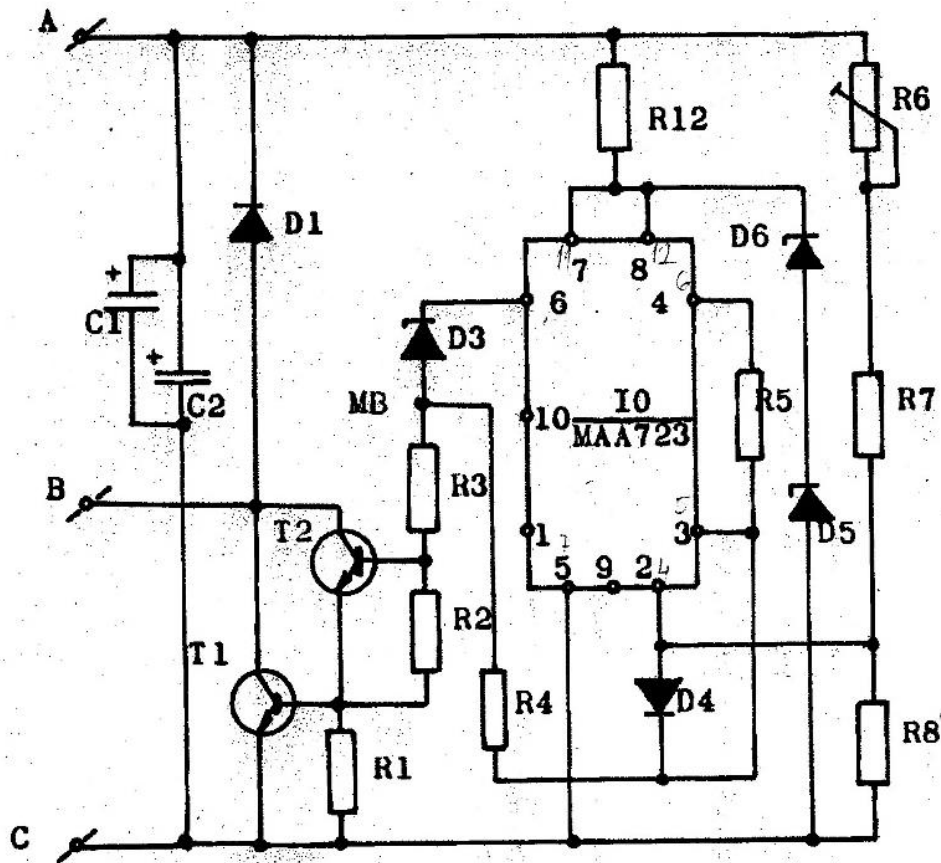


Obrázek 3 - Schéma MAA723 [8]

Jedná se o integrovaný stabilizátor a regulátor napětí, který obsahuje rozdílový zesilovač vstupních veličin, vlastní generátor referenčního napětí a nastavitelné proudové omezení.

## 2.8 Regulátor GC 11

Tento regulátor je určen pro regulaci napětí dynama motorgenerátorického soustrojí v tramvajích typu T3M ale i příbuzných typů.



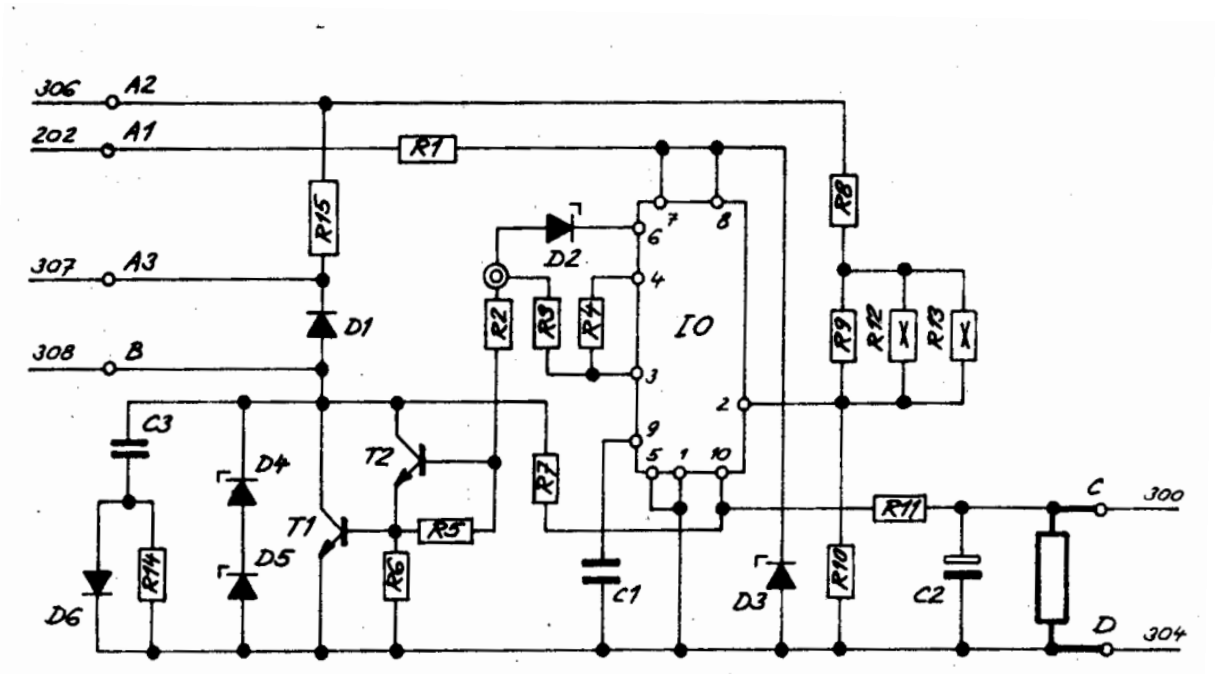
Obrázek 4 - Schéma GC 11 [6]

Regulátor se skládá ze základní desky, na které jsou umístěny výstupní tranzistory T1, T2, dioda D1, tavná pojistka 100A, ochranné kondenzátory a deska plošných spojů s integrovaným obvodem MAA723. Na neinvertující vstup je přivedeno referenční napětí a na invertující vstup je přivedeno skutečné napětí dynama přes odporový dělič z rezistorů R6, R7 a R8. Pokud je skutečné napětí menší než referenční, dojde k sepnutí výstupu a otevře se dvojice tranzistorů T1 a T2, čímž začne procházet proud budícím vinutím připojeným ke svorce B. V opačném případě dojde k uzavření tranzistorů a proud prochází nulovací diodou D1. Celý obvod tak funguje v podstatě stejně jako vibrační regulátor.



## 2.9 Regulátor GC 16

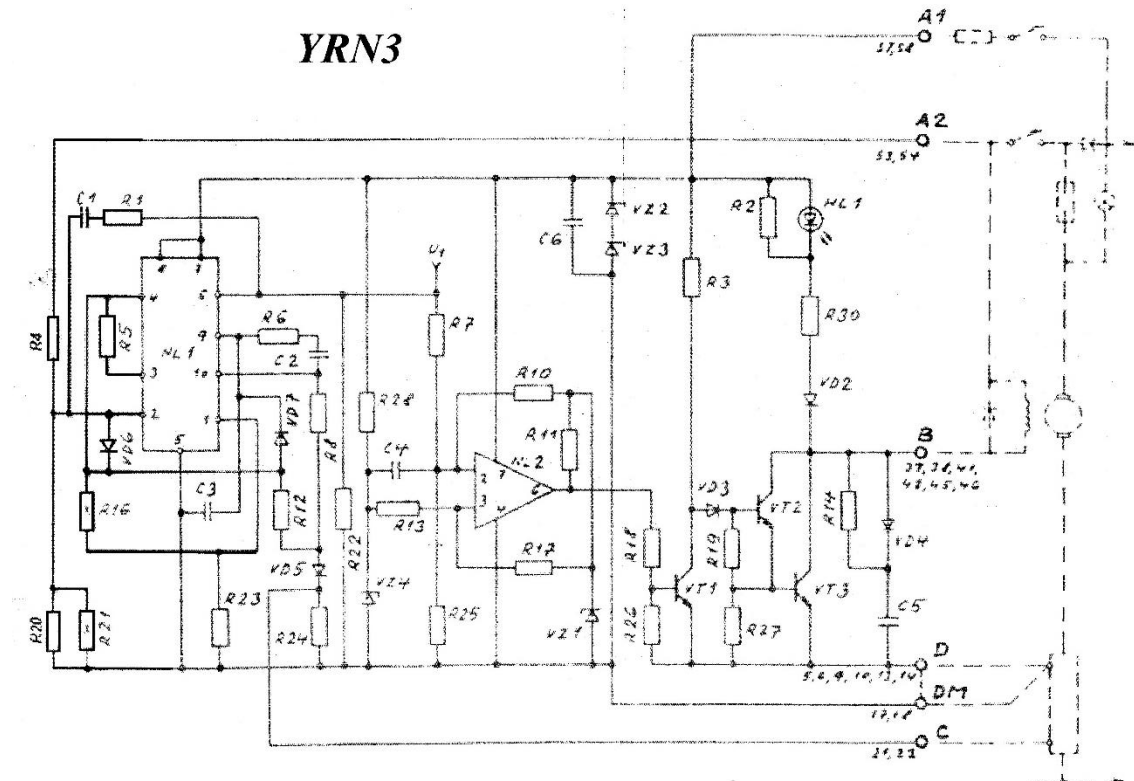
Pro potřeby regulace nabíjení u lokomotiv ČKD vznikl regulátor GC 16, který je velmi podobný předešlému. Liší se vyšším napětím, proudem a zejména již integrovaným omezením proudu.



Obrázek 5 - Schéma GC 16 [6]

Svorky C a D jsou zapojeny v záporném výstupu z nabíjecího dynama přes bočník. Průchodem proudu vznikne na bočníku úbytek asi 0,65V, což je napětí, při kterém se otvírá omezovací tranzistor uvnitř obvodu MAA723, a dojde tak ke snížení proudu protékajícím budícím vinutím dynama a tím ke snížení výstupního napětí a proudu.

## 2.10 Regulátor GC 56



Obrázek 6 - Schéma YRN3 [6]

Větší změnou v koncepci regulace dobíjení na lokomotivách ČKD bylo zavedení elektronického regulátoru výkonu, který obsahoval i řídicí elektroniku regulátoru dobíjení. Regulátor sestával z množství jednotlivých karet zasunutých do skříně Tesla Almes a řídil chod celé lokomotiv (startování, regulace výkonu, regulace topného alternátoru). Dobíjení regulovala karta s označením YRN3. Zpětná dioda, bočník a pojistka byly umístěny v elektrickém rozvaděči mimo regulátor. V zapojení je opět použit integrovaný obvod MAA723, doplněný o operační zesilovač za účelem potlačení hystereze výstupu. Na svorku A1 je přivedeno napětí akumulátorové baterie přes předřadný rezistor, sloužící k napájení řídicí elektroniky. Na svorku A2 je přivedeno napětí dynama, které je snímáno pomocí děliče z rezistorů R4, R20 a R21 a zavedeno do MAA723 jako skutečná hodnota napětí. Žádaná hodnota napětí je vytvořena pomocí vnitřního referenčního napětí MAA723. Na svorku B je

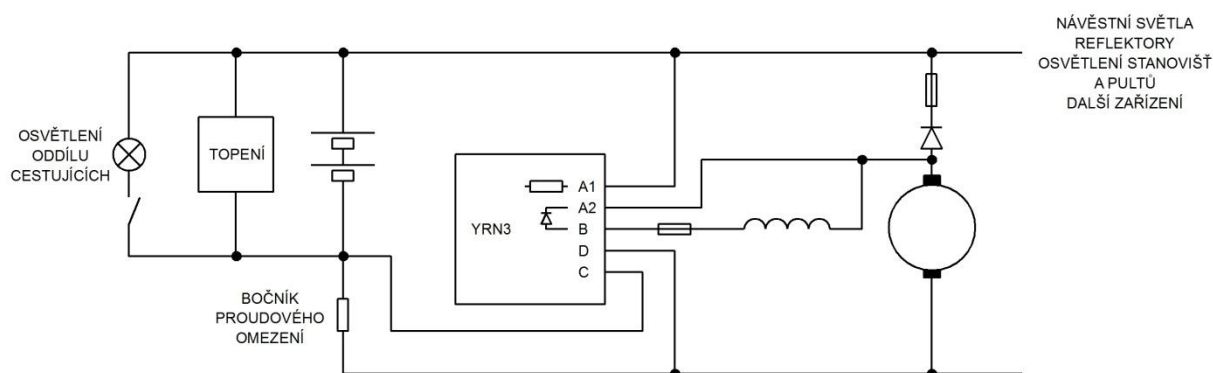
připojeno budící vinutí dynama. Nulovací dioda buzení je umístěna v elektrickém rozvaděči. Svorky D a DM jsou zapojeny za záporný pól dynama a svorka C je zapojena na bočník proudového omezení a plní stejnou funkci jako u předchozího regulátoru GC16. Jak je patrné, není regulováno napětí baterie, ale dynama. Není tak kompenzován úbytek na zpětné diodě (0,7V) a na bočníku proudového omezení (nejméně 0,65V při jmenovitém proudu 63 A). Vzhledem k nabíjecímu napětí 115 V lze tento úbytek zanedbat.

### 3 ZDROJOVÁ SOUSTAVA MOTOROVÉHO VOZU

Zdrojová soustava sestává ze stejnosměrného derivačního dynama, elektronického regulátoru nabíjení vyvinutého v ČKD, bočnicku proudového omezení, zpětní diody, pojistek a dvojice sériově řazených akumulátorů 12 V.

Zapojení je řešeno poměrně nešťastně, neboť bočník proudového omezení je zapojen pouze na výstupu k nabíjení baterie, nezávislému naftovému topení a osvětlení oddílu pro cestující. V obvodu není zapojena ostatní spotřeba, jako jsou návěštní světla a reflektory, osvětlení řídicích pultů a stanovišť strojvedoucího. Dochází tak k přetěžování dynama v případech, že je zapnuto více zařízení najednou a akumulátorová baterie není plně nabita.

Zapojení je zřejmé z následujícího zjednodušeného schématu:



Obrázek 7- Schéma původní zdrojové soustavy

#### 3.1 Hřídel pomocných pohonů

Dynamo a kompresor jsou poháněny společnou hřídelí pomocných pohonů, která je uložena v pomocném ložiskovém domku a poháněna spalovacím motorem. Přenos sil mezi motorem a hřídelí je proveden pomocí drážkované příruby. V této přírubě vznikly provozním opotřebením značné vůle, které působí rázy v celém soustrojí při změně otáček, změně zatížení kompresoru a zatížení dynama.

#### 3.2 Dynamo

Dynamo je poháněno od spalovacího motoru přes hřídel pomocných pohonů a řemenice pomocí klínových řemenů. Jedná se o čtyřpólový stejnosměrný stroj s pomocnými póly bez kompenzačního vinutí, s přirozeným chlazením a libovolným směrem otáčení.

Štítkové hodnoty stroje:

Typ:	EO210
Rok výroby:	1976
Výrobce:	MEZ Brno, závod Nedvědice

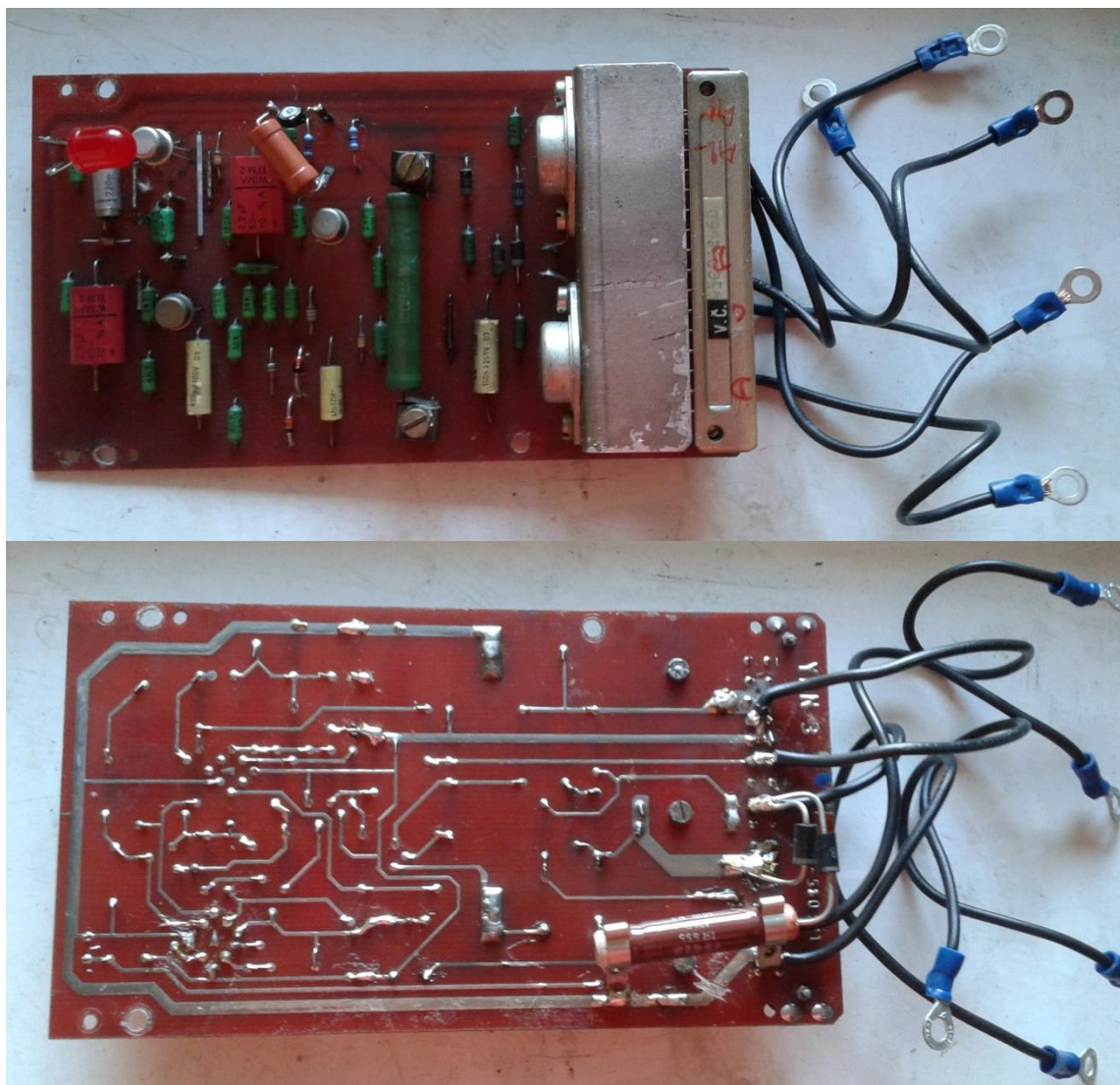
Jmenovité hodnoty:

Výkon:	1000 W
Napětí:	30 V
Proud:	33 A
Odpor buzení:	26 $\Omega$
Rozsah otáček:	400-2000 ot/min

Vinutí stroje jsou vyvedena do svorkovnice vně, kde je možno stroj přepojit na dynamo derivační či cize buzené.

### 3.3 Regulátor nabíjení

Původní regulátor nabíjení, vibrační regulátor ERA, se nedochoval, proto v Krnově zvolili alternativní, snazší a provozně méně náročný způsob regulace, pomocí karty YRN3 z elektronického regulátoru GC 56 výrobce ČKD, instalovaného do lokomotiv od počátku 80. let 20. století. Kartu bylo potřeba upravit vzhledem k rozdílnému napětí zdrojové soustavy 24 V v motorovém voze a 110 V v lokomotivách. Upravena byla hodnota zenerových diod pro stabilizaci napájecího napětí elektroniky, řídicího děliče napětí, nulovací dioda budícího vinutí byla doplněna přímo na kartu a stejně tak předřadný rezistor napájení. Úpravy karty YRN3 jsou patrné na následujících fotografiích.



Obrázek 8 - Karta YRN3

Dále byla doplněna zpětná dioda do výstupu napětí z dynama do akumulátorové baterie, která je umístěna pod regulátorem v samostatné skříni a bočník proudového omezení, umístěný ve skříni regulátoru.

Regulátor se jeví v provozu jako spolehlivý, ale vzhledem k zapojení neumožňuje kompenzaci úbytku napětí na diodě a bočníku. Úbytek na diodě je téměř konstantní, 0,7 V, rozdíl bez zátěže a v plné zátěži je asi 120 mV, takže tato hodnota se dá kompenzovat nastavením regulátoru na vyšší napětí. Bohužel úbytek napětí na bočníku se mění od 0 V do 1 V, což v provozu vede ke stavu, kdy se zvyšujícím se odběrem z dynama (osvětlení, nezávislé naftové topení) snižuje nabíjecí napětí akumulátoru až o 1 V. Popsaný stav nastává hlavně v zimním období vzhledem k dřívějšímu setmění a nižším teplotám. Akumulátory

ale potřebují s klesající teplotou nabíjecí napětí naopak vyšší, nejsou tak nabíjeny na 100 % kapacity a dochází k jejich rychlejšímu stárnutí.

### **3.4 Akumulátorové baterie**

Použita je dvojice sériově zapojených olověných údržbových akumulátoru Autopart Galaxy SHD Gold s následujícími parametry [5]:

Jmenovité napětí:	12 V
Kapacita:	190 Ah
Max. odebíraný proud:	1100 A

Určeny jsou do těžkých provozních podmínek s velkými vibracemi. Doporučené nabíjecí napětí při teplotě 25 °C je 14,4 V. Dále výrobce doporučuje kompenzovat nabíjecí napětí v závislosti na teplotě akumulátoru. Změně teploty o 1 °C odpovídá nepřímo úměrná změna napětí o 0,03 V.

