



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## REGULÁTORU NAPĚTÍ PALUBNÍ SÍTĚ LETADEL S MOTORY WALTER M337

AIRCRAFT ENGINE VOLTAGE REGULATOR

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michael Formánek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Kaczmarczyk, Ph.D.

BRNO 2020

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Bc. Michael Formánek **ID:** 170242 **Ročník:** 2 **Akademický rok:** 2019/20

## NÁZEV TÉMATU:

### Regulátoru napětí palubní sítě letadel s motory WALTER M337

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Na základě studia literatury a analýzy funkčnosti a konstrukce stávajícího reléového regulátoru napětí LUN2141 navrhnete a zkonstruujete nový regulátor napětí palubní sítě pro letadla s motory WALTER M337.

- 1) Nastudujte a popište problematiku regulace napětí palubních sítí v letadlech.
- 2) Analyzujte funkčnost stávajícího regulátoru
- 3) Definujte požadavky na nový elektronický regulátor na základě parametrů stávajícího řešení.
- 4) Navrhnete elektrické schéma nového regulátoru, který bude plně nahrazovat stávající řešení pro kategorii "Experimental".
- 5) Zkonstruujte regulátor a ověřte jeho funkčnost.
- 6) Navrhnete metodiku letových testů v reálném prostředí na jednomotorovém letadle osazeném motorem WalterM137/337.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Servisní dokumentace reléového regulátoru LUN2141

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 1.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Václav Kaczmarczyk, Ph.D.

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda oborové rady

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.





## **Abstrakt**

Práce se zabývá problematikou aktuálního řešení regulace palubní sítě v letadlech užívajících motory české výroby Walter, speciálně pak Walter M137 a M337. Práce pojednává o stylu aktuálně používaného řešení pro obsluhu dobíjecího dynama a dále o možnostech jeho náhrady za použití moderních technologií. Následuje návrh a výroba nově navrženého zařízení. Nezbytnou součástí práce je také identifikace systému původního řešení a s ním spojený návrh nového regulátoru. V práci je řešeno srovnání původního a navrhovaného řešení v několika definovaných bodech. Součástí následujícího textu je také certifikační stránka návrhu, finanční zhodnocení a doporučení pro další směřování.

## **Klíčová slova**

Letadlo, Generátor, Regulátor, Modernizace, Řízení, Inovace.

## **Abstract**

The work deals with the issue of the current solution of on-board network regulation in aircraft using Walter-made Czech engines, especially Walter M137 and M337. The work deals with the style of the currently used solution for operating the generator and the possibilities of its replacement using modern technologies. The design and production of the newly designed device follows. An essential part of the work is also the identification of the system of the original solution and the associated design of a new controller. The work compares the original and proposed solution in several defined points. The following text also includes the certification page of the proposal, financial evaluation and recommendations for further direction.

## **Keywords**

Aircraft, Generator, Regulator, Modernization, Controlling, Innovation.

## **Bibliografická citace:**

FORMÁNEK, Michael. *Regulátoru napětí palubní sítě letadel s motory WALTER M337*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126917>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Václav Kaczmarczyk.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma „Návrh Regulátoru napětí palubní sítě letadel s motory WALTER M337“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení §11 a následujících autorského 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, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

---

Bc. Michael Formánek

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval panu Ing. Jakubu Streitovi za obětavou pomoc při tvorbě této práce, dále pak vedoucímu panu Ing. Václavu Kaczmarczykovi, PhD. a dalším mnoha lidem, kteří mě nikdy neodmítli při mé snaze získat co nejvíce informací pro podporu této diplomové práce.

V Brně dne .....

---

Bc. Michael Formánek

# Obsah

1	Úvod.....	8
2	Analýza současného řešení.....	9
2.1	Role regulátorů napětí v letadlech.....	9
2.2	Všeobecně používané technologie .....	9
2.2.1	Reléové regulátory .....	9
2.2.2	Uhlíkové regulátory .....	13
2.2.3	Solid State regulátory .....	14
2.3	System Regulátoru LUN2141.....	15
2.3.1	Dynamo LUN 2111 .....	15
2.3.2	Regulační Relé LUN 2141.....	16
2.4	Požadavky kladené na vyvíjený letadlový regulátor napětí .....	18
2.4.1	Technické podmínky .....	19
2.4.2	Označení .....	19
2.5	Návrh nového řešení .....	20
2.5.1	Technické požadavky .....	20
3	Realizace návrhu.....	24
3.1	Koncept zařízení.....	24
3.2	Výkonová část .....	24
3.3	Řídicí část.....	27
3.3.1	Analogové signály vedoucí na řídicí desku .....	29
3.3.2	Digitální signály vedoucí na řídicí desku .....	30
3.4	Analýza současného řešení.....	31
3.4.1	Testovací sestava .....	31
3.4.2	Analýza charakteristik .....	34
3.5	Návrh regulátoru .....	44
3.5.1	Návrh prostřednictvím aplikace sisotool .....	44
3.5.2	Ladění regulátoru v aplikaci PID Tuner .....	47
3.5.3	Wind Up jev.....