Akumulátory jsou provozně spolehlivé s dostatečnou kapacitou pro potřeby motorového vozu.

## 4 NÁVRH NOVÉHO REGULÁTORU NABÍJENÍ

### 4.1 Požadavky na nový regulátor nabíjení

1. konstantní nabíjecí napětí bez ohledu na úbytek napětí na prvcích zařazených v nabíjecím a regulačním obvodu
2. proudové omezení omezující skutečně výstupní proud z dynama
3. zvlnění výstupního napětí menší než 1 V
4. změna napětí při změně zatížení či otáček menší než 2 V po dobu nejvýše 1 sekundy
5. bezpečnost - při vzniku poruchy ji detekovat a vypnout regulátor
6. Kompenzace nabíjecího napětí v závislosti na teplotě.

### 4.2 Jednotlivé komponenty regulátoru

#### 4.2.1 Arduino NANO

Pro řízení funkce regulátoru navrhuji použít mikrokontrolérovou vývojovou desku Arduino NANO. Založena je na procesoru ATmega238. Deska obsahuje stabilizátor 5 V a 3,3 V, 14 vstupně/výstupních digitálních pinů a 8 analogových vstupů s 10 bit A/D převodníky, vstup externího referenčního napětí, připojení pomocí USB a resetovací tlačítko.

Vyznačuje se nízkou spotřebou, přívětivým programovacím prostředím, možností importu připravených knihoven a jednoduchým řízením výstupu PWM.

Základní parametry [7]:

- Napájecí napětí: 5-15 V
- Vnitřní referenční napětí: 5 V nebo 3,3 V, volí se programově
- Doporučené napájecí napětí: 7-12 V
- Odběr pracovní: 25 mA
- Výstupní proud pinu: 40 mA
- Celkový výstupní proud: 200 mA
- Rychlost: 16 MHz
- Frekvence PWM: 960 Hz



#### **4.2.2 Snímač proudu**

Navrhuji snímat proud pomocí Hallova snímače společnosti LEM. Snímače snímá primární proud procházející vodičem a převádí jej na sekundární proud o řádově menší hodnotě. Ten je veden přes snímací rezistor, na němž vzniká úbytek napětí přímo úměrný primárnímu proudu.

LEM vyžaduje symetrické napájení 15 V, která lze dosáhnout nejlépe DC/DC měničem.

#### **4.2.3 Napájení regulátoru**

Napětí akumulátoru se pohybuje od 28,8 V při chodu dobíjení po spodní hranici napětí, kdy je ještě spalovací motor možné nastartovat. Dle zkušeností je to asi okolo 18 V. Napájecí zdroj by tak měl být schopen minimálně v tomto rozsahu dodávat konstantní napětí. Potřeba je také připočítat překmity napětí a různé špičky, proto stanovuji horní mez napětí na 40 V a spodní 15 V. Pro napájení Arduina jsem zvolil hodnotu 12 V.

Vzhledem k odběru proudu Arduina postačí lineární stabilizátor napětí řady 78xx.

Pro jištění napájení navrhuji použití tavné pojistky 5x20 mm.

#### **4.2.4 Snímání napětí baterie a dynama**

Maximální vstupní napětí analogového vstupu Arduina je 5 V, které je následně vzorkováno v 1023 krocích. Navrhuji snížit napětí v děliči složeném ze dvou rezistorů a následně filtrovat v RC filtru jako dolní propust.

#### **4.2.5 Výstupní prvek**

Pro řízení proudu budícím vinutím je nutno regulátor vybavit výkonovým spínacím tranzistorem. Vzhledem k možnostem řízení, frekvenci PWM, spínacím ztrátám a úbytku v otevřeném stavu navrhuji použít unipolární tranzistor s N-kanálem. Pro aplikace řízené logickým signálem 5 V existuje speciální řada tranzistorů s názvem Logic level FET, které dosahují plného otevření již při malém řídicím napětí.

#### **4.2.6 Nulovací dioda buzení**

Vzhledem ke spínání indukční zátěže je potřeba paralelně k budícímu vinutí připojit nulovací diodu. Musí vyhovovat proudově, napětově a dobou zotavení. Umístění volím přímo na desku regulátoru.

## 4.2.7 Chlazení

Lineární stabilizátory napětí, nulovací diodu i tranzistor bude nutné chladit. Velikost chladiče lze určit výpočtem ze znalosti tepelných odporů přechodů uvnitř i vně součástek a teplot nebo empiricky dle zkušeností a účinnost chlazení pak ověřit měřením teplot.

## 4.2.8 Kompenzace nabíjecího napětí

Snímání teploty baterie lze provést pomocí NTC termistoru zapojeného v děliči napětí s rezistorem. Napětí z děliče lze snímat a vyhodnocovat mikrokontrolérem.

## 4.3 Struktura programu regulátoru

### 4.3.1 PI regulátor

Nejčastěji používaným regulátorem je PI regulátor. Vyznačuje se nulovou regulační odchylkou, dobrou stabilitou, odolností proti nárazovým poruchám. Pro Arduino je připravena hotová knihovna s tímto regulátorem, kdy je potřeba pouze nastavit jednotlivé regulační konstanty, vzorkovací periody. Po počáteční inicializaci již regulátor pracuje bez nutnosti zásahu.

Problematickou částí je určení konstant, pro které existuje řada metod. Teoretické, kdy je potřeba znát model soustavy a následně se vypočítají podle určených kritérií konstanty. Empirické, kdy se testuje regulovaná soustava na jednotkový skok žádané hodnoty a dle odezvy se opět zjišťují konstanty.

Zajímavou metodou je metoda podle Zieglera a Nicholse, kdy zachováme pouze proporcionální zesílení, které zvyšujeme tak dlouho, dokud se nám regulovaná soustava nerozkmitá netlumenými kmity. Toto zesílení označíme za kritické zesílení  $r_{0krit}$ . Určíme periodu netlumených kmitů  $T_{krit}$ . Konstanty regulátoru poté nastavíme dle následujících vztahů.

$$r_0 = 0,45 * r_{0krit} \quad (1)$$

$$T_i = 0,83 * T_{krit} \quad (2)$$

Problém u této metody vidím v nutnosti přivést soustavu do stavu rozkmitání, což by mohl být v motorovém voze velký problém vzhledem k ostatním zařízením. Proto navrhuji použít popisovanou metodu, avšak s velkou opatrností a současně s následným doladěním podle tabulky umístěné v příloze F.

### 4.3.2 Snímání napětí a proudu

Využit lze integrované 10 bitové A/D převodníky. Snímané napětí na děličích se navzorkuje s krokem 1023 a následně programově přepočítá na skutečné hodnoty, se kterými budou pracovat PI regulátory.

### 4.3.3 Regulace napětí a omezení proudu

Regulace proudu je nadřazena regulaci napětí, což v praxi znamená následující:

Pokud je výstupní proud z dynama menší než maximální, je nastaveno maximální výstupní napětí, v našem případě 28,8 V. Teprve když výstupní proud překročí maximální, nastane postupné snižování výstupního napětí tak, aby se výstupní proud rovnal proudu maximálnímu.

Navrhuji užít dva PI regulátory. Jeden pro regulaci proudu a druhý pro regulaci napětí. Výstupem regulátoru proudu bude žádaná hodnota napětí, která se předá do regulátoru napětí, který jej následně bude regulovat. Bude zřejmě nutné odladit regulátory zvlášť s různými konstantami.

### 4.3.4 Ochrany

Je vhodné do programu zakomponovat i různé ochrany, výčet uvažovaných poruch:

- přepětí baterie
- přepětí dynama
- velký rozdíl napětí baterie a dynama značící například přepálení pojistky
- selhání napájení snímače proudu vedoucí k přetížení dynama nadproudem
- nadproud vedoucí k přetížení dynama
- zamrznutí procesoru vedoucí k trvalému sepnutí výstupního tranzistoru a tím k vzniku přepětí a nadproudu
- proražení výstupního tranzistoru

Prvních pět možností lze ošetřit programově pomocí podmínky, kdy při překročení meze po určitou dobu dojde k vypnutí regulátoru a indikaci poruchy.

Zamrznutí procesoru, které by mohlo vést k trvale sepnutému buzení a následnému přepětí, lze ošetřit funkcí Watchdog, kdy si procesor sám hlídá a po určeném čase resetuje časovač. Pokud dojde k zamrznutí, časovač překročí určenou mez a procesor se restartuje.

Také by bylo vhodné ošetřit tento stav i hardwarově. Navrhuji do napájení vložit hlídací zkratovací obvod složený ze zenerovy diody a tyristoru. Po překročení zenerova napětí dojde ke zkratu, přepálení pojistky napájení a celý regulátor ztratí napájení.

Proražení výstupního tranzistoru povede k velkému přepětí, nadproudu a pravděpodobně přepálení pojistky nabíjení. Vzhledem k malé pravděpodobnosti nebudu tuto skutečnost ošetřovat, znamenalo by to potřebu dalšího zařízení, které by například odpojilo přívod buzení od regulátoru k dynamu.

#### **4.4 Shrnutí hardwaru**

- deska plošných spojů
- Arduino Nano
- snímač proudu LEM
- DC/DC měnič pro LEM
- lineární stabilizátor napětí
- výstupní tranzistor Logic level FET
- nulovací dioda buzení
- rezistory
- kondenzátory
- světelné diody
- trubičková pojistka
- zenerova dioda
- tyristor

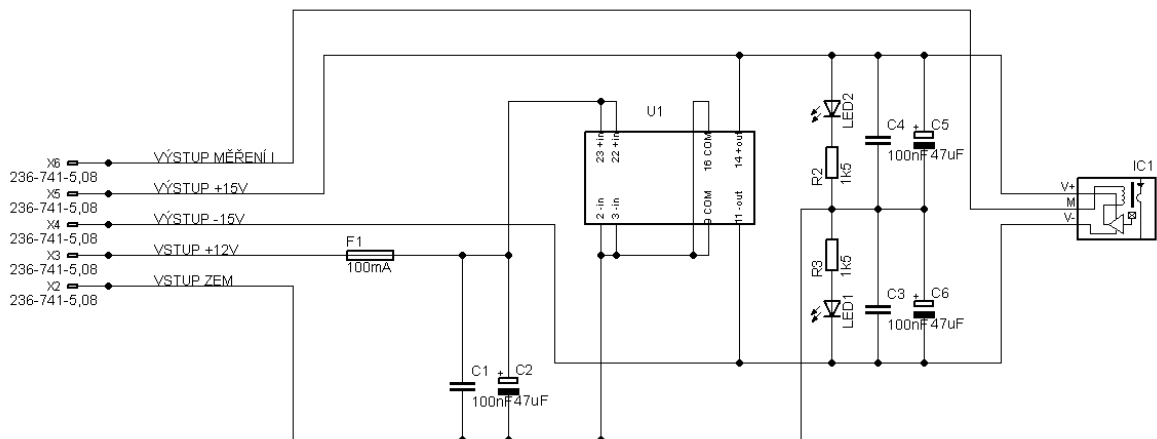
#### **4.5 Shrnutí softwaru**

- PI regulátor proudu
- PI regulátor napětí
- snímání proudu a napětí
- přepět'ové ochrany
- nadproudová ochrana
- watchdog

## 5 DESKA SNÍMAČE PROUDU A DESKA REGULÁTORU

### 5.1 Deska snímače proudu

Snímač proudu a další součástky tvoří samostatnou desku umístěnou mimo skříň regulátoru. Snímač je napájen z DC/DC měniče přes vyhlazovací kondenzátory. K indikaci přítomnosti napětí v obou polaritách slouží světelné diody. Měnič je napájen přes kondenzátory a tavnou pojistku z desky regulátoru stabilizovaným napětím 12 V. Pro připojení vodičů propojující obě desky jsou použity pružinové svorky. Snímací rezistor proudu je umístěn na desce regulátoru, proudový signál a napěťové signály pro kontrolu funkce desky snímače jsou také vyvedeny na konektory.



Obrázek 9 - Schéma desky snímače proudu

Pro snímání proudu dynama je použit snímač proudu LEM LA 55-P.

Tabulka 1 - Katalogové údaje LEM LA 55-P [9]

jmenovitý primární proud $I_{PN}$	50 A
rozsah měření $I_{PM}$	0 - 70 A
měřicí rezistor při napájení $\pm 15$ V $R_M$	50 - 160 $\Omega$
jmenovitý sekundární proud $I_{SN}$	50 mA
převod proudu $K_N$	1:1000
spotřeba proudu $I_C$	10 mA
maximální offset $I_O$	$\pm 0,2$ mA

Vzhledem k potřebě napájet snímač symetrickým napětím +15 V, 0 V a -15 V je třeba použít DC/DC měnič. Ten je napájen z výstupu 12 V stabilizátoru na desce regulátoru. Pro stanovení parametrů měniče je třeba znát hodnotu maximálního proudu  $I_{LEMmax}$  odebíraného snímačem LEM. Tento stav nastane, bude-li dynamo pracovat v režimu proudového omezení na  $I_{Dmax} = 33$  A.

$$I_{LEMmax} = I_{Dmax} \cdot K_N + I_C = 33 \cdot (1:1000) + 0,01 = 0,043 \text{ A} = 43 \text{ mA} \quad (3)$$

Uvažujme tedy zaokrouhlenou hodnotu s rezervou  $I_{LEMmax} = 50$  mA.

Tomu vyhovuje spínaný DC/DC měnič **Mean well DCW03A-15**.

Tabulka 2 - Katalogové údaje Mean well DCW03A-15 [10]

výstupní napětí $U_{OUT}$	$\pm 15$ V
maximální výstupní proud $I_{OUTmax}$	$\pm 100$ mA
minimální výstupní proud $I_{OUTmin}$	$\pm 10$ mA
vstupní napětí $U_{IN}$	9 - 18 V
účinnost	81 %

### 5.1.1 Vyhlašováci kondenzátory:

Dle doporučení výrobce měniče ohledně kapacity a způsobu zapojení jsou použity vždy paralelní dvojice kondenzátorů, které tvoří fóliový kondenzátor 100 nF/63 V a elektrolytický kondenzátor 47  $\mu$ F/35 V. Napětí kondenzátorů je dimenzováno nejméně dvojnásobně pro uvažované vstupní i výstupní napětí měniče.

### 5.1.2 Světelné diody a předřadné rezistory:

Použity jsou diody L-934GT.

Tabulka 3 - Katalogové údaje L-934GT [11]

napětí LED $U_{LED}$	2,2 V
proud LED $I_{LED}$	10 mA

Hodnotu odporu a výkonu předřadného rezistoru pro diody stanovíme výpočtem:

$$R_{LED} = \frac{U_{OUT} - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{15 - 2,2}{0,01} = 1280 \Omega \quad (4)$$

$$P_{RLED} = (U_{OUT} - U_{LED}) \cdot I_{LED} = (15 - 2,2) \cdot 0,01 = 0,14 W \quad (5)$$

Vzhledem k vyráběným řadám jsou použity rezistory RM 1k5 0207 0,6W 1%.

### 5.1.3 Pojistka

Pro ochranu prvků obvodu před poškozením je ve vstupu zapojena tavná pojistka. Hodnotu pojistky stanovíme dle maximálního odběru celého obvodu. Ten je dán součtem proudu světelných diod a napájecího měniče pracujícího se známou účinností. Jelikož se jedná o měnič, je třeba proud přepočítat přes přenášený výkon.

$$P_{MAX} = (U_{OUT} \cdot (I_{LEMmax} + 2 \cdot I_{LED})) \cdot \eta = 15 \cdot (0,05 + 0,02) \cdot 1,19 = 1,25 W \quad (6)$$

$$I_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{U_{IN}} = \frac{1,25}{12} = 0,1 A = 100 mA \quad (7)$$

Ve výpočtu je zanedbána změna proudu světelnými diodami v důsledku použití větších předřadných rezistorů. Skutečný proud bude nižší.

Použita je rychlá tavná pojistka velikosti 5x20 mm o jmenovité hodnotě 100 mA.

### 5.1.4 Konektory

Pro připojení desky jsou použity pružinové svorky WAGO 236 25A.

Jednotlivé kontakty uvádí následující tabulka:

*Tabulka 4 - Kontakty připojovací svorkovnice pro připojení k desce regulátoru*

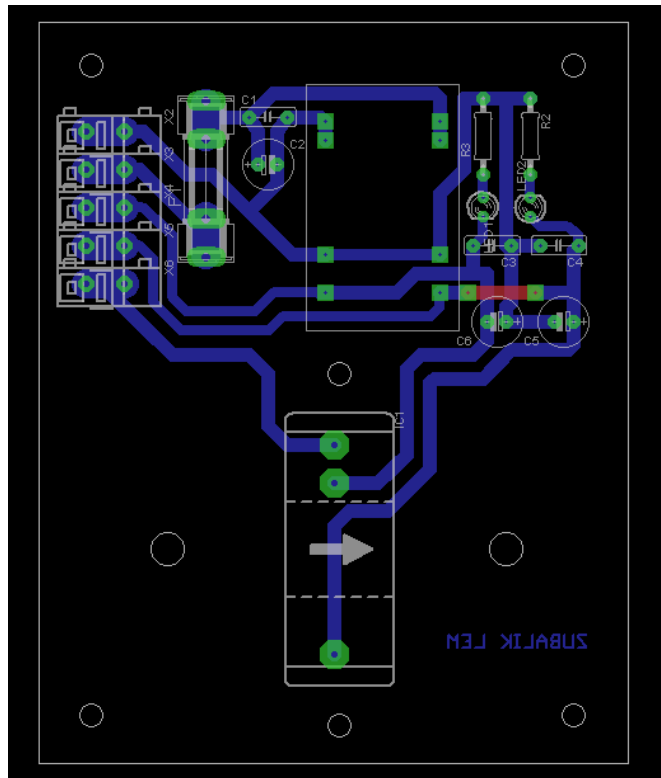
GND	společná zem
$U_{CC}$	vstup napájení 12 V
-15 V	výstup měření -15 V z měniče
+ 15V	výstup měření +15 V z měniče
$I_{SIG}$	výstup sekundárního měřicího proudu

### 5.1.5 Shrnutí

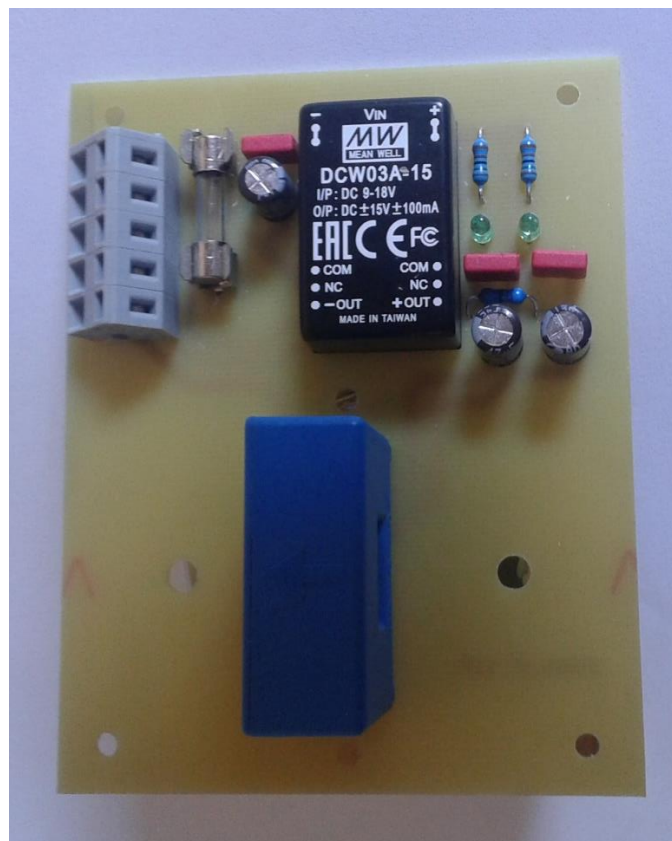
Stanovený maximální offset snímače byl ověřen měřením a činí nejvýše 200 mA. To lze vzhledem k maximálnímu proudu 33 A při použití v motorovém voze zanedbat. Stanovený minimální odběr z měniče je pokryt spotřebou světelných diod.



## 5.1.6 Návrh a fotografie hotové desky



Obrázek 10 - Návrh desky snímače proudu



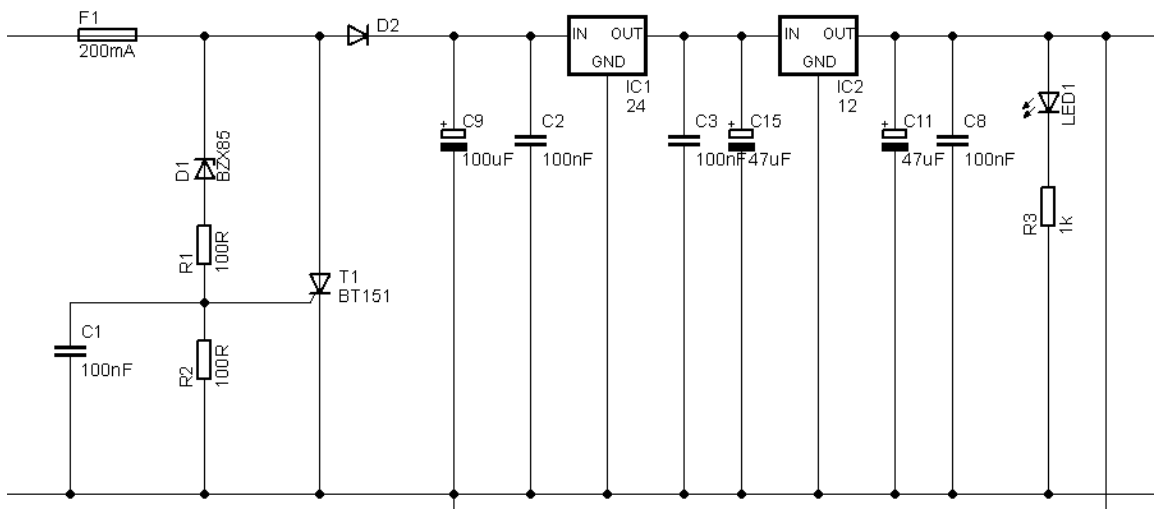
Obrázek 11 - Deska snímače proudu

## 5.2 Deska regulátoru

Ústředním prvkem je mikrokontrolérová vývojová deska Arduino NANO, která zajišťuje programové funkce regulátoru, řídí výstupní tranzistor, pomocí A/D převodníků snímá napětí na děličích, které jsou připojeny na jednotlivé části regulačního obvodu, a pomocí LED diod indikuje jednotlivé stavy regulátoru. Pro napájení je použita dvojice lineárních stabilizátorů napětí zapojených v sérii, doplněných filtračními kondenzátory, přepětovou zkratovací ochranou a nadproudovou ochranou pomocí tavné pojistky. Pro stabilní referenční napětí regulátoru je použit externí zdroj referenčního napětí pro mikroprocesor. Výstup tvoří unipolární tranzistor pro použití s ovládací logikou o napětí 5 V, nulovací dioda budícího vinutí a ochranná pojistka. Výkonové prvky a stabilizátory jsou doplněny chladiči. Na desce regulátoru je umístěn i snímací rezistor proudového signálu z desky snímače proudu. Pro připojení je na desce trojice svorkovnic. Jedna sada pružinových svorek slouží pro připojení desky snímače proudu, druhá sada pro připojení NTC snímače teploty akumulátoru a třetí silnoproudá šroubová svorkovnice slouží pro připojení desky regulátoru do vozidla.

Kompletní schéma zapojení je umístěno v příloze.

### 5.2.1 Napájecí stabilizátory



Obrázek 12 - Schéma napájení desky regulátoru

Vzhledem k parametrům desky Arduino NANO je zvoleno napájecí napětí 12 V. Pro zvolení stabilizátorů je nutno znát celkový odběr všech napájených zařízení, což udává následující tabulka:

Tabulka 5 - Odběr napájených zařízení

Arduino NANO	25 mA
indikační světelné diody	30 mA
deska snímače proudu	100 mA

Po hrubém zaokrouhlení uvažujeme maximální odběr asi 170 mA.

Maximální hodnota napětí ve zdrojové soustavě vozidla při horní mezi teplotní kompenzace nabíjecího napětí je 29,8 V. Maximální pracovní napětí stabilizátoru je tak nutno dimenzovat s ohledem na zdrojovou soustavu. Jako vhodné, i vzhledem k proudovému zatížení, se jeví stabilizátory řady 78xx, jejichž maximální napětí je 35 V, u některých stabilizátorů 24 V i 40 V. Proto použijí sériově zapojené stabilizátory 24 V a 12 V, aby bylo dosaženo co nejvyšší pracovní napětí. Zároveň tak vzniká jistá redundance, kdy při proražení stabilizátoru 24 V jej může do dosažení meze 35 V zastoupit 12 V stabilizátor. Oba stabilizátory jsou umístěny na společném chladiči přes izolační podložky.

Tabulka 6 - Katalogové údaje 7812 CV-DG [12]

maximální vstupní napětí $U_{INmax}$	35 V
maximální výstupní proud $I_{OUTmax}$	1,5 A
výstupní napětí $U_{OUT}$	12 V
maximální teplota přechodu $T_{OP}$	125 °C
zvlnění $\Delta V_O$	30 mV

Tabulka 7 - Katalogové údaje 7824 CV-DG [12]

maximální vstupní napětí $U_{INmax}$	40 V
maximální výstupní proud $I_{OUTmax}$	1,5 A
výstupní napětí $U_{OUT}$	24 V
maximální teplota přechodu $T_{OP}$	125 °C
zvlnění $\Delta V_O$	30 mV

### 5.2.2 Chlazení stabilizátorů

Pro chlazení je použit hliníkový profil tvaru U 15x30 mm o délce 80 mm, který souží zároveň jako konstrukční zpevnění a ochrana součástek desky regulátoru. Oba stabilizátory a tyristor přepět'ové ochrany jsou na profil upevněny přes izolační slídové podložky.

Uvažovanou výkonovou ztrátu stabilizátorů vypočteme následovně:

$$P = (U_B - U_{OUT}) \cdot I_{OUT} = (29,8 - 12) \cdot 0,17 = 3,03 \text{ W} \quad (8)$$

Pro ověření dostatečného chlazení bylo provedeno měření teplot pouzder stabilizátorů při plném zatížení a okolní teplotě 23 °C. Došlo k oteplení pouzder o 19 °C. Vzhledem k maximální teplotě přechodu 125 °C je chlazení dostatečné.

### 5.2.3 Vstupní přepět'ová a nadproudová ochrana

Pro ochranu před přepětím vzniklým poruchou regulátoru (trvalé buzení dynama) je použito zkratovací zapojení pojistky pomocí tyristoru a zenerovy diody. Při překročení zenerova napětí začne diodou protékat proud, který způsobí otevření tyristoru, a ten způsobí přepálení pojistky zkratem. S ohledem na použité stabilizátory a vlastnosti zdrojové soustavy je vybavovací napětí ochrany zvoleno na 36 V.

Tabulka 8 - Katalogové údaje BT151-500 [13]

pracovní napětí $U_{DRM}$ , $U_{RRM}$	500 V
maximální proud v propustném směru $I_{RMS}$	12 A
maximální špičkový proud $I_{TSM}$	120 A
maximální špičkový proud gate $I_{GM}$	2 A

Pro omezení proudu zenerovou diodou a řídicí elektrodou tyristoru jsou použity dva rezistory o hodnotě 100  $\Omega$  a kondenzátor 100 nF k omezení strmosti nárůstu proudu.

Nadproudová ochrana je provedena rychlou tavnou pojistkou 5x20 mm o hodnotě 200 mA, s ohledem na proudové zatížení.

### 5.2.4 Externí reference napětí

Pro zajištění stabilního referenčního napětí je použito integrovaného obvodu LM336Z-5 doplněného omezovacím rezistorem a stabilizačním kondenzátorem.

Tabulka 9 - Katalogové údaje LM336Z-5 [14]

referenční napětí $U_{REF}$	5 V
tolerance	1 %
doporučený pracovní proud $I_Z$	1 mA

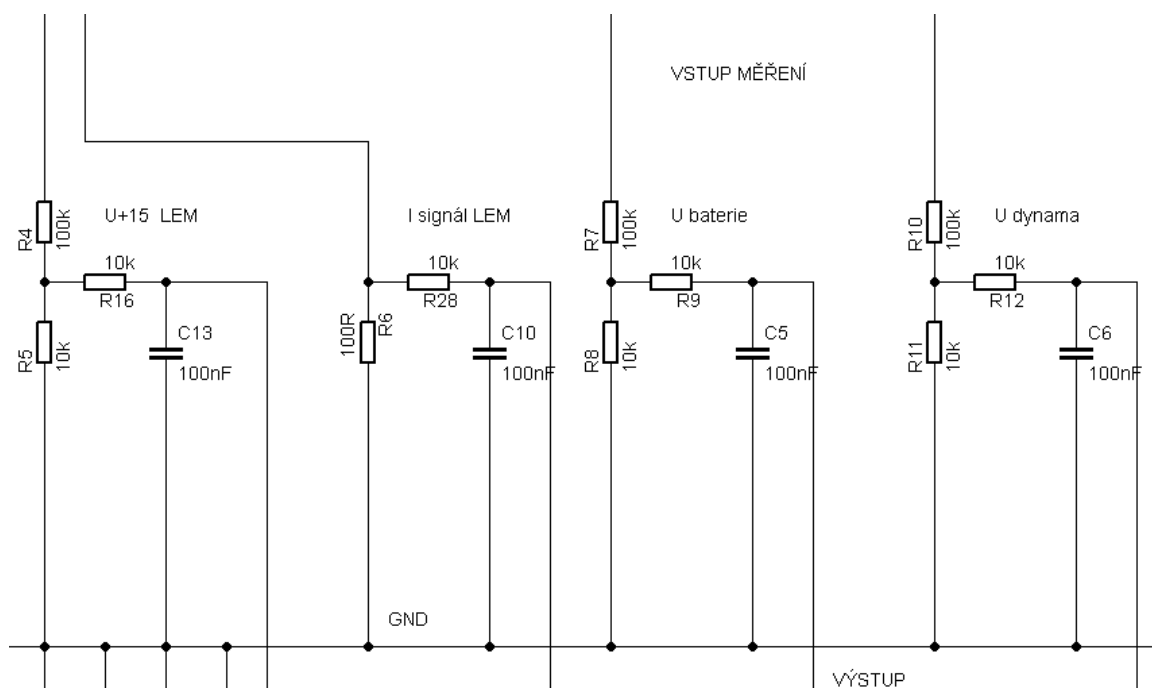
Výpočet předřadného rezistoru  $R_Z$ :

Obvod je napájen stabilizovaným napětím  $U_{OUT} = 12$  V, platí tedy:

$$R_Z = \frac{U_{OUT} - U_{REF}}{I_Z} = \frac{12 - 5}{0,001} = 7000 \Omega \quad (9)$$

Vyhoví použití rezistoru RM 6K8 0207 0,6W 1%.

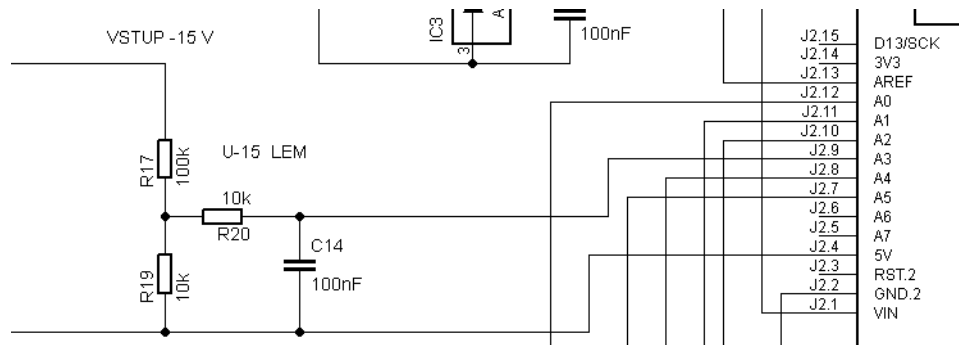
### 5.2.5 Děliče napětí



Obrázek 13 - Schéma děličů napětí desky regulátoru

Napětí přivedené na vstupy A/D se musí pohybovat mezi 0 a 5 V. Napětí měřené na vstupech je tak nutno snížit využitím děliče napětí a filtrovat proti nežádoucím špičkám. Vzhledem k nejvyššímu měřenému napětí asi 32 V na dynamu, dostatečné rezervě proti přepětí a dostupnosti součástek volím děliče 1:11, složené z rezistorů o hodnotách 10 k $\Omega$  a 100 k $\Omega$ . Tento poměr z důvodu unifikace součástek využiji u všech vstupů.

Měření -15 V je provedeno děličem proti napětí 5 V. Měřená veličina tak nabývá kladných hodnot a je ji možné snímat A/D převodníkem mikrokontroléru.



Obrázek 14 - Schéma děliče napětí pro měření -15 V

Vzhledem k 10 bitovým převodníkům bude např.: u měření napětí baterie výsledný krok regulace:

$$U = \frac{5 \cdot 11}{1023} = 0,054 \text{ V} \quad (10)$$

Tato přesnost je plně dostačující.

Filtrace probíhá v RC filtru v zapojení dolní propusti sestaveného z rezistoru 10 k $\Omega$  a kondenzátoru 100 nF. Mezní frekvenci (pokles zisku o 3dB) vypočteme pomocí následujícího vztahu:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} = 159 \text{ Hz} \quad (11)$$

### 5.2.6 Snímací rezistor proudu

Z desky snímače proudu je zaveden proudový signál do desky regulátoru, kde je umístěn snímací rezistor. S ohledem na doporučenou velikost rezistoru výrobcem proudového snímače a A/D převodník v mikrokontrolérové desce, jsem zvolil hodnotu 100  $\Omega$ . Bude se tak jednat o převod proudu na napětí v poměru 10:1.

Při proudu dynamy 33 A bude na rezistoru úbytek 3,3 V.

### 5.2.7 Měření teploty akumulátor

Pro dosažení teplotní kompenzace nabíjecího napětí je použit NTC termistor zapojený v děliči s rezistorem 47 k $\Omega$  a opět RC filtrem stejných parametrů jako u děličů napětí.

Tabulka 10 - Katalogové údaje NTC 640 - 47k [15]

$R_{25^{\circ}\text{C}}$	47 k $\Omega$
$B_{25/100}$	3390 K
tolerance	3 %

### 5.2.8 Indikační světelné diody

Pro indikaci provozních a poruchových stavů jsou zapojeny světelné diody opět typu L-934GT. V obvodu napájení 12 V je zapojena světelná dioda s předřadným rezistorem hodnoty:

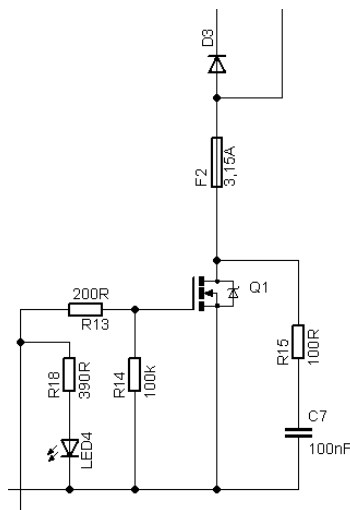
$$R_{LED} = \frac{U_{OUT} - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{12 - 2,2}{0,01} = 980 \Omega \quad (12)$$

Na digitální výstupy desky Arduino NANO o napětí 5 V jsou připojeny další světelné diody s předřadnými rezistory hodnot:

$$R_{LED} = \frac{U_{OUT} - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{5 - 2,2}{0,01} = 280 \Omega \quad (13)$$

Vzhledem k vyráběným řadám rezistorů jsou použity RM 1k 0207 0,6W 1% a RM 390R 0207 0,6W 1%.

### 5.2.9 Výstupní tranzistor a nulovací dioda buzení



Obrázek 15 - Schéma výstupu desky regulátoru

Pro spínání budícího vinutí dynama je nutné použití prvku, který výkonově zesílí signál z mikroprocesoru a nulovací diody, která zajistí ochranu obvodu proti špičkám vzniklých na indukčnosti budícího vinutí. Vzhledem na napětí logiky 5 V, spínací frekvenci 960 Hz a proud buzení maximálně 2 A, byl zvolen unipolární tranzistor Logic Level FET, který je určen právě pro použití v logických obvodech. Nulovací dioda buzení byla dimenzována s ohledem na proudové zatížení dynama, vzniklé napětí a spínací frekvenci. Obě součástky jsou umístěny přes izolační slídové podložky na chladícím hliníkovém U profilu stejných rozměrů jako u stabilizátorů napětí. Buzení tranzistoru je doplněno předřadným rezistorem R13 pro omezení výstupního proudu z mikrokontrolérové desky při nabíjení kapacity gate a pull-down rezistorem, dle doporučení výrobce. Tranzistor obsahuje integrovanou ochrannou diodu a obvod je doplněn komutačním RC členem paralelně k tranzistoru, jehož hodnoty jsou převzaty z karty YRN3.

$$R_{13} = \frac{U}{I_{OUTmax}} = \frac{5}{0,025} = 200 \Omega \quad (14)$$

Vzhledem k vyráběným řadám rezistorů je použit RM 200R 0207 0,6W 1%.

Nadproudová ochrana výstupního tranzistoru je provedena rychlou tavnou pojistkou o hodnotě jmenovitého proudu 3,15 A.

Tabulka 11 - Katalogové údaje tranzistoru RFP12N10L [16]

napětí DRAIN-SOURCE $V_{DS}$	100 V
proud DRAIN-SOURCE $I_{DS}$	12 A
odpor DRAIN-SOURCE $R_{DS}$	0,2 $\Omega$
čas vypnutí $t_{dOFF}$	100 ns

Tabulka 12 - Katalogové údaje diody BYW80-200 [17]

napětí $V_{RRM}$	200 V
proud $I_F$	10 A
doba zotavení $t_{rr}$	25 ns



### 5.2.10 Arduino NANO

Mikrokontrolérová deska je zasunuta do precizních dutinových lišt. Připojení pinů udává následující tabulka:

Tabulka 13 - Zapojení pinů mikrokontrolérové desky

V <sub>IN</sub>	vstup napájení 12 V
GND	zem
5V	výstup 5 V
AREF	vstup externího referenčního napětí 5 V
A0	vstup měření termistoru
A1	vstup měření proudu dynama
A2	vstup měření +15 V napájení snímače proudu
A3	vstup měření -15 V napájení snímače proudu
A4	vstup měření napětí akumulátorů
A5	vstup měření napětí dynama
D6	výstup řízení tranzistoru buzení
D8	výstup LED indikace proudového omezení
D9	výstup LED indikace poruchy dynama
D10	výstup LED indikace poruchy snímače proudu

### 5.2.11 Konektory

Pro připojení desky snímače proudu a snímače NTC jsou použity pružinové svorky WAGO 236 25A.

Jednotlivé kontakty uvádí následující tabulka:

*Tabulka 14 - Kontakty připojovací svorkovnice pro připojení desky snímače proudu*

GND	společná zem
$U_{CC}$	výstup napájení 12 V
-15 V	vstup měření -15 V z měniče
+ 15V	vstup měření +15 V z měniče
$I_{SIG}$	vstup sekundárního měřicího proudu
NTC	snímač NTC
NTC	snímač NTC

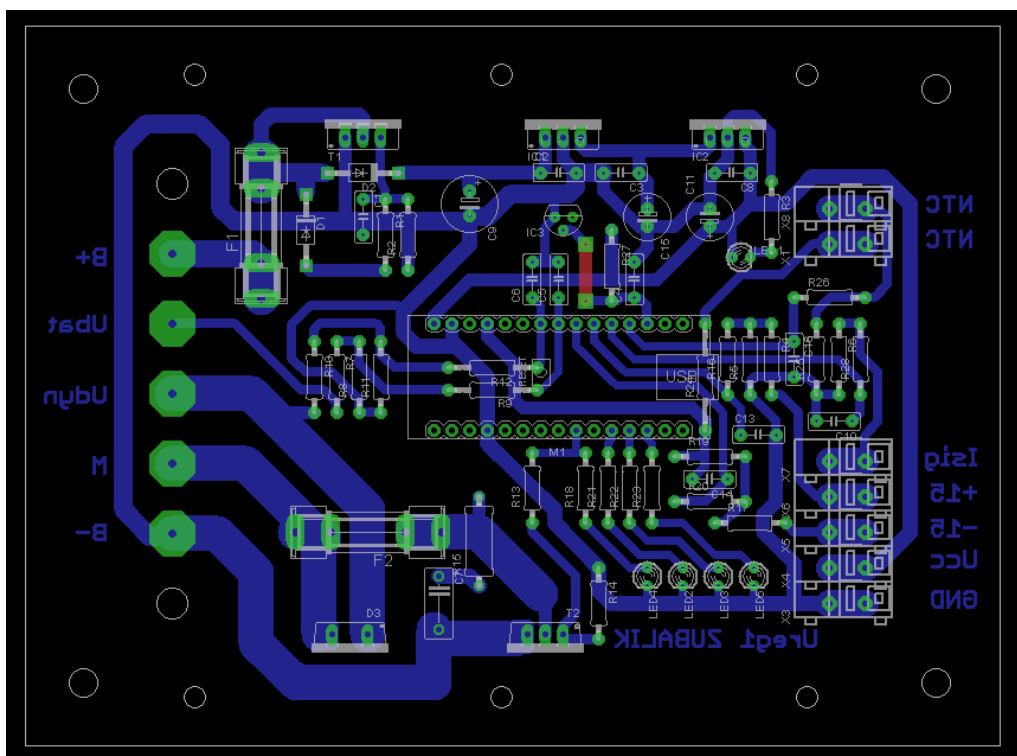
Pro připojení desky regulátoru k vozidlu je použita šroubová svorkovnice DEGSON DG58C.

Jednotlivé kontakty uvádí následující tabulka:

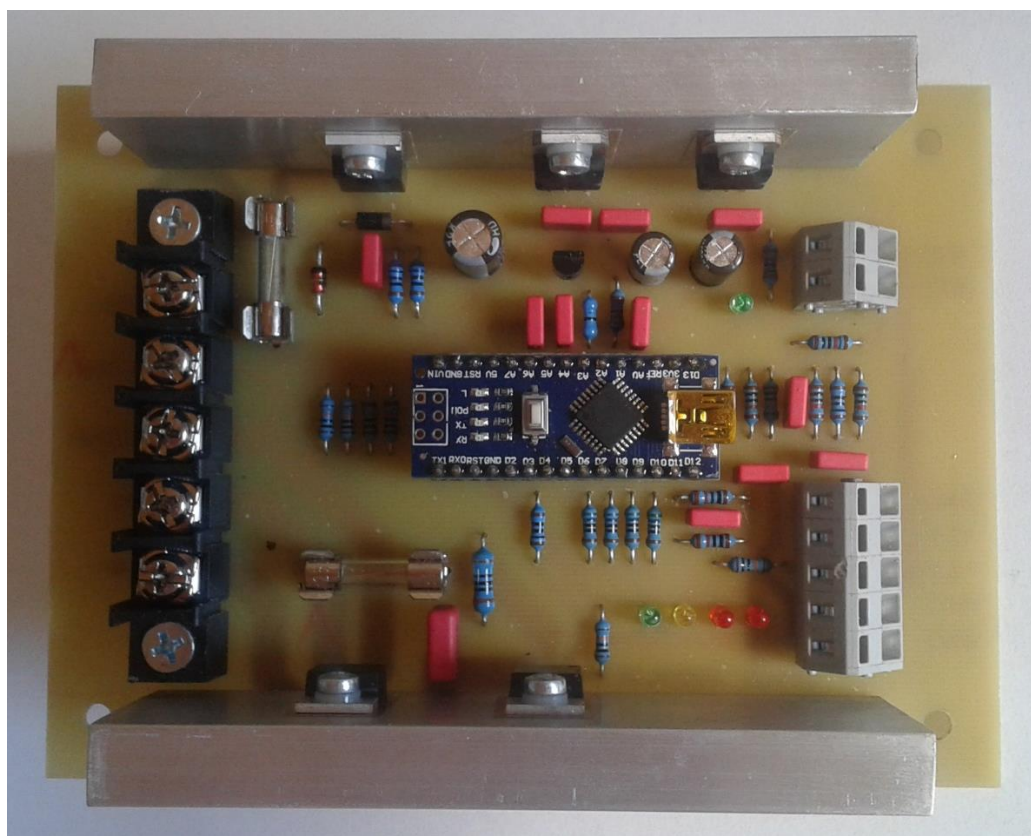
*Tabulka 15 - Kontakty připojovací svorkovnice k připojení k vozidlu*

B+	vstup napájení +
$U_b$	měření napětí akumulátorů
$U_d$	měření napětí dynama
M	výstup k budicímu vinutí dynama
B-	vstup napájení -

## 5.2.12 Návrh a fotografie hotové desky



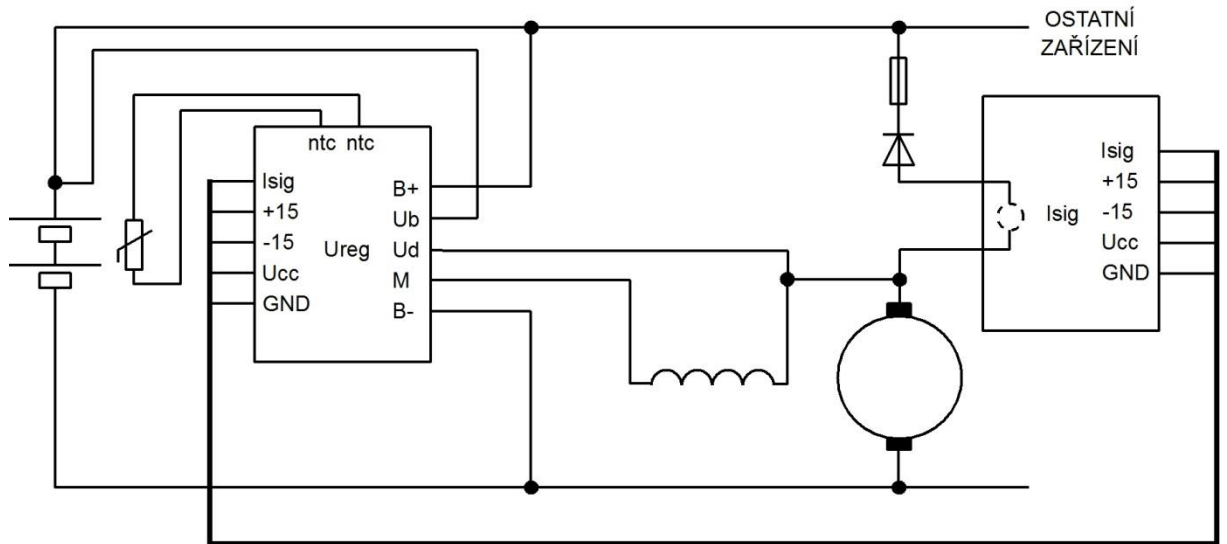
Obrázek 16 - Návrh desky regulátoru



Obrázek 17 - Deska regulátoru

### 5.3 Zapojení regulátoru

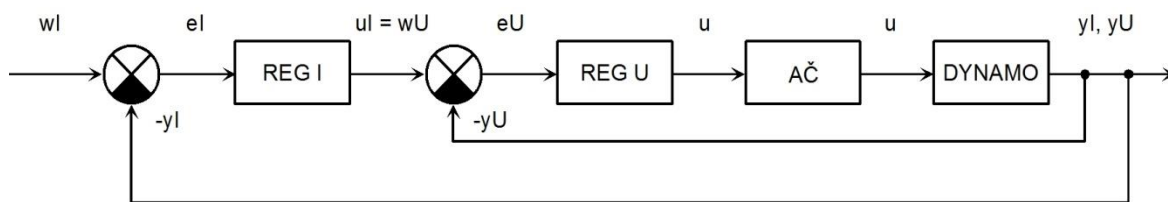
Deska regulátoru je umístěna v původní skříni regulátoru a připojena na původní svorky. Výstup z dynama je veden přes desku snímače proudu, která je propojena s deskou regulátoru. Následuje původní zpětná dioda 200 A a původní tavná pojistka 40 A sloužící jako nadproudová ochrana. Pro odstranění úbytku napětí je měření napětí akumulátorů provedeno samostatnými vodiči. Poblíž akumulátorů je umístěn snímač teploty NTC.



Obrázek 18 - Zapojení nového regulátoru

## 6 POPIS PROGRAMU REGULÁTORU

### 6.1 Regulační schéma



Obrázek 19 - Regulační schéma

Do rozdílového členu vstupuje žádaná hodnota proudu (proudového omezení), kde je vypočítána regulační odchylka proudu. Tato odchylka je zavedena do PI regulátoru proudu. Akční veličina tohoto regulátoru, kterou je zároveň žádaná hodnota napětí, je limitována na hodnoty od 0 V do 28,8 V (nebo na napětí dle teplotní kompenzace). Pokud tedy není dosaženo žádaného proudu, výstupem je maximální napětí. V případě dosažení či překročení žádaného proudu, je žádané napětí snižováno. V dalším rozdílovém členu je vypočtena regulační odchylka napětí, která je předána do PI regulátoru napětí. Zde vypočtená akční veličina je předána do akčního členu, kterým je generátor PWM a spínací tranzistor. Touto veličinou je pak řízeno buzení dynama, na jehož výstupu jsou regulované veličiny proudu a napětí. Ty jsou snímány a zavedeny jako zpětná vazba k příslušným regulátorům.

### 6.2 Ladění regulátoru

Prvotní oživení a určení konstant regulátoru probíhalo na měřicím pracovišti v laboratoři v Doubravících. Regulátor byl připojen k derivačnímu dynamu, akumulátorové baterii a měřicím přístrojům. Nejprve bylo zvyšováno proporcionální zesílení regulátoru napětí až k hranici, kdy regulovaná soustava začala jevit známky kmitání. Zesílení bylo sníženo asi o 1/3. Poté bylo zvyšováno integrační zesílení s ohledem na regulační odchylku, velikost překmitu, dobu regulace a zvlnění proudu. Jako ideální se jevila zhruba dvounásobná hodnota proporcionálního zesílení. Ladění regulátoru proudu probíhalo obdobně.

Regulátor byl následně zkoušen na motorovém voze, kdy bylo třeba zvýšit zesílení vzhledem k velkým překmitům napětí a proudu při změnách otáček.

### 6.3 Vývojový diagram

Vývojový diagram je umístěn v příloze.

## 6.4 Knihovna PID\_v1

Pro regulaci je využita knihovna PID regulátoru. Jedná se o přírůstkový regulátor s ochranou proti přeintegrování. Umožňuje nastavení velikosti zesílení jednotlivých složek, směru regulace, limitů akční veličiny a periody vykonávání.

## 6.5 Popis zdrojového kódu

```
#include <PID_v1.h>
#include <avr/wdt.h>
```

Načtení knihoven pro PID regulátor a funkci Watchdog.

```
const double PREVOD_U = 18.6;
```

Deklarace konstanty pro převod napětí. Vypočtena je hodnota vrácená z A/D převodníku odpovídající 1 V na vstupu děliče napětí 1:11, vzhledem k referenčnímu napětí 5 V.

$$PREVOD\ U = \frac{10BIT}{5 \cdot 11} = \frac{1023}{55} = 18,6 \quad (15)$$

```
const double PREVOD_I = 20.46;
```

Deklarace konstanty pro převod proudu. Vypočtena je hodnota vrácená z A/D převodníku odpovídající 1 A procházející snímačem proudu. Sekundární proud odpovídající 1:1000 primárního proudu je snímán na rezistoru 100 Ω. Úbytek 5 V na snímacím rezistoru odpovídá primárnímu proudu 50 A.

$$PREVOD\ I = \frac{10BIT}{5 \cdot 10} = \frac{1023}{50} = 20,46 \quad (16)$$

```
const double NAPETI = 28.8;
```

Deklarace konstanty žádaného základního napětí ve voltech.

```
const double PROUD = 33.0;
```

Deklarace konstanty žádaného proudového omezení v ampérech.

```
const double T_LEM = 1000;
```

Deklarace konstanty času v milisekundách, jak často provádět nulování počítadla poruch, načítání hodnoty z A/D převodníků snímání napájecího napětí snímače proudu, snímače NTC a vyhodnocování poruchy napájení snímače proudu.

```
const double T_NTC = 60000;
```

Deklarace konstanty času v milisekundách, jak často provádět korekci nabíjecího napětí v závislosti na teplotě akumulátorů.

```
const double KpU = 15.0;
const double KiU = 30.0;
const double KdU = 0.0;
```

Deklarace proměnných proporcionálního, integračního a derivačního zesílení regulátoru napětí a jejich nastavení.

```
const double KpI = 1.0;
const double KiI = 2.0;
const double KdI = 0.0;
```

Deklarace proměnných proporcionálního, integračního a derivačního zesílení regulátoru proudu a jejich nastavení.

```
double zadanaU, pozadovanaU...
```

Deklarace globálních proměnných programu.

```
uint32_t tlem, tntc, tvypis, t = 0;
```

Deklarace globálních proměnných programu pro práci s časem.

```
PID U(&vstupU, &vystupU, &zadanaU, KpU, KiU, KdU, DIRECT);
PID I(&vstupI, &vystupI, &zadanaI, KpI, KiI, KdI, DIRECT);
```

Inicializace a deklaráce regulátorů napětí a proudu, vstupních a výstupních parametrů a určení způsobu regulace, kdy při nulové regulační odchylce je nulová i žádaná hodnota. Znamená to stav, kdy při dosažení či překročení žádané hodnoty je výstupní tranzistor uzavřen.

```
void setup()
```

Část programu, která proběhne jen jednou po spuštění.

```
zadanaI = PROUD * PREVOD_I;
```

Výpočet hodnoty žádaného proudu pro regulátor proudu v 10 bitovém formátu a uložení do proměnné.

```
pozadovanaU = NAPETI ;
```

Uložení požadovaného napětí do proměnné.

```
wdt_enable(WDTO_120MS);
```

Nastavení času Watchdog. Pokud po dobu 120 ms nedojde k resetu časovače, dojde k restartu mikroprocesoru.

```
analogReference(EXTERNAL);
```

Nastavení externí reference napětí pro všechny A/D převodníky.

```
pinMode(8, OUTPUT);  
pinMode(9, OUTPUT);  
pinMode(10, OUTPUT);
```

Nastavení digitálních pinů do režimu výstupu.

```
U.SetTunings(KpU, KiU, KdU);
```

Nastavení zadaných parametrů regulátoru napětí.

```
U.SetSampleTime(2);
```

Nastavení periody vykonávání regulátoru napětí na 2 ms.

```
U.SetOutputLimits(0.0, 255.0);
```

Nastavení limitů akční veličiny regulátoru napětí, který řídí 8 bitový generátor PWM.

```
I.SetTunings(KpI, KiI, KdI);
```

```
I.SetSampleTime(2);
```

Nastavení obdobných parametrů i pro regulátor proudu.

```
I.SetOutputLimits(0.0, (pozadovanaU * PREVOD_U));
```

Nastavení dorazů regulátoru proudu, jehož výstupem je žádaná hodnota napětí. Horní doraz odpovídá žádanému napětí a je předán do regulátoru napětí. Hodnota je opět vypočtena v 10bitovém formátu.

```
for (i = 0; i <= 100; i)...
```

Cyklus slouží k počátečnímu načtení a filtraci hodnot ze všech analogových vstupů a resetu Watchdog časovače. Hodnoty jsou filtrovány pomocí klouzavého průměru.

```
void loop()
```

Hlavní smyčka programu běžící neustále po provedení příkazů v části setup().

```
wdt_reset();
```

Reset Watchdog časovače.

```
t = millis();
```

Uložení času uplynulého od spuštění programu v milisekundách do proměnné.

```
vstupI = analogRead(1);
```

Načtení hodnoty proudu z A/D převodníku a uložení do proměnné.

```
if ( zadanaI >= vstupI )
```

```
{  
    digitalWrite(8, LOW);
```

```
}else
```

```
{  
    digitalWrite(8, HIGH);
```



```
}
```

Pokud je skutečná hodnota proudu na vstupu do A/D převodníku větší než žádané proudové omezení, rozsvítí se LED indikující proudové omezení. V opačném případě zhasne.

```
I.Compute();
```

Vypočte se akční veličina regulátoru proudu a uloží se do proměnné `vystupI`. Touto hodnotou je žádané napětí v 10bitovém formátu.

```
zadanaU = vystupI;
```

Jako žádaná hodnota napětí se uloží výstup z regulátoru proudu.

```
vstupU = analogRead(4);
```

Načtení hodnoty napětí baterie z A/D převodníku a uložení do proměnné.

```
U.Compute();
```

Vypočte se akční veličina regulátoru napětí a uloží se do proměnné `vystupU`. Hodnota je v 8bitovém formátu.

```
analogWrite(6, vystupU);
```

Akční veličina napětí je uložena do D/A převodníku na výstupním pinu č. 6. Zde probíhá generování PWM, kdy hodnota 255 odpovídá 5 V na výstupu a hodnota 0 odpovídá 0 V na výstupu.

```
dynU = analogRead(5);
```

Načtení hodnoty napětí dynamu z A/D převodníku a uložení do proměnné.

```
if (
  (dynU-vstupU) > (3.0*PREVOD_U)
  ||
  dynU > ( (pozadovanaU + 5.0) * PREVOD_U )
  ||
  vstupU > ( (pozadovanaU + 3.0) * PREVOD_U )
)
{
  Nporuch = Nporuch + 1;
  analogWrite(6, 0);
}
```

Podmínka ochrany proti přepětí či vypnutí regulace po přetavení nabíjecí pojistky. Pokud je napětí dynamu o 3 V vyšší než napětí baterie nebo napětí dynamu o 5 V vyšší než žádané napětí nebo napětí akumulátorů o 3 V vyšší než žádané napětí dojde k přičtení jedničky do počítadla poruch a k nastavení nulového napětí na výstup. Vzhledem k teplotní kompenzaci nabíjecího napětí je ke komparaci použita vždy aktuální hodnota žádaného napětí.

```

if ( Nporuch > 20 )
{
  porucha = 1;
  do
  {
    analogWrite(6,0);
    digitalWrite(10, HIGH);
    wdt_reset();
  }while(porucha = 1);
}

```

Podmínka a realizace ochrany. Pokud počet poruch překročí 20 za sekundu, dojde k vypnutí regulace, rozsvícení LED indikující poruchu dynama a resetu Watchdog časovače. Tato smyčka je prováděna neustále. Pro obnovení funkce je nutný restart regulátoru, buď tlačítkem na desce Arduino NANO nebo odpojením napájení regulátoru. Stanovení počtu poruch za sekundu bylo provedeno empirickou zkouškou na vozidle s cílem, aby k vybavení ochrany nedošlo dříve než za 0,5 sekundy. Nulování počítadla poruch každou sekundu je prováděno dále v programu.

```

if (t >= tlem)

```

Podmínka se provede jednou za sekundu, obsahem je:

```

Nporuch = 0;

```

Nulování počítadla poruch.

```

lemP = (0.7 * lemPstary + 0.3 * analogRead(2));
lemPstary = lemP;
lemM = (0.7 * lemMstary + 0.3 * analogRead(3));
lemMstary = lemM;
ntc = (0.7 * ntcstary + 0.3 * analogRead(0));
ntcstary = ntc;

```

Načtení a filtrace dat z A/D převodníků snímání napájecího napětí snímače proudu a napětí NTC snímače.

```

if ( lemP <= (14.5*PREVOD_U) || lemP >= (15.5*PREVOD_U) ||
lemM <= 558 || lemM >= 744 )
{
  porucha = 1;
  do
  {
    analogWrite(6,0);
    digitalWrite(9, HIGH);
    wdt_reset();
  }while(porucha = 1);
}

```

Podmínka vyhodnocení poruchy napájení snímače proudu, pokud kladné napájecí napětí není v mezích 14,5 až 15,5 V nebo záporné napájecí napětí v mezích -14,5 až -15,5 V.

Napětí -15 V je měřeno děličem 11:1 proti napětí 5 V. A/D převodník měří napětí v rozmezí 0-5 V, proto je nutno odečíst 15 V. Na vstupu A/D převodníku tak bude napětí:

$$U = \left( \left( \frac{5 - (-15)}{11} \right) * 10 \right) - 15 = 3,18 V \quad (17)$$

Po přepočtu na hodnotu vrácenou 10bitovým A/D převodníkem:

$$U_{BIT} = \frac{1023}{5} * 3,18 = 650 \quad (18)$$

Stanovené meze odpovídají hodnoty 744 a 558.

V případě provedení podmínky dojde k vypnutí regulace, rozsvítí se LED indikující poruchu snímače proudu, resetuje se Watchdog časovač. Tato smyčka běží neustále až do restartu procesoru.

```
tlem = t + T_LEM;
```

Uložení času posledního provedení.

```
if ( t >= tntc )
```

Podmínka se provede jednou za minutu. Obsahem je:

```
if ( ntc > 60 && ntc < 900 )
```

Vyhodnocení, zda-li na NTC nedošlo ke zkratu či jeho odpojení. Meze odpovídají reálným teplotám 72 °C a -40 °C, které v běžném provozu v našich klimatických podmínkách nelze dosáhnout.

```
ntcR = (46970.0/ntc) * (1023.0-ntc);
```

```
teplota = ntcR/47000.0;
```

```
teplota = log(teplota);
```

```
teplota /= 3390.0;
```

```
teplota += 1.0 / (25.0 + 273.15);
```

```
teplota = 1.0 / teplota;
```

```
teplota -= 273.15;
```

Výpočet odporu termistoru a následně teploty.

Termistor je zapojen v děliči s rezistorem, jehož skutečná hodnota je zapsána v programu pro zvýšení přesnosti. Odpor termistoru vypočteme ze znalosti odporu rezistoru v děliči a úbytku napětí na něm.

K výpočtu teploty termistoru využijeme zjednodušený Steinhartův-Hartův vztah [7]:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (19)$$

kde:

- T.....teplota termistoru
- T<sub>0</sub>.....referenční teplota 25 °C
- B.....beta faktor udávaný v dokumentaci termistoru
- R.....odpor termistoru
- R<sub>0</sub>.....odpor termistoru při referenční teplotě

pozadovanaU = NAPETI - ((teplota-25.0)\*0.06);

Výpočet kompenzace napětí. Změně teploty o 1 °C odpovídá změna nabíjecího napětí pro dva sériově zapojené 12 V akumulátory o 0,06 V. Tímto koeficientem je vynásobena odchylka teploty od 25 °C, což je teplota, které odpovídá nabíjecímu napětí 28,8 V, tedy základnímu napětí uloženému v konstantě. Od této konstanty je pak odečtena kompenzace napětí a uložena do proměnné.

```
if( pozadovanaU >= 29.8 )
{
    pozadovanaU = 29.8;
}
```

```
if( pozadovanaU <= 28.0 )
{
    pozadovanaU = 28.0;
}
```

Podmínky limitace kompenzace napětí. Pokud kompenzace nabíjecího napětí překročí 29,8 V nebo klesne pod 28,0 V, je tato hodnota nastavena jako limitní.

```
I.SetOutputLimits(0.0, (pozadovanaU*(PREVOD_U)));
```

Nastavení dorazů regulace regulátoru proudu, jehož výsledkem je žádané napětí.

```
}else
{
    pozadovanaU = NAPETI;
```

```
I.SetOutputLimits(0.0, (pozadovanaU*(PREVOD_U)));
```

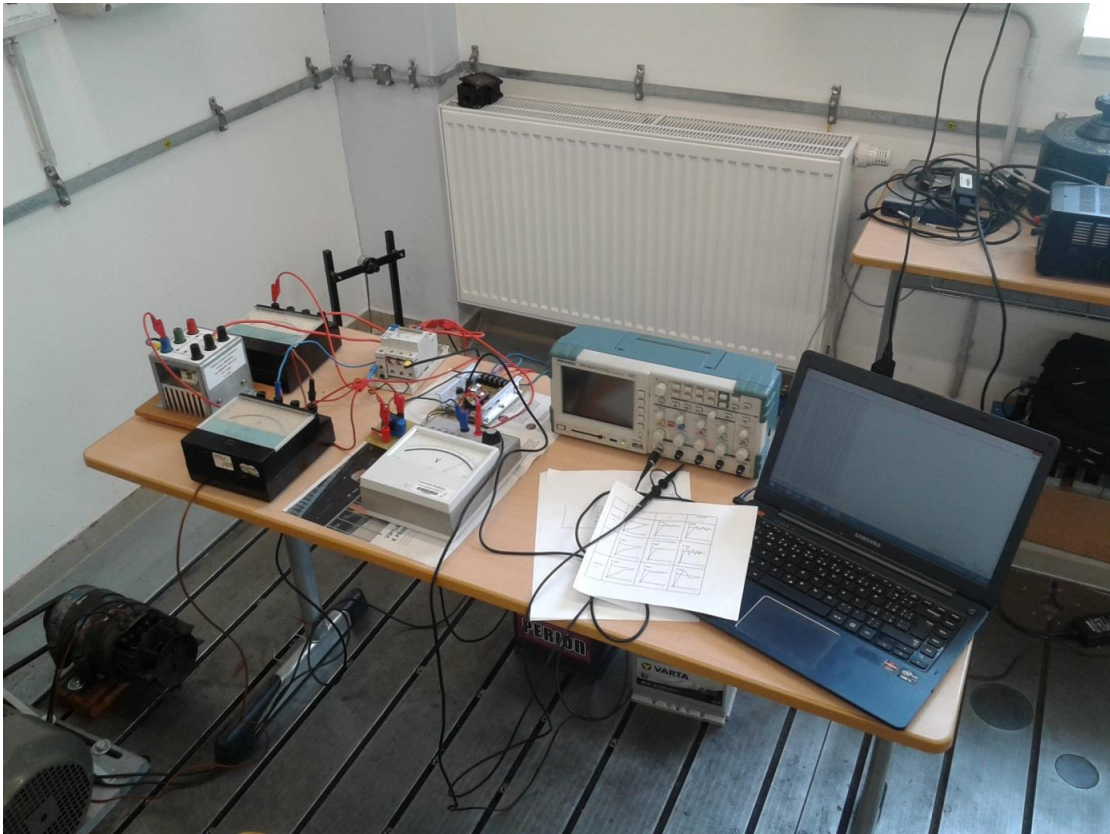
V případě nesplnění úvodní podmínky, tedy v případě zkratu či odpojení snímače NTC, dojde k nastavení základního nabíjecího napětí 28,8 V.

```
tntc = t + T_NTC;
```

Uložení času posledního provedení.



## 7.2 Měřící pracoviště



Obrázek 21 - Fotografie měřícího pracoviště

## 8 MĚŘENÍ REGULÁTORU NA MOTOROVÉM VOZE

Pro zhodnocení kvality nového regulátoru bylo provedeno srovnávací měření přímo na motorovém voze. Měření probíhalo při různých otáčkách naftového motoru, různém zatížení a několika skokových změnách zátěže a otáček. Mimo vůz pak proběhlo měření teplotní kompenzace nabíjecího napětí.

Měřenými veličinami byly:

- výstupní proud dynamu
- budicí proud dynamu
- napětí akumulátorů
- žádané nabíjecí napětí v závislosti na teplotě

Měřeny byly tyto stavy s očekávanými výsledky:

- start motoru - začátek dobíjení proběhne bez nebo jen s malým překmitem proudu, proud bude omezen na hodnotu 33 A, napětí akumulátoru bude narůstat, po dosažení 28,8 V bude tato hodnota udržována a proud klesat.
- volnoběžné otáčky při plně nabitém akumulátoru - napětí baterie a proud dynamu by měly být konstantní.
- zvýšené otáčky při plně nabitém akumulátoru - napětí baterie a proud dynamu by měly být konstantní.
- změna otáček při plně nabitém akumulátoru - napětí baterie a proud dynamu by měly být konstantní nebo jen s malým překmitem na začátku přechodového děje a ustálit by se měly na původních hodnotách.
- zatížení - skokovým nárůstem proudu by nemělo dojít ke snížení napětí nebo rozkmitání regulátoru. Po dosažení proudového omezení by mělo dojít ke snížení napětí a udržování proudu na žádané hodnotě.
- odlehčení - skokovým snížením proudu by nemělo dojít ke zvýšení napětí nebo rozkmitání regulátoru, pokud nebyl ve stavu proudového omezení.

Nejprve byly změřeny charakteristiky původního regulátoru pro možnost srovnání, ten byl poté demontován a na jeho místo osazen nový regulátor bez teplotního snímače.



V průběhu měření byly ještě upravovány konstanty PI regulátoru, vzhledem k jinému typu dynama a zjištěným vlastnostem.

Vzhledem ke značné složitosti a následnému zpracování dat z měření otáček motoru, kdy by se muselo snímat střídavé napětí na tachalternátoru motoru, to následně přepočítat na stejnosměrné napětí, hodnotu otáček a provést ruční srovnání časové osy dříve naměřených dat s časovou osou otáček, bylo od měření otáček upuštěno. Pro reprezentaci pochodů v obou regulátorech postačí jejich srovnání pouze na základě času.

Měření teplotní kompenzace nabíjecího napětí proběhlo nejprve ohřevem čidla v nádobě s vodou a následným chlazením v mrazničce. Naměřené údaje teploty byly srovnávány s teplotou snímanou multimetrem. Pro účely měření byl upraven program regulátoru, kdy ke korekci napětí nedochází jednou za minutu, ale jednou za sekundu.

Použité přístroje:

- 4kanálový osciloskop Tectronix
- 2x klešťová proudová sonda s převodem 10 mV/A
- diferenční sonda
- počítač pro záznam dat z osciloskopu
- digitální multimetr s teplotní sondou

## 8.1 Měřicí pracoviště

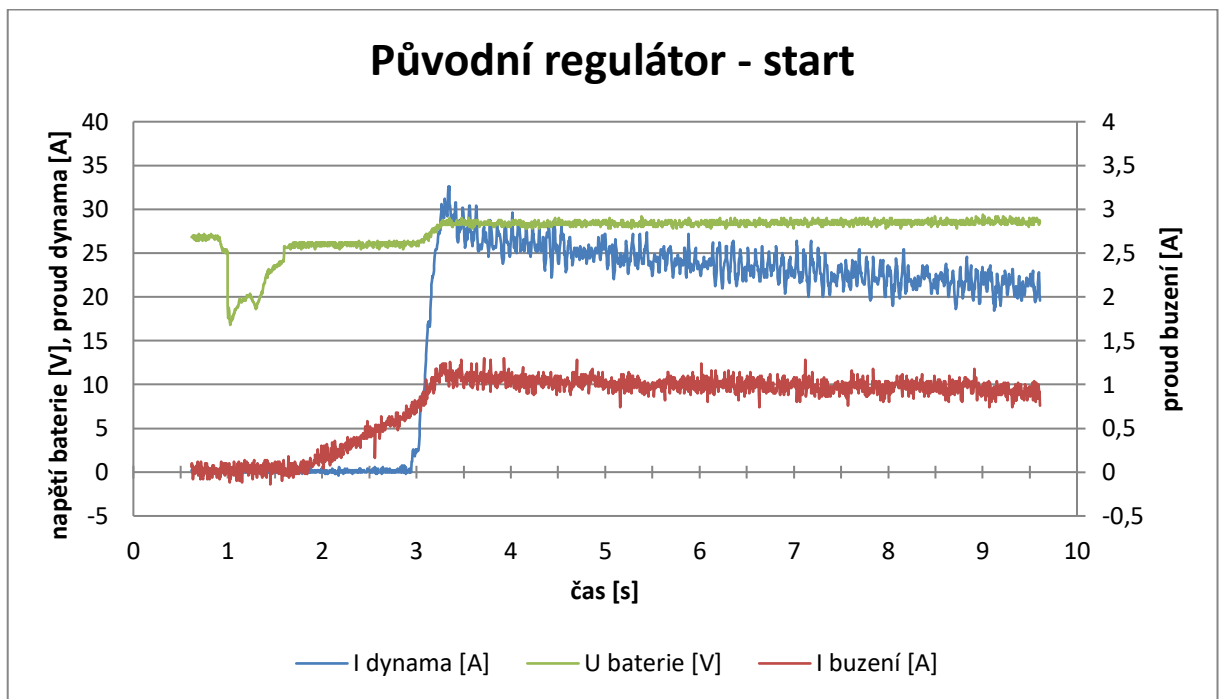


Obrázek 22 - Fotografie měření na motorovém voze 1

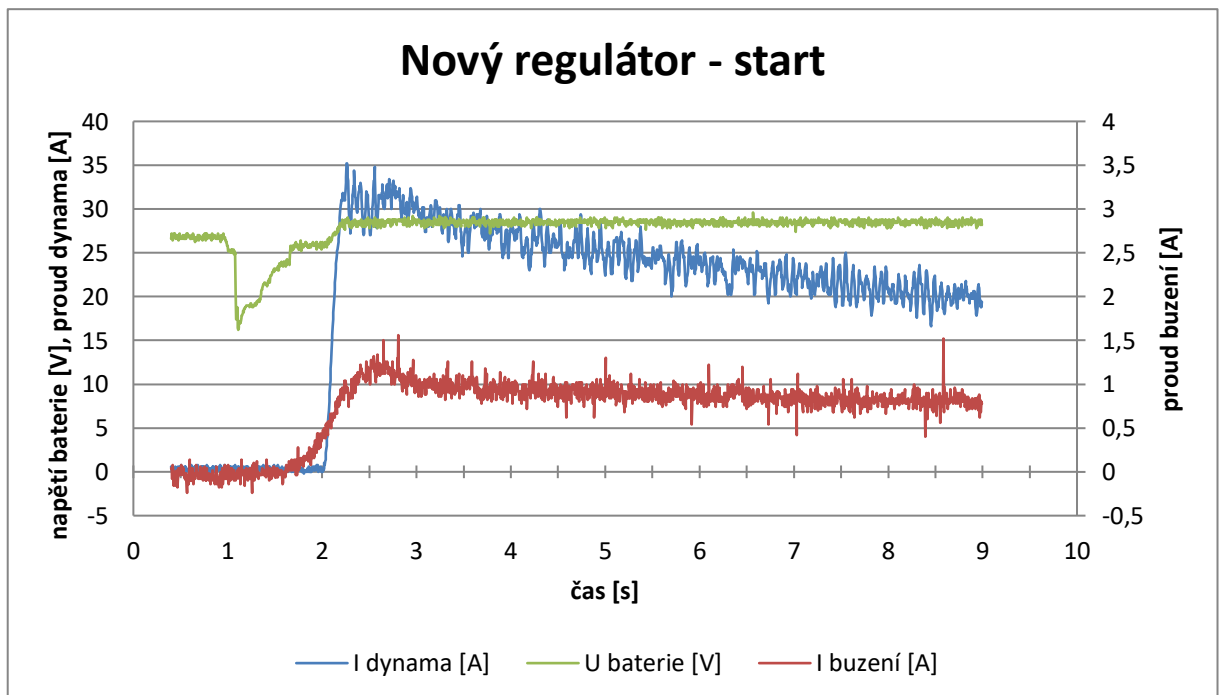


Obrázek 23 - Fotografie měření na motorovém voze 2

## 8.2 Start motoru



Graf 4 - Původní regulátor - start



Graf 5 - Nový regulátor - start

Původní regulátor:

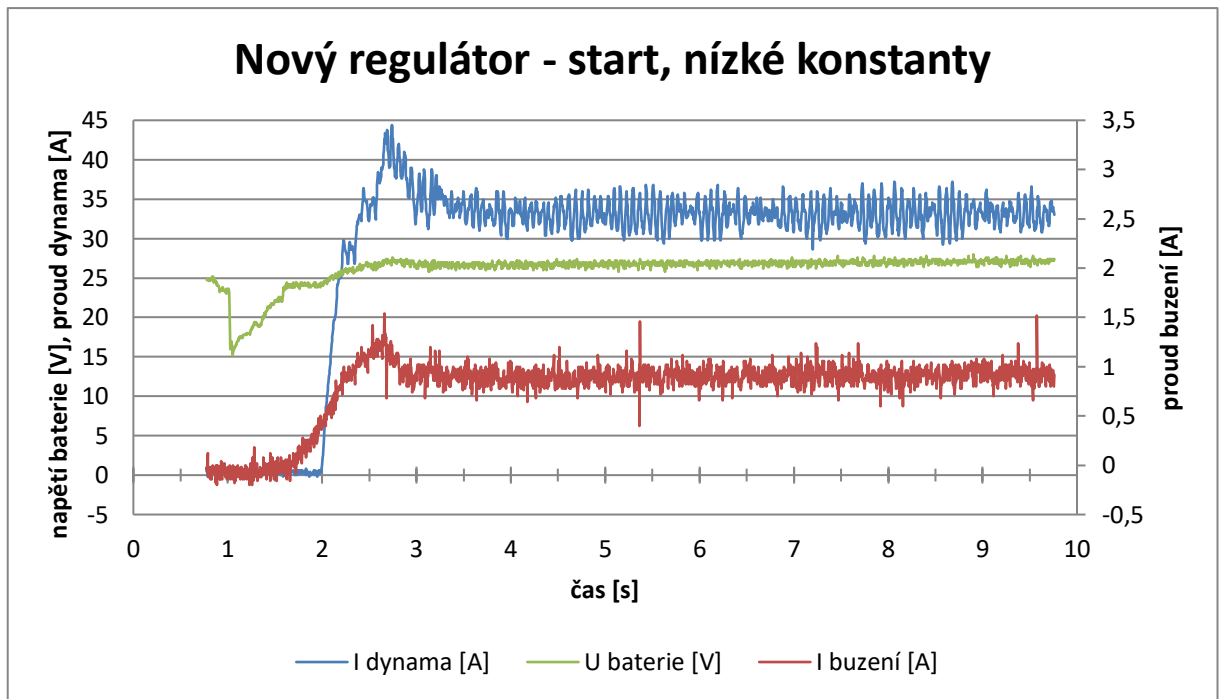
Zpočátku jsou akumulátory plně nabity, následuje velký pokles napětí při startu motoru, kdy dojde k částečnému odebrání energie a napětí akumulátorů klesne. Následuje fáze

nabuzování dynama, kdy roste budící proud až do plného nabuzení, kdy začne dynamo dobíjet akumulátory. Je zřejmé, že s postupným dobíjením klesá budící i výstupní proud. Nebylo dosaženo proudového omezení, regulátor by tak měl udržovat konstantní napětí, což se ale vzhledem ke dříve zmíněným vlastnostem neděje a napětí roste nepřímo úměrně výstupnímu proudu, což je špatně. Jinak je regulační pochod kvalitní, nedochází k překmitům, zvlnění napětí a proudu.

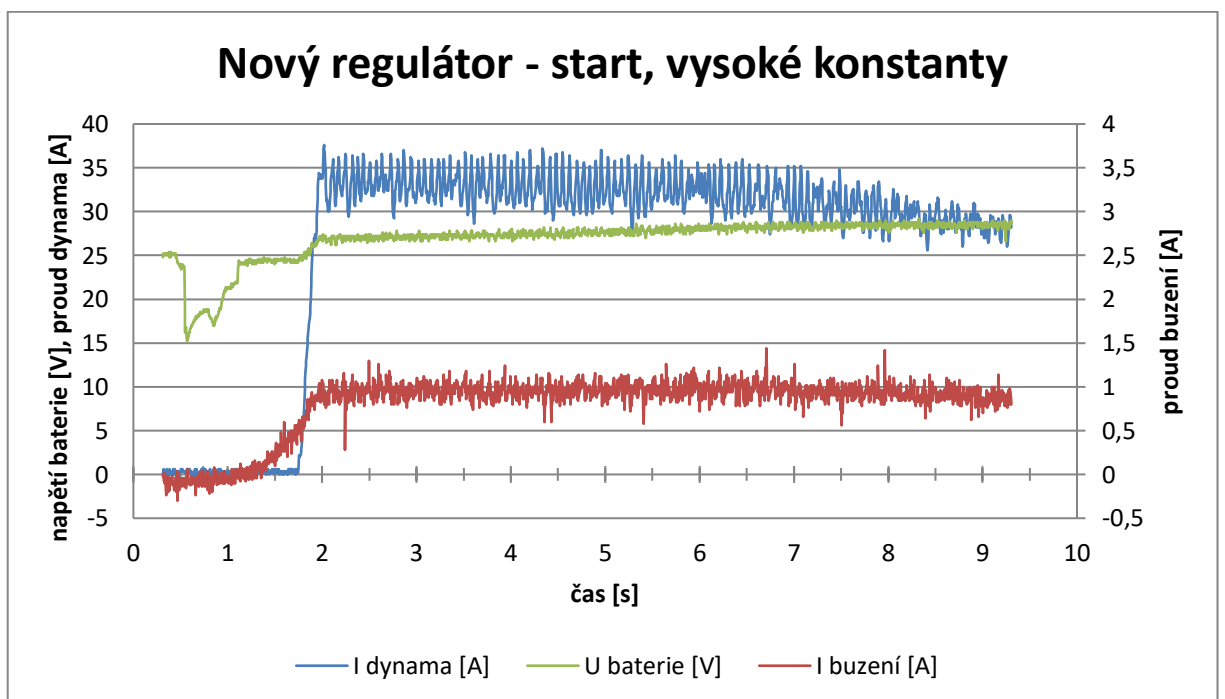
Nový regulátor:

Do začátku dobíjení je průběh podobný, pouze s rozdílem rychlejšího nabuzení. Následně dojde k omezení výstupního proudu na střední hodnotu 33 A a napětí na akumulátoru roste na 28,8 V. Po dosažení je toto napětí udržováno, budící a výstupní proud klesá. Regulační pochod je opět kvalitní a výsledná nabíjecí charakteristika odpovídá požadovaným vlastnostem regulátoru.

Start probíhal několikrát a byly upravovány konstanty regulátoru proudu při proudovém omezení. Bylo nutno zvolit optimální rychlost regulace. Při příliš nízkých konstantách docházelo po startu k velkému překmitu napětí a proudu, při vysokých naopak začínal regulátor příliš kmitat. Následující dva průběhy ukazují oba zmíněné stavy.

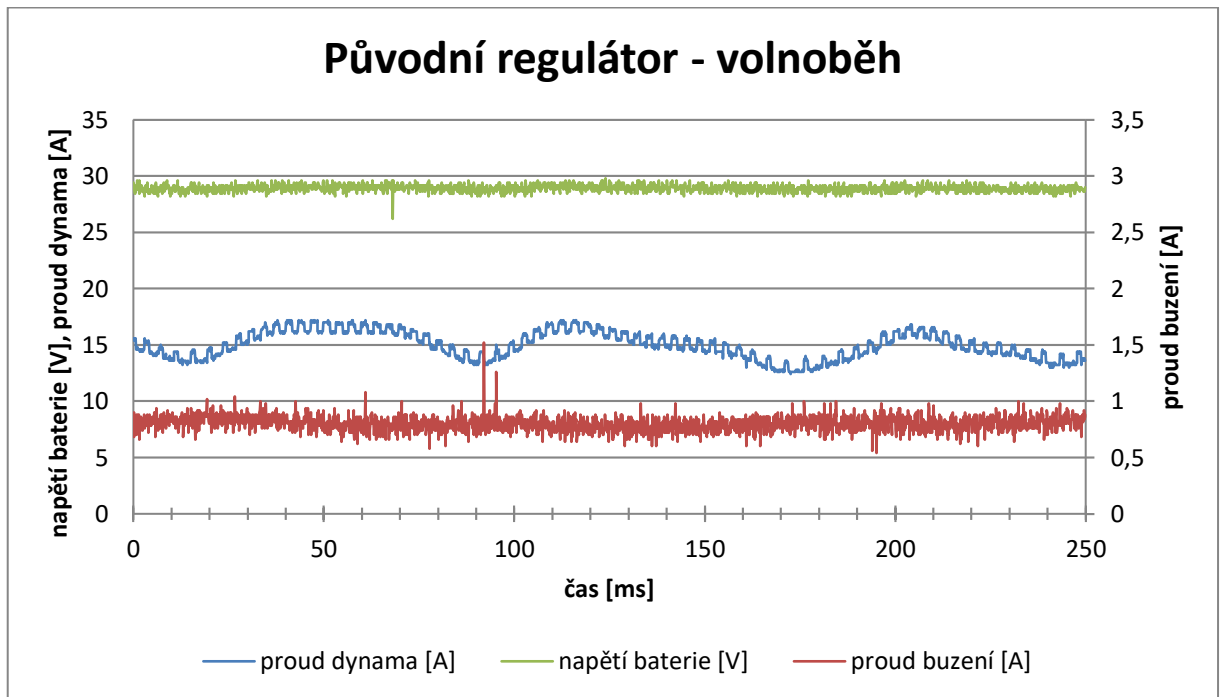


Graf 6 - Nový regulátor - start, nízké konstanty

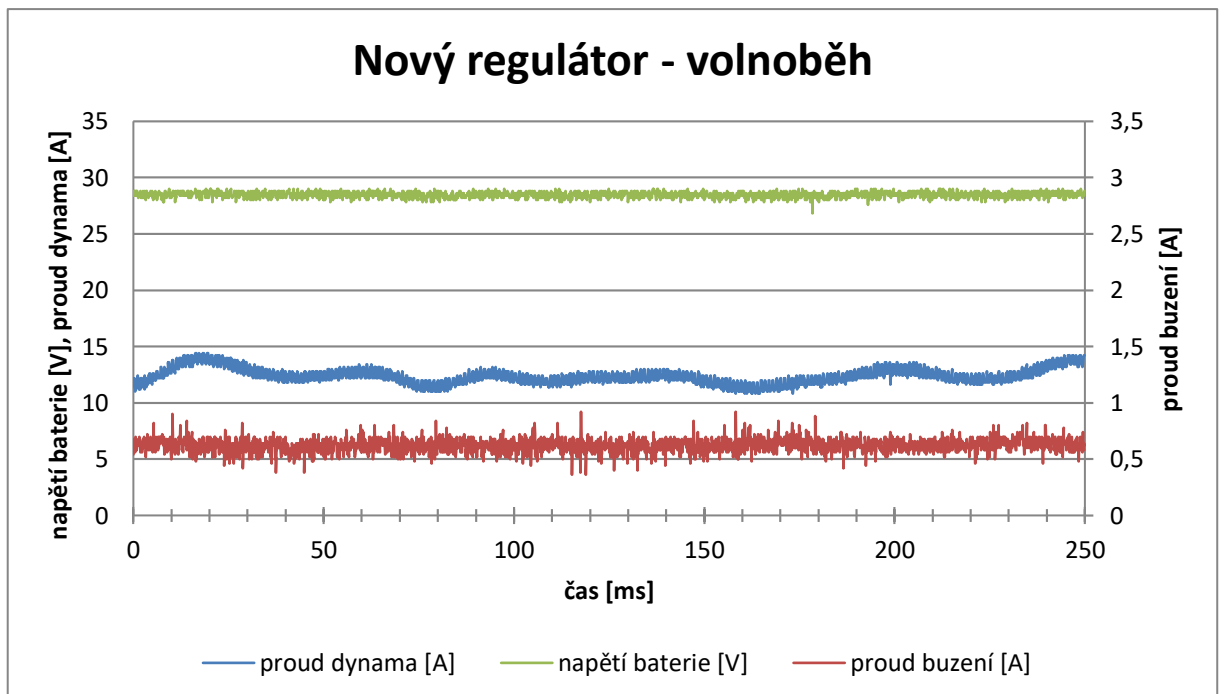


Graf 7 - Nový regulátor - start, vysoké konstanty

### 8.3 Volnoběžné otáčky



Graf 8 - Původní regulátor - volnoběh

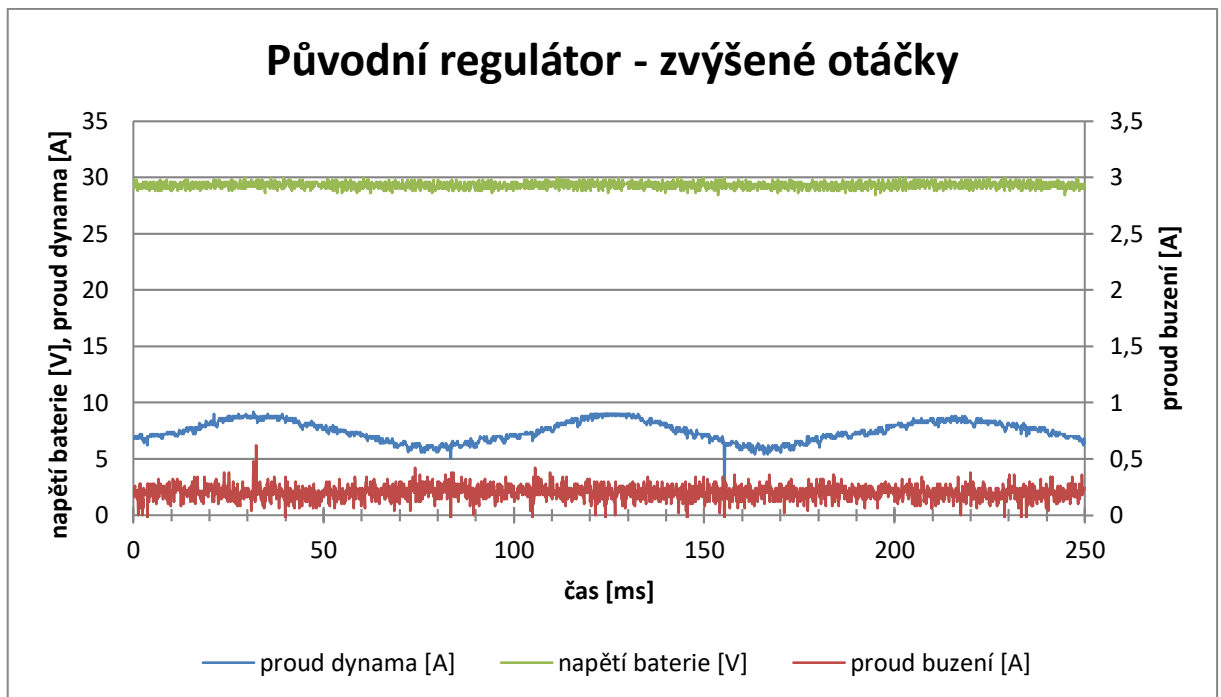


Graf 9 - Nový regulátor - volnoběh

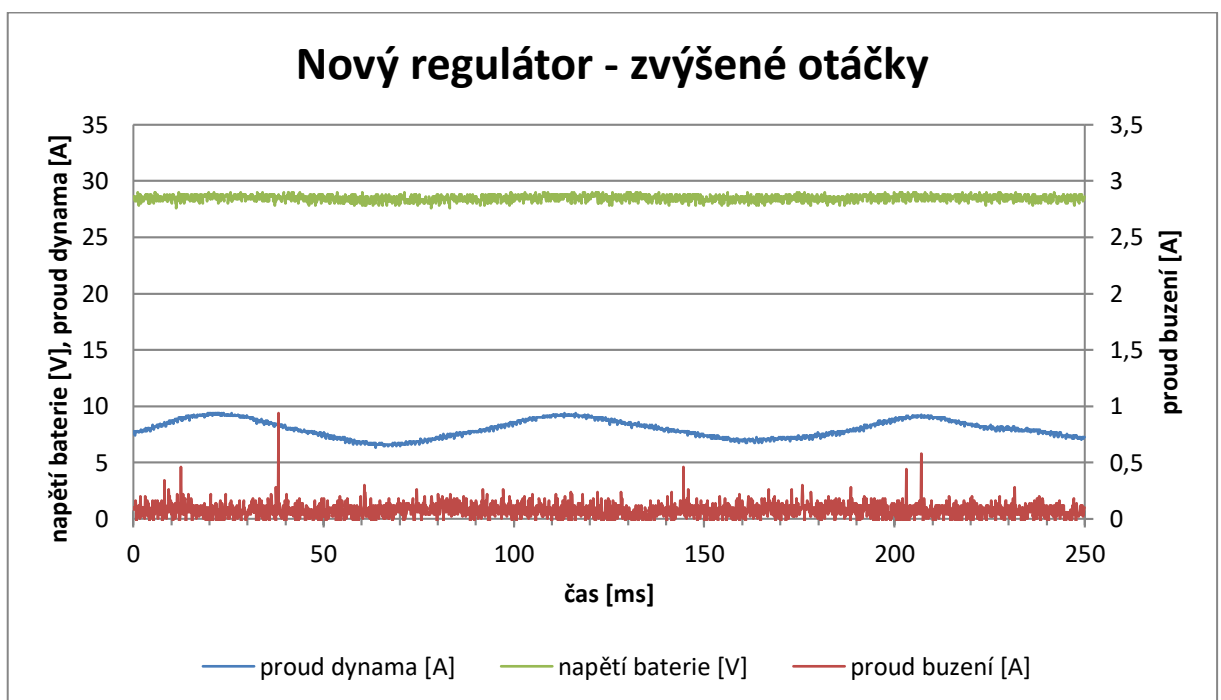
Měření proběhlo přibližně při 550 ot/min. Otáčky byly odečteny z otáčkoměru motoru. Průběhy obou regulátorů jsou podobné, u nového je patrná vyšší spínací frekvence, tím způsobené menší zvlnění napětí a menší zvlnění výstupního proudu. Zvlnění proudu je pravděpodobně způsobeno kolísáním otáček spalovacího motoru a mechanickým rázům

v soustrojí. Charakteristika nového regulátoru odpovídá požadovaným vlastnostem, nejeví známky nestability.

#### 8.4 Zvýšené otáčky



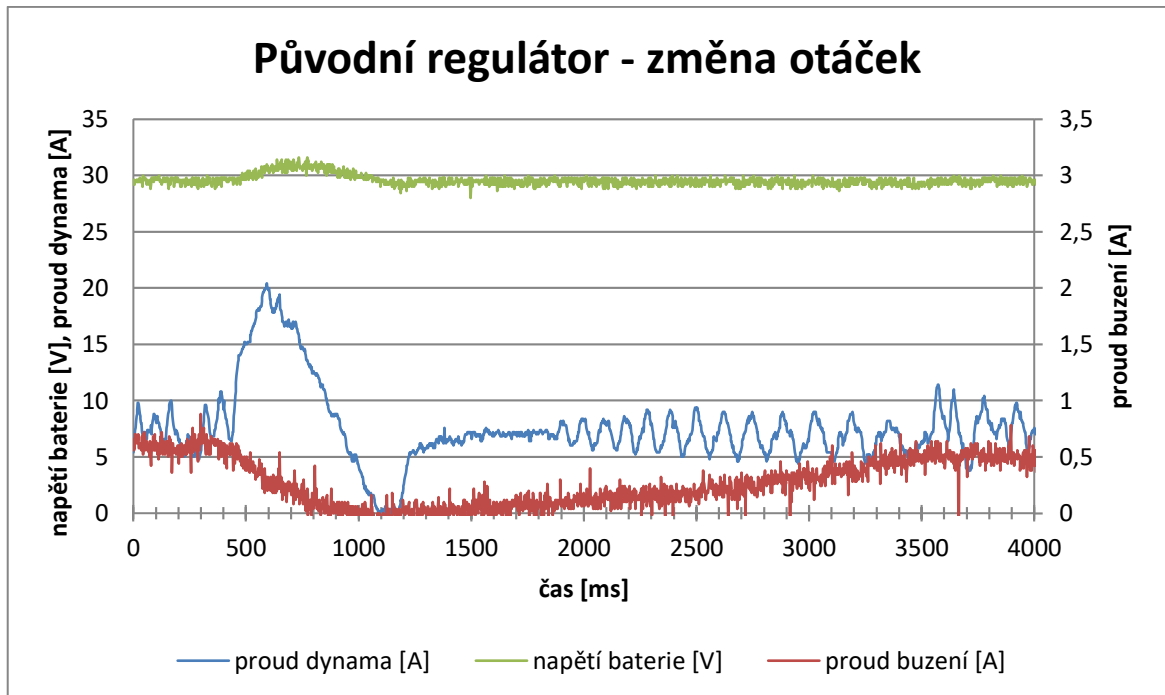
Graf 10 - Původní regulátor - zvýšené otáčky



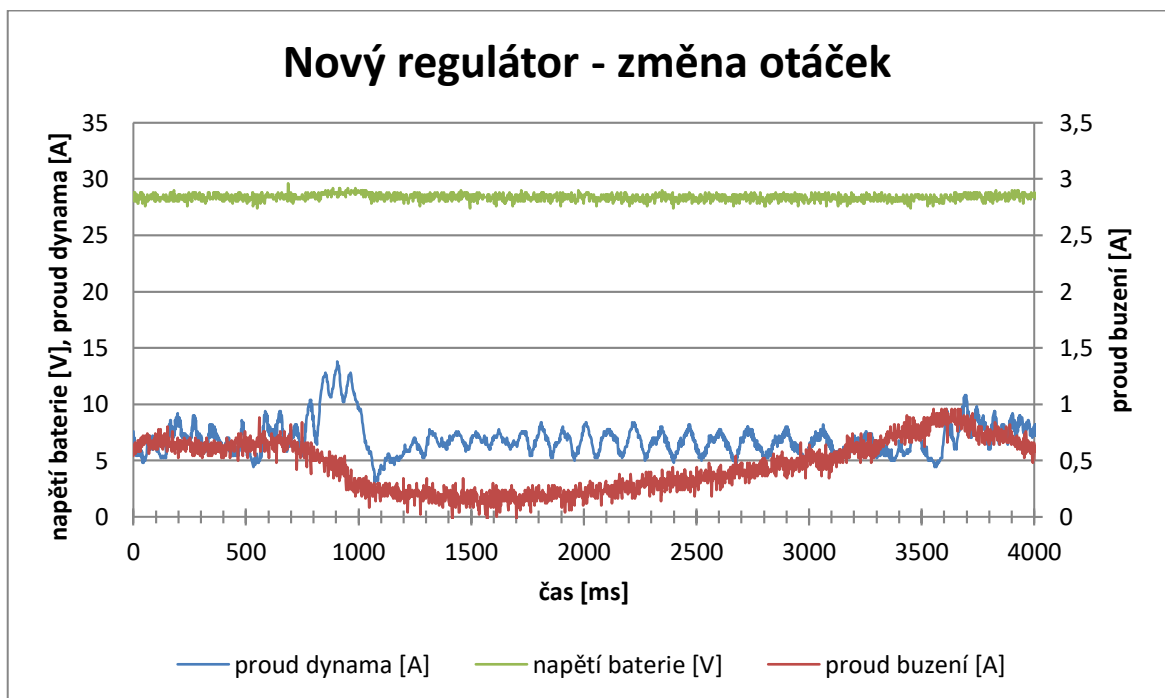
Graf 11 - Nový regulátor - zvýšené otáčky

Měření proběhlo přibližně při 1400 ot/min. Průběhy obou regulátorů jsou velmi podobné.

## 8.5 Změna otáček



Graf 12 - Původní regulátor - změna otáček

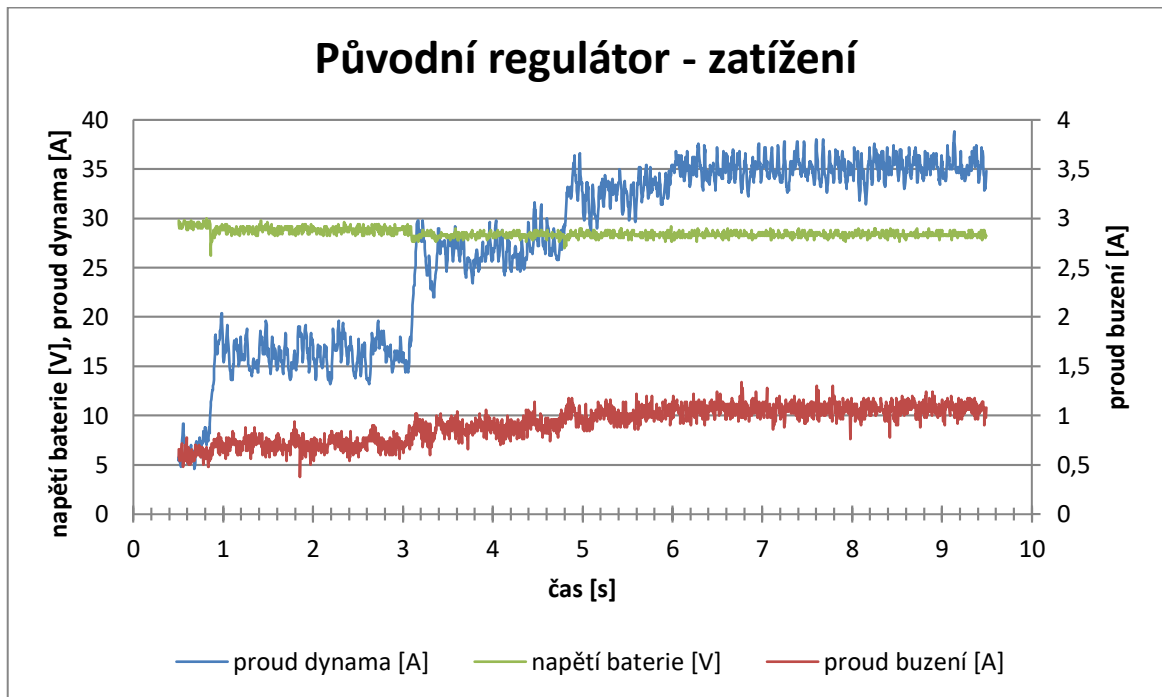


Graf 13 - Nový regulátor - změna otáček

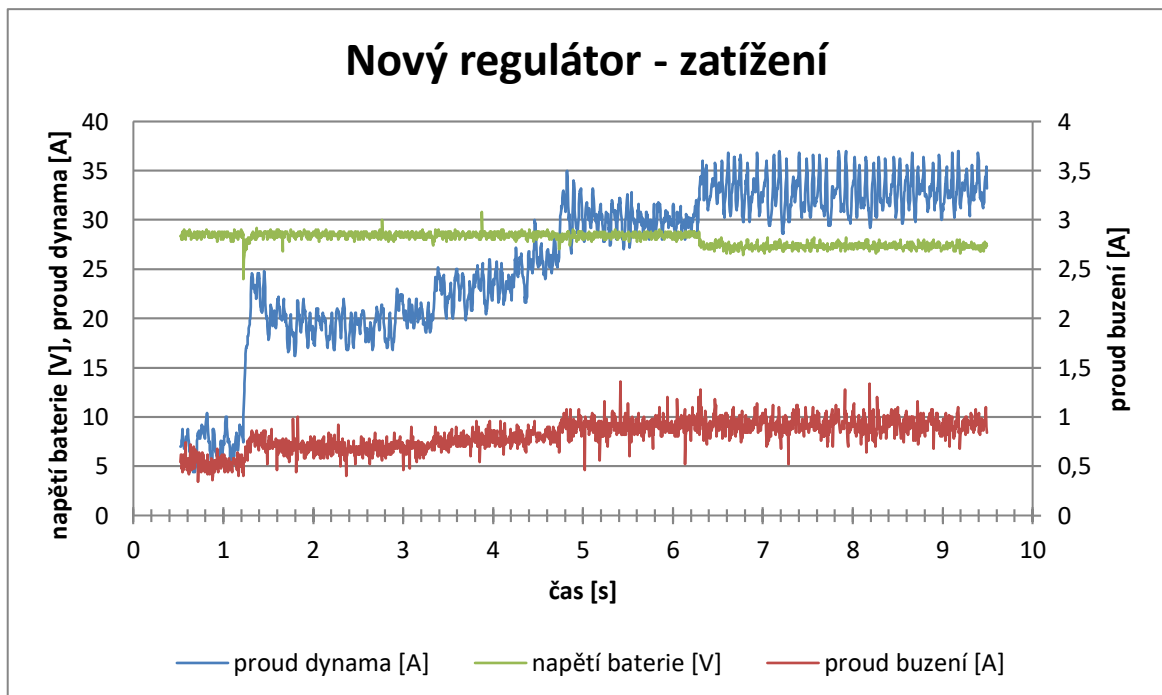


Zásadní vlastností regulátoru je reakce na změnu otáček. Otáčky byly zvýšeny plnou dávkou paliva z volnoběžných až k omezovači, což je v rozsahu 550 - 2200 ot/min, a následně sníženy zpět na volnoběh. U obou regulátorů je patrné snížení budícího proudu při zvýšení otáček a následné zvyšování proudu při snižování otáček. U původního regulátoru je patrný velký překmit napětí i výstupního proudu při zvýšení otáček a následné rozkmitání výstupního proudu při snižování otáček, což může být opět způsobeno mechanickými rázy v soustavě. U nového regulátoru jsou patrné podobné překmity, ale výrazně menší. Výstupní proud se rozkmitá podobně jako u původního regulátoru, ale s menší amplitudou. Nový regulátor opět vyhovuje vlastnostmi požadovaným parametrům.

## 8.6 Zatížení



Graf 14 - Původní regulátor - zatížení

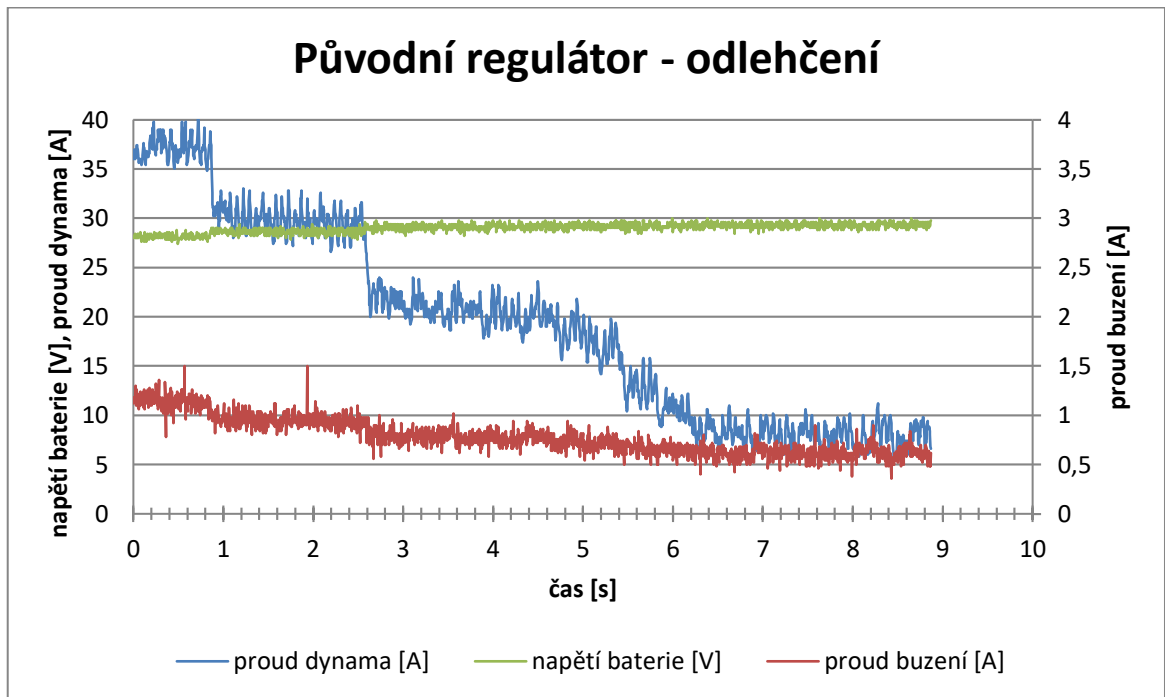


Graf 15 - Nový regulátor - zatížení

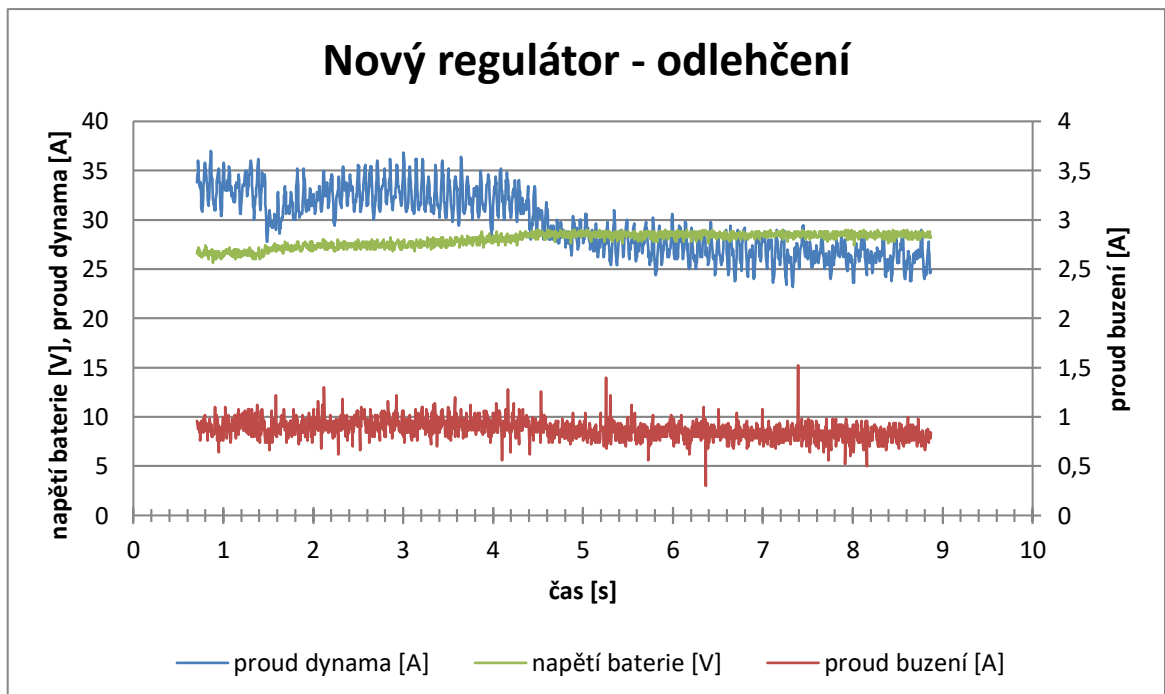
Při volnoběžných otáčkách došlo k postupnému zatížení nabíjecího dynama sepnutím osvětlení oddílu pro cestující, naftového topení a vnějšího osvětlení. V případě původního regulátoru postupně docházelo ke snižování nabíjecího napětí s rostoucí zátěží. Zátěž vzrostla až na 36 A, tím již docházelo k přetížení dynama, ale regulátor na tuto skutečnost nereagoval.

U nového regulátoru je nabíjecí napětí po celou dobu konstantní, po dosažení proudového maxima 33 A dojde ke snížení tohoto napětí, což je správná funkce. Zvětšené kmitání proudu dynama při omezení bylo sníženo dříve zmíněnou úpravou konstant regulátoru a je patrné na předchozích měřeních. Při skokové změně zátěže dojde u obou regulátoru ke krátkodobému poklesu napětí, na který okamžitě reagují.

## 8.7 Odlehčení



Graf 16 - Původní regulátor - odlehčení

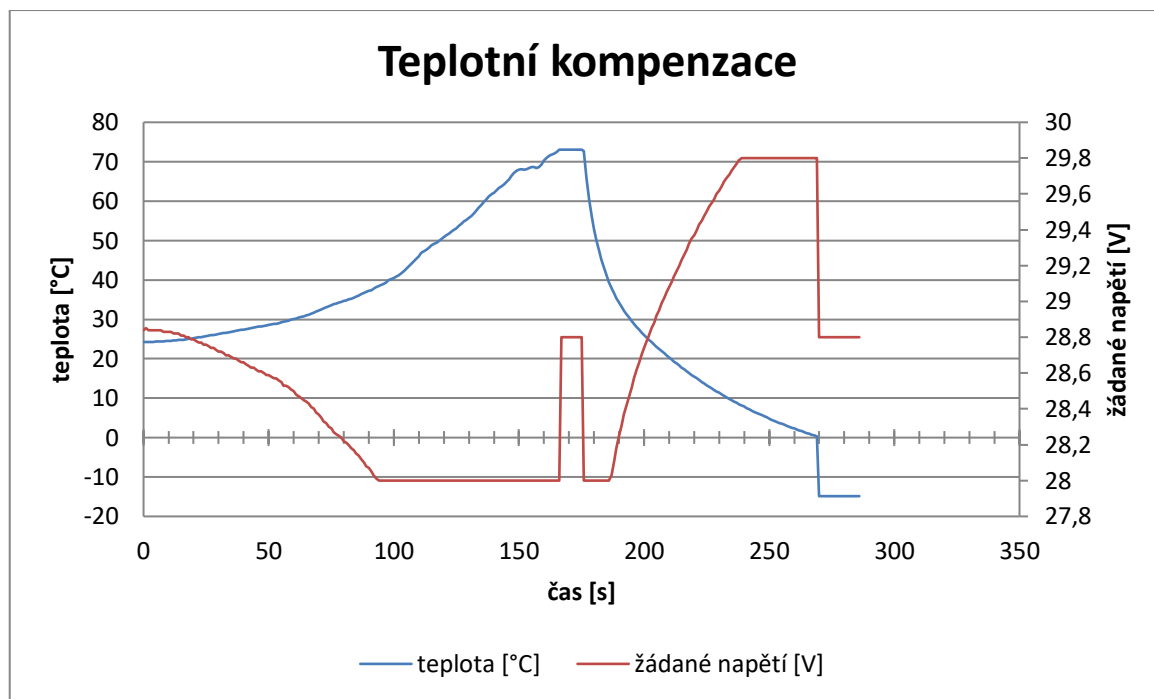


Graf 17 - Nový regulátor - odlehčení

Průběhy analogicky odpovídají zatížení. Postupně bylo vypnuto osvětlení oddílu pro cestující, naftové topení a vnější osvětlení. Původní regulátor opět neomezuje maximální proud a při odlehčování dochází k postupnému zvyšování nabíjecího napětí. Měření nového regulátoru probíhalo při značně méně nabitých akumulátorech, proto je proud omezován i po

vypnutí osvětlení oddílu pro cestující a pod tuto mez klesne až po vypnutí vnějšího osvětlení. Je patrná úprava konstant regulátoru proudu, kdy proud dynamicky již tolik nekmitá. Při skokové změně zátěže nedochází k žádné změně napětí.

## 8.8 Měření teplotní kompenzace



Graf 18 - Nový regulátor - teplotní kompenzace

S rostoucí teplotou dochází ke snižování žádaného napětí o  $0,06 \text{ V}/10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při dosažení stanovené meze minimální napětí  $28 \text{ V}$  již ke snižování nedochází. Jakmile teplota přestoupí  $72 \text{ }^\circ\text{C}$ , je vyhodnocena porucha NTC čidla a je nastaveno základní nabíjecí napětí  $28,8 \text{ V}$ . Při poklesu pod tuto teplotu opět dochází ke kompenzaci až na mez maximálního stanoveného napětí  $29,8 \text{ V}$ , kdy již opět dále není zvyšováno. Při teplotě asi  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  bylo odpojeno NTC čidlo, což bylo opět vyhodnoceno jako porucha a nastaveno bylo základní nabíjecí napětí  $28,8 \text{ V}$ . Měřená teplota byla porovnáována současným měřením multimetrem s teplotní sondou a po úpravě konstant v programu regulátoru bylo dosaženo přesnosti měření  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 8.9 Závěr měření

Při srovnávacím měření byly ověřeny již dříve zmíněné nedostatky původního regulátoru, které se novým regulátorem podařilo úspěšně odstranit. U původního regulátoru se jedná především o pokles nabíjecího napětí s rostoucí zátěží, přetěžování dynamicky důsledkem špatně pracujícího omezení proudu a velkými překmitými napětí a proudy při změně otáček. Novým regulátorem se tyto špatné vlastnosti podařilo odstranit, zlepšila se kvalita regulace

a navíc byla doplněna možnost kompenzace nabíjecího napětí v závislosti na teplotě akumulátorů. Během měření vznikla potřeba úprav konstant regulátoru pro dosažení uspokojivé funkce, což se podařilo.

## ZÁVĚR

V první části jsem se seznámil se způsoby a možnostmi regulace derivačního dynamu ve zdrojové soustavě vozidla. Starším způsobem byla regulace pomocí elektromechanického vibračního regulátoru, která se postupně stávala zastaralou. S postupným rozvojem elektroniky se nabízela možnost aplikace polovodičů i do zmíněných regulátorů. Vznikla poměrně jednoduchá zařízení, zejména díky integraci součástek, která nevyžadovala v běžném provozu prakticky žádnou údržbu. Při rekonstrukci popisovaného motorového vozu bylo využito tohoto zařízení vzhledem k nedostupnosti původního vibračního regulátoru. Popisu této zdrojové soustavy se věnuje další část mé práce, kde je poukázáno zejména na nedostatky. Následně je provedena rozvaha o novém regulátoru, jeho možných prvcích a o uvažovaných provozních a bezpečnostních funkcích.

Ve druhé části je přistoupeno k realizaci uvažovaného zařízení. Jsou konkrétně stanoveny jednotlivé součástky, proveden návrh zapojení a výroba desek plošných spojů. Pro řízení regulátoru je sestaven zdrojový kód na základě funkčních a bezpečnostních požadavků. Regulaci napětí a proudového omezení dynamu řídí dva PI regulátory, kdy první řídí omezení proudu a druhý reguluje napětí. Po sestavení desek regulátoru a nahrání zdrojového kódu do mikrokontroléru bylo provedeno prvotní oživení a měření regulátoru v laboratoři na zkušebním stavu. Ten sestával z asynchronního motoru, malého derivačního dynamu a akumulátoru. Díky tomuto zařízení, simulujícímu zdrojovou soustavu motorového vozu, bylo možné v řízených a klidných podmínkách vyzkoušet a naladit regulátor bez hrozby poškození motorového vozu. Tato fáze proběhla úspěšně a bylo přistoupeno k instalaci a měření přímo na vozidle. Pro možnost srovnání byl nejprve změřen původní regulátor a následně nový, u kterého došlo k úpravě regulačních konstant vzhledem k jinému dynamu. Po zpracování a srovnání změřených dat vyšlo jednoznačně najevo, že novým regulátorem se podařilo nejen odstranit všechny nevyhovující vlastnosti původního regulátoru, ale došlo také ke zkvalitnění průběhu regulace. Vzhledem ke zrušení nostalgických jízd vlivem pandemie COVID-19 bude zkušební provoz regulátoru zahájen až po odevzdání této práce, proto zde poznatky z provozu chybí. Díky použití mikrokontroléru však případná úprava regulátoru spočívá pouze v připojení PC a úpravě zdrojového kódu. V průběhu práce jsem využil znalosti získané studiem a nabyt jsem zajímavé zkušenosti ohledně regulátorů a jejich seřizování, což je pro mě osobně největším přínosem.

## SEZNAMY

### Seznam literatury

- [1] ULIARCZYK, Augustin a kolektiv. *Elektrická výzbroj dielelektrických lokomotiv ČKD*. Praha: NADAS, 1983.
- [2] PAVLÁK, Milan a VRCHOVSKÝ, Milan. *Opravy elektrické výzbroje motorových vozidel*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, n.p., 1963.
- [3] KUBÍN, Pavel. *Elektrická zařízení osobních automobilů*. Praha: Nakladatelství technické literatury, n.p., 1973.
- [4] ARENDÁŠ, Miroslav a Milan RUČKA. *Nabíječe a Nabíjení*. Praha: Nakladatelství technické literatury, n.p., 1987.
- [5] *Návod k použití a údržbě: Akumulátory Autopart*. 2008.
- [6] *Výrobní dokumentace ČKD*.
- [7] Arduino. *Arduino* [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://arduino.cz/>
- [8] *Datasheet - LM723 Voltage regulator*. 2013. Texas Instruments.
- [9] *Datasheet - Current Transducer LA 55-P*. 17. vydání. LEM, 2018.
- [10] *Datasheet - 3W DC-DC Regulated Dual Output Converter: DCW03A-15*. Mean Well, 2018.
- [11] *Datasheet - L-934GT*. 2. vydání. Kingbright, 2003.
- [12] *Datasheet - L78 Positive voltage regulator*. 36. vydání. STMicroelectronics, 2018.
- [13] *Datasheet - BT151 series L and R Thyristors*. 4. vydání. NXP - Philips, 2006.
- [14] *Datasheet - LM136-5.0, LM236-5.0, LM336-5.0 5.0V Reference Diode*. Texas Instrument, 2013.
- [15] *Datasheet - NTC Thermistors, Radial Leaded, Standard Precision*. VISHAY INTERTECHNOLOGY, 2019.
- [16] *Datasheet - RFP12N10L N-Channel Logic Level Power MOSFET*. Fairchild Semiconductor, 2013.
- [17] *Datasheet - BYW80-200 SWITCHMODE Power Rectifiers*. 3. vydání. ON Semiconductor, 2008.
- [18] MAŠEK, Zdeněk. *Regulace a automatizace: Studijní opora*. Pardubice: Skriptum. UPCE.
- [19] MĚŘIČKA, Jiří. *Elektrické stroje*. 2. vydání. Praha: ČVUT, 1994.



## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Katalogové údaje LEM LA 55-P [9] .....	30
Tabulka 2 - Katalogové údaje Mean well DCW03A-15 [10] .....	30
Tabulka 3 - Katalogové údaje L-934GT [11].....	31
Tabulka 4 - Kontakty připojovací svorkovnice pro připojení k desce regulátoru.....	32
Tabulka 5 - Odběr napájených zařízení.....	35
Tabulka 6 - Katalogové údaje 7812 CV-DG [12] .....	35
Tabulka 7 - Katalogové údaje 7824 CV-DG [12] .....	35
Tabulka 8 - Katalogové údaje BT151-500 [13] .....	36
Tabulka 9 - Katalogové údaje LM336Z-5 [14].....	37
Tabulka 10 - Katalogové údaje NTC 640 - 47k [15] .....	39
Tabulka 11 - Katalogové údaje tranzistoru RFP12N10L [16] .....	40
Tabulka 12 - Katalogové údaje diody BYW80-200 [17] .....	40
Tabulka 13 - Zapojení pinů mikrokontrolérové desky .....	41
Tabulka 14 - Kontakty připojovací svorkovnice pro připojení desky snímače proudu ..	42
Tabulka 15 - Kontakty připojovací svorkovnice k připojení k vozidlu .....	42

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Derivační dynamo .....	12
Obrázek 2 - Schéma vibračního regulátoru .....	14
Obrázek 3 - Schéma MAA723 [8] .....	15
Obrázek 4 - Schéma GC 11 [6] .....	16
Obrázek 5 - Schéma GC 16 [6] .....	17
Obrázek 6 - Schéma YRN3 [6] .....	18
Obrázek 7- Schéma původní zdrojové soustavy .....	20
Obrázek 8 - Karta YRN3 .....	22
Obrázek 9 - Schéma desky snímače proudu.....	29
Obrázek 10 - Návrh desky snímače proudu .....	33
Obrázek 11 - Deska snímače proudu.....	33
Obrázek 12 - Schéma napájení desky regulátoru .....	34
Obrázek 13 - Schéma děličů napětí desky regulátoru .....	37
Obrázek 14 - Schéma děliče napětí pro měření -15 V .....	38
Obrázek 15 - Schéma výstupu desky regulátoru .....	39
Obrázek 16 - Návrh desky regulátoru .....	43
Obrázek 17 - Deska regulátoru.....	43
Obrázek 18 - Zapojení nového regulátoru.....	44
Obrázek 19 - Regulační schéma .....	45
Obrázek 20 - Schéma zapojení měřicího pracoviště .....	54
Obrázek 21 - Fotografie měřicího pracoviště .....	55
Obrázek 22 - Fotografie měření na motorovém voze 1.....	58
Obrázek 23 - Fotografie měření na motorovém voze 2.....	58

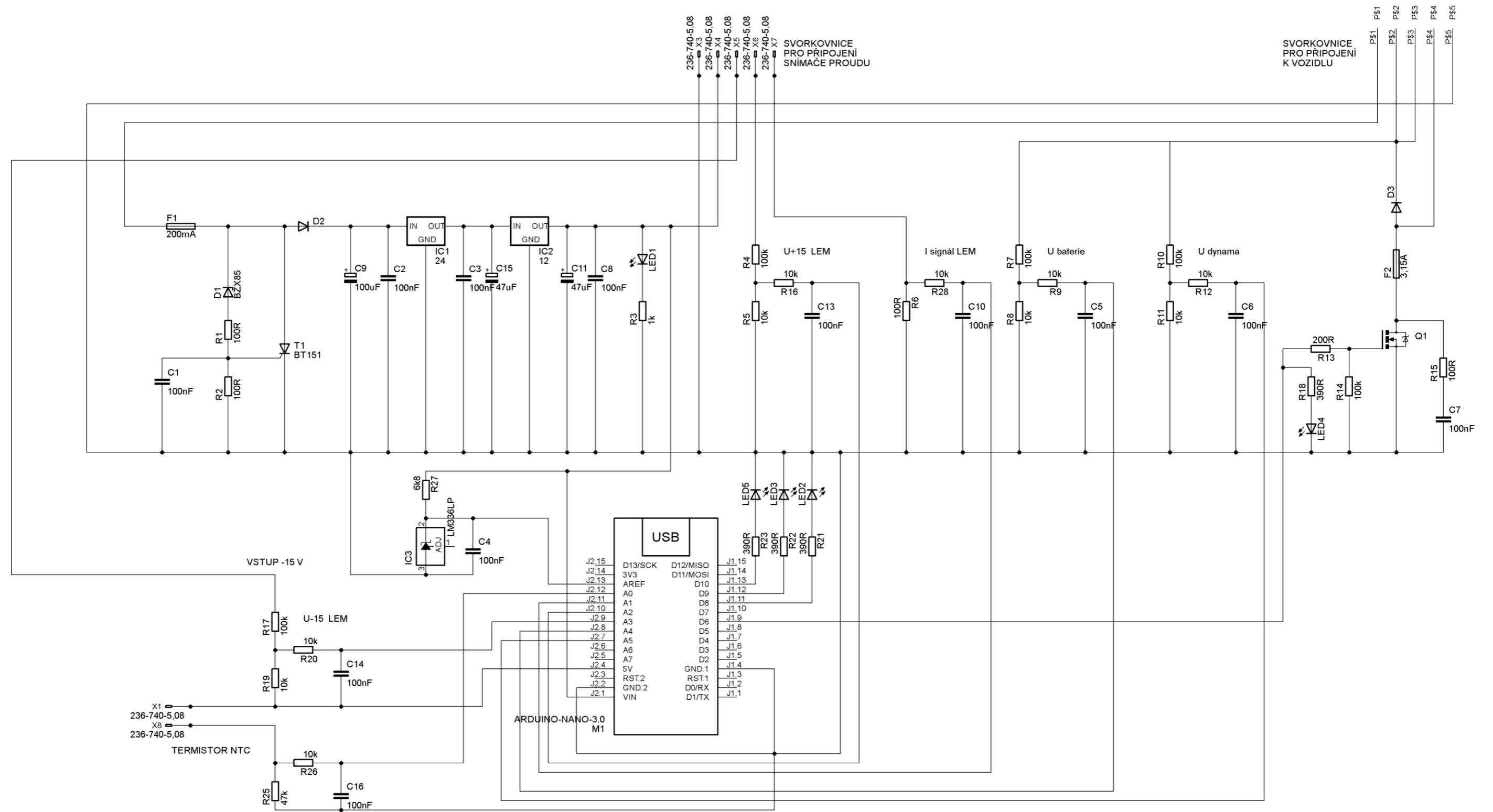
## Seznam grafů

Graf 1 - Charakteristika běhu naprázdno .....	12
Graf 2 - Budicí charakteristika .....	13
Graf 3 - Zatěžovací charakteristika .....	13
Graf 4 - Původní regulátor - start .....	59
Graf 5 - Nový regulátor - start .....	59
Graf 6 - Nový regulátor - start, nízké konstanty.....	61
Graf 7 - Nový regulátor - start, vysoké konstanty .....	61
Graf 8 - Původní regulátor - volnoběh .....	62
Graf 9 - Nový regulátor - volnoběh.....	62
Graf 10 - Původní regulátor - zvýšené otáčky.....	63
Graf 11 - Nový regulátor - zvýšené otáčky .....	63
Graf 12 - Původní regulátor - změna otáček .....	64
Graf 13 - Nový regulátor - změna otáček.....	64
Graf 14 - Původní regulátor - zatížení .....	66
Graf 15 - Nový regulátor - zatížení .....	66
Graf 16 - Původní regulátor - odlehčení.....	68
Graf 17 - Nový regulátor - odlehčení .....	68
Graf 18 - Nový regulátor - teplotní kompenzace .....	69

## Seznam příloh

Příloha A.....	Schéma desky regulátoru
Příloha B.....	Kusovník desky snímače proudu
Příloha C.....	Kusovník desky regulátoru
Příloha D.....	Vývojový diagram programu
Příloha E.....	Zdrojový kód programu
Příloha F.....	Tabulka ručního seřízení

# Příloha A – Schéma desky regulátoru



## Příloha B – Kusovník desky snímače proudu

Název	Hodnota	Typové označení
C1	100nF/63V	MKS2
C2	47uF/63V	Elyt CE RD-105°C
C3	100nF/63V	MKS2
C4	100nF/63V	MKS2
C5	47uF/63V	Elyt CE RD-105°C
C6	47uF/63V	Elyt CE RD-105°C
F1	100mA	F 5x20mm
IC1	LA-55-P	
LED1	L-934GT	zelená
LED2	L-934GT	zelená
R2	1k5	RM 0207 0,6W 1%
R3	1k5	RM 0207 0,6W 1%
U\$1	DCW03A-15	
X2	Wago 236-741-5,08	
X3	Wago 236-741-5,08	
X4	Wago 236-741-5,08	
X5	Wago 236-741-5,08	
X6	Wago 236-741-5,08	

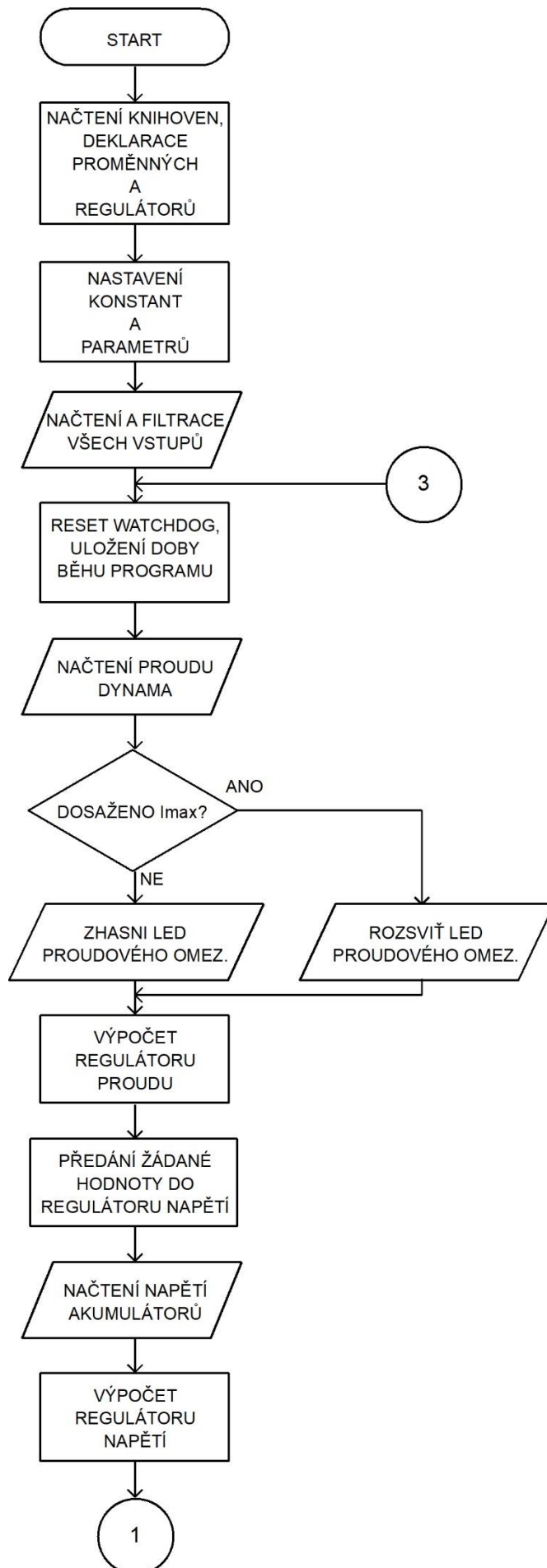
## Příloha C – Kusovník desky regulátoru

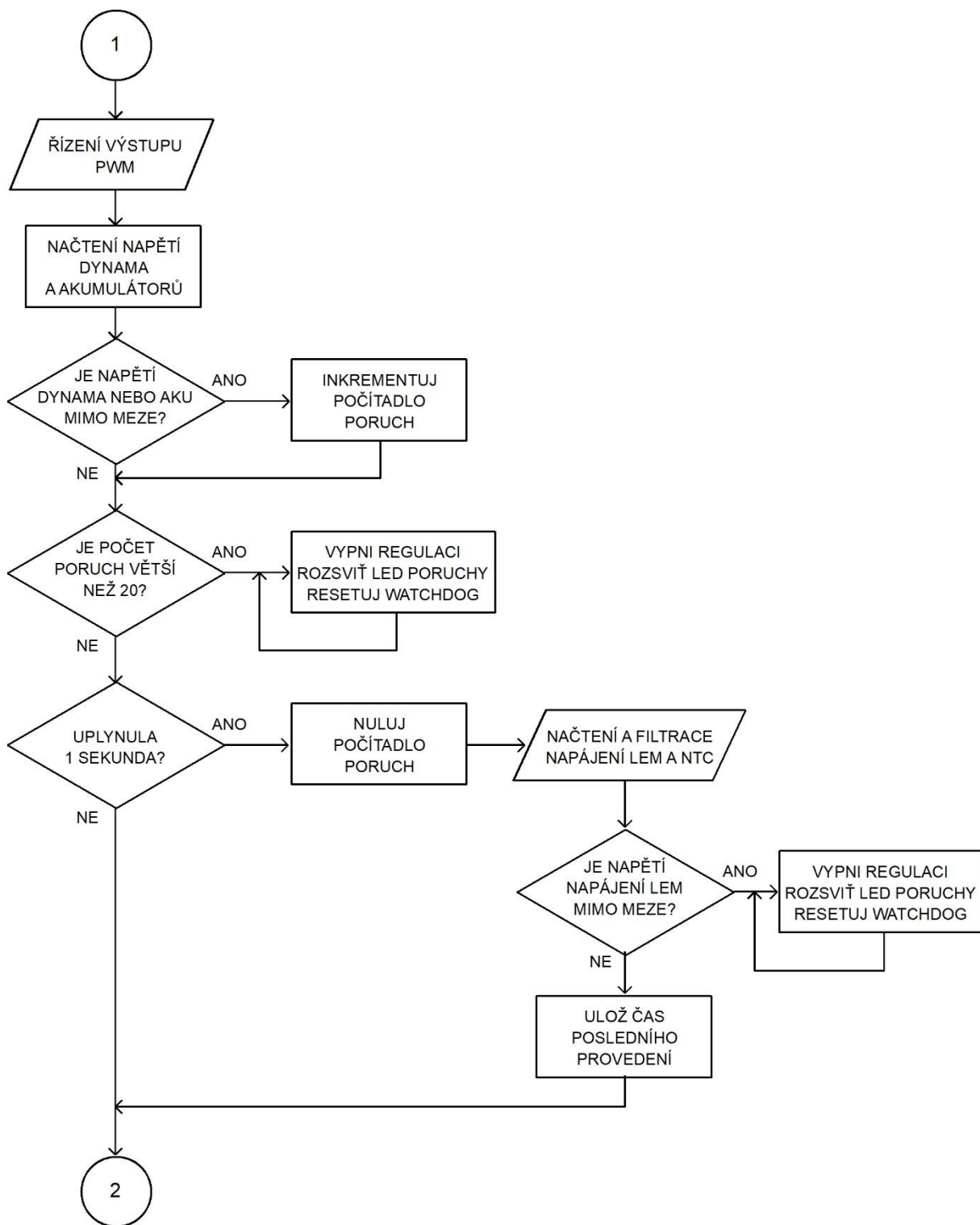
Název	Hodnota	Typové označení
C1	100nF/63V	MKS2
C2	100nF/63V	MKS2
C3	100nF/63V	MKS2
C4	100nF/63V	MKS2
C5	100nF/63V	MKS2
C6	100nF/63V	MKS2
C7	100nF/250V	MKS4
C8	100nF/63V	MKS2
C9	100uF/63V	Elyt CE RD-105°C
C10	100nF/63V	MKS2
C11	47uF/63V	Elyt CE RD-105°C
C13	100nF/63V	MKS2
C14	100nF/63V	MKS2
C15	47uF/63V	Elyt CE RD-105°C
C16	100nF/63V	MKS2
D1	BZX85V036	
D2	1N4004	
D3	BYW80-200	
F1	200mA	F 5x20mm
F2	3,15A	F 5x20mm
IC1	7824 CV-DG	
IC2	7812 CV-DG	
IC3	LM336Z-5.0	
LED1	L-934GT	zelená
LED2	L-934GT	žlutá
LED3	L-934GT	červená
LED4	L-934GT	zelená
LED5	L-934GT	červená
M1	ARDUINO-NANO	
Q1	RFP12N10L	
R1	100R	RM 0207 0,6W 1%
R2	100R	RM 0207 0,6W 1%
R3	1k	RM 0207 0,6W 1%
R4	100k	RM 0207 0,6W 1%
R5	10k	RM 0207 0,6W 1%
R6	100R	RM 0207 0,6W 1%
R7	100k	RM 0207 0,6W 1%
R8	10k	RM 0207 0,6W 1%
R9	10k	RM 0207 0,6W 1%
R10	100k	RM 0207 0,6W 1%
R11	10k	RM 0207 0,6W 1%

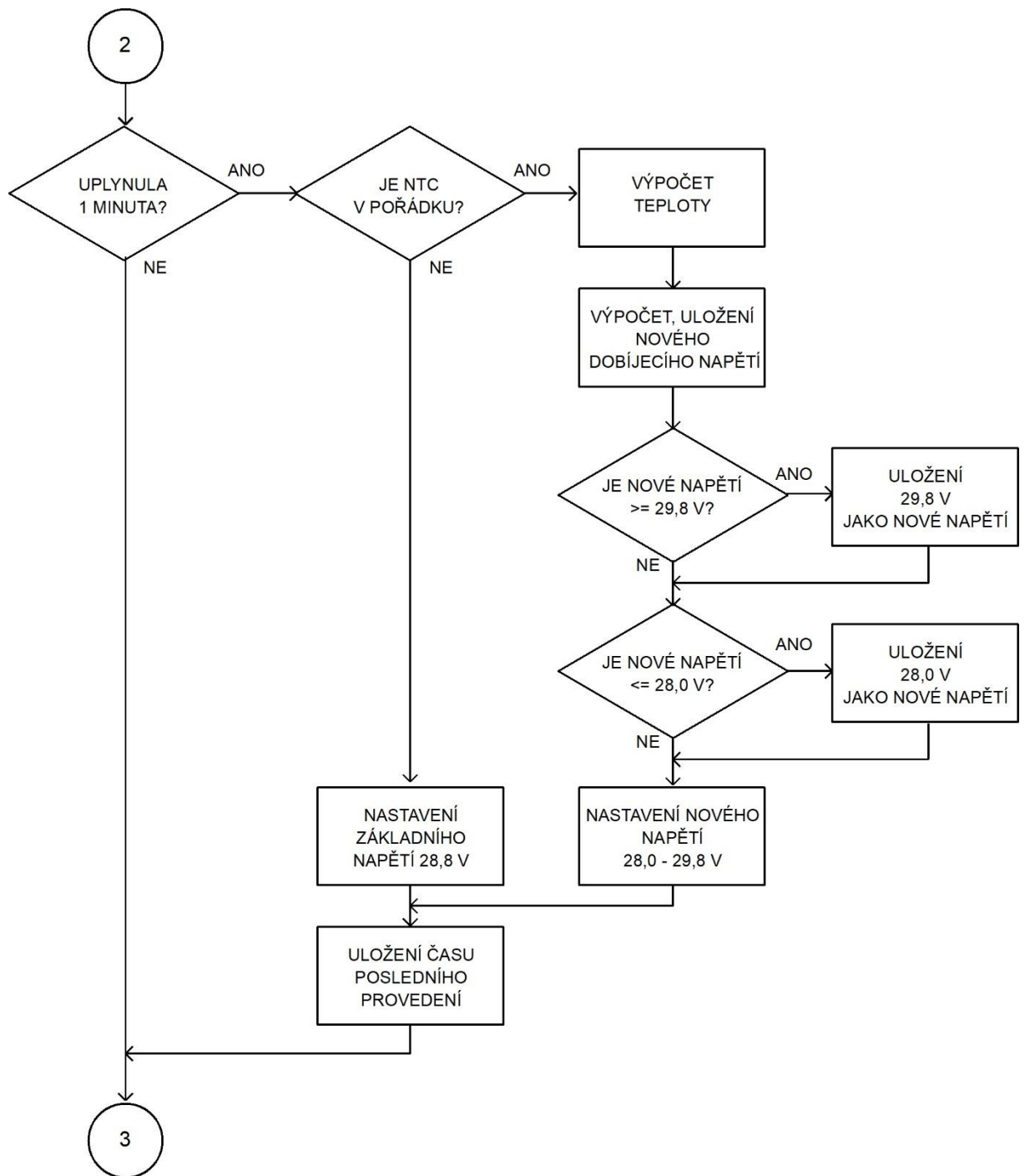
R12	10k	RM 0207 0,6W 1%
R13	200R	RM 0207 0,6W 1%
R14	100k	RM 0207 0,6W 1%
R15	100R	RMO 0411 2W 5%
R16	10k	RM 0207 0,6W 1%
R17	100k	RM 0207 0,6W 1%
R18	390R	RM 0207 0,6W 1%
R19	10k	RM 0207 0,6W 1%
R20	10k	RM 0207 0,6W 1%
R21	390R	RM 0207 0,6W 1%
R22	390R	RM 0207 0,6W 1%
R23	390R	RM 0207 0,6W 1%
R25	47k	RM 0207 0,6W 1%
R26	10k	RM 0207 0,6W 1%
R27	6k8	RM 0207 0,6W 1%
R28	10k	RM 0207 0,6W 1%
T1	BT151-500	
U\$1	DG58C	
X1	Wago 236-740-5,08	
X3	Wago 236-740-5,08	
X4	Wago 236-740-5,08	
X5	Wago 236-740-5,08	
X6	Wago 236-740-5,08	
X7	Wago 236-740-5,08	
X8	Wago 236-740-5,08	



## Příloha D – Vývojový diagram programu







## Příloha E – Zdrojový kód programu

```
#include <PID_v1.h>
#include <avr/wdt.h>

const double PREVOD_U = 18.6; // 1023.0/55.0=18.60
const double PREVOD_I = 20.46; // 1023.0/50.0=20.46
const double NAPETI = 28.8; // [V] žádané napětí
const double PROUD = 33.0; // [A] omezení proudu
const double T_LEM = 1000; // [ms] jak často snímat a vyhodnocovat napajeni LEM
const double T_NTC = 60000; // [ms] jak často provadet korekci zadaneho napeti podle teploty aku

const double KpU = 15.0;
const double KiU = 30.0;
const double KdU = 0.0;

const double KpI = 1.0;
const double KiI = 2.0;
const double KdI = 0.0;

double zadanaU, pozadovanaU, vstupUnovy, vstupU, vstupUstary, vystupU, zadanaI, vstupI, vstupIstary, vstupInovy, vystupI, lemP, lemPstary, lemM, lemMstary, dynU,
dynUstary, ntcR, ntc, ntcstary, teplota, i, porucha = 0, Nporuch = 0;

uint32_t tlem, tntc, tvypis, t = 0;

PID U(&vstupU, &vystupU, &zadanaU, KpU, KiU, KdU, DIRECT);
PID I(&vstupI, &vystupI, &zadanaI, KpI, KiI, KdI, DIRECT);

/*
 * A0 termistor
 * A1 proud
 * A2 +15
 * A3 -15
 * A4 baterie
 * A5 dynamo
 *
 * D8 omezeni proudu
 * D9 porucha LEM
 * D10 porucha dynamo
 */

void setup()
{
    zadanaI = PROUD * PREVOD_I; //omezeni proudu A
    pozadovanaU = NAPETI ; //zadane napeti V
    wdt_enable(WDTO_120MS);
    analogReference(EXTERNAL); //externí reference napětí
    pinMode(8, OUTPUT); //led omezení proudu
    pinMode(9, OUTPUT); //led poruchy napájení snímače proudu LEM
    pinMode(10, OUTPUT); //led přepětí
    U.SetTunings(KpU, KiU, KdU);
    U.SetSampleTime(2); // [ms] perioda vykonavani regulatoru napětí
    U.SetOutputLimits(0.0, 255.0); // rozsah akcni veliciny regulatoru napětí
    I.SetTunings(KpI, KiI, KdI);
    I.SetSampleTime(2); // [ms] perioda vykonavani regulatoru proudu
    I.SetOutputLimits(0.0, (pozadovanaU * PREVOD_U)); // rozsah akcni veliciny regulatoru proudu

    for (i = 0; i <= 100; i++) //for cyklus slouží po naběhnutí procesoru pro načtení a filtraci všech snímaných hodnot
    {
        vstupI = ( 0.7 * vstupIstary + 0.3 * analogRead(1)); //snímač proudu
        vstupIstary = vstupI;
        vstupU = (0.7 * vstupUstary + 0.3 * analogRead(4)); //napětí baterie
        vstupUstary = vstupU;
        dynU = (0.7 * dynUstary + 0.3 * analogRead(5)); //napětí dynamo
        dynUstary = dynU;
    }
}
```

```

    lemP = (0.7 * lemPstary + 0.3 * analogRead(2)); //napětí +15 snímače proudu
    lemPstary = lemP;
    lemM = (0.7 * lemMstary + 0.3 * analogRead(3)); //napětí -15 snímače proudu
    lemMstary = lemM;
    ntc = (0.7 * ntcstary + 0.3 * analogRead(0)); //snímač termistoru
    ntcstary = ntc;
    wdt_reset();
}

}

void loop()
{
    wdt_reset();
    t = millis();

    vstupI = analogRead(1); //snímač proudu

    if ( zadanaI >= vstupI ) //při omezení proudu rozsvítí LED
    {
        digitalWrite(8, LOW);
    }else
    {
        digitalWrite(8, HIGH);
    }

    I.Compute(); //výpočet žádané hodnoty
    zadanaU = vystupI; //výstup regulátoru proudu je žádanou hodnotou napětí
    vstupU = analogRead(4); //snímač napětí baterie
    U.Compute(); //výpočet akční veličiny
    analogWrite(6,vystupU); //výstup z regulátoru

    dynU = analogRead(5); //snímač napětí dynama
    vstupU = analogRead(4); //snímač napětí baterie

    if ( (dynU-vstupU) > (3.0*PREVOD_U) || dynU > ( (pozadovanaU + 5.0) * PREVOD_U ) || vstupU > ( (pozadovanaU + 3.0) * PREVOD_U) ) //pokud je napětí dynama o 3V větší než
    //naběti baterie (prasklá pojistka) //nebo dojde k přepětí, vypne jednorázově
    {
        //výstup a připočte do počítadla poruch jedničku
        Nporuch = Nporuch + 1;
        analogWrite(6,0);
    }

    if ( Nporuch > 20 ) //pokud je počet poruch za sekundu větší jak 20, vypne regulátor až do restartu a rozsvítí LED
    {
        porucha = 1;
        do
        {
            analogWrite(6,0);
            digitalWrite(10, HIGH);
            wdt_reset();
        }while(porucha = 1);
    }

    if (t >= tlem) //každých 1000ms
    {
        Nporuch = 0; //nulování počítadla poruch

        lemP = (0.7 * lemPstary + 0.3 * analogRead(2)); //snímač napájení +15 LEM
        lemPstary = lemP;
        lemM = (0.7 * lemMstary + 0.3 * analogRead(3)); //snímač napájení -15 LEM
    }
}

```

```

lemMstary = lemM;
ntc = (0.7 * ntcstary + 0.3 * analogRead(0)); //snímač termistoru
ntcstary = ntc;

if ( lemP <= (14.5*PREVOD_U) || lemP >= (15.5*PREVOD_U) || lemM <= 558 || lemM >= 744 ) //pokud je napájení snímače proudu mimo meze,
{
    porucha = 1;
    do
    {
        analogWrite(6,0);
        digitalWrite(9, HIGH);
        wdt_reset();
    }while(porucha = 1);
}

tlem = t + T_LEM;
}

if ( t >= tntc ) //každých 60s vypočte a upraví žádanou hodnotu napětí dle teploty NTC termistoru
{
    if ( ntc > 60 && ntc < 900 ) //při odpojení termistoru nebo zkratu nastaví základní hodnotu NAPETI
    {
        ntcR = (46970.0/ntc)*(1023.0-ntc); //výpočet odporu termistoru
        teplota = ntcR/47000.0;
        teplota = log(teplota);
        teplota /= 3390.0;
        teplota += 1.0 / (25.0 + 273.15);
        teplota = 1.0 / teplota; // výpočet převrácené hodnoty
        teplota -= 273.15; // převod na stupně Celsia

        pozadovanaU = NAPETI - ((teplota-25.0)*0.06); //korekce žádaného napětí o 0.6V na změnu teploty o 10°C

        if( pozadovanaU >= 29.8 ) //horní limit napětí při teplotní kompenzaci 29.8V
        {
            pozadovanaU = 29.8;
        }

        if( pozadovanaU <= 28.0 ) //spodní limit napětí při teplotní kompenzaci 28.0V
        {
            pozadovanaU = 28.0;
        }
        I.SetOutputLimits(0.0, (pozadovanaU*(PREVOD_U))); //nastavení žádaného napětí
    }
    else //nastavení základní hodnoty NAPETI při odpojení termistoru nebo zkratu
    {
        pozadovanaU = NAPETI;
        I.SetOutputLimits(0.0, (pozadovanaU*(PREVOD_U)));
    }
    tntc = t + T_NTC;
}
}

```

**Příloha F – Tabulka ručního seřízení**

	ZVĚTŠIT $K_p$	$K_p$	ZMENŠIT $K_p$
ZMENŠIT $K_I$			
$K_I$		<p>OPTIMÁLNÍ PRŮBĚH</p>	
ZVĚTŠIT $K_I$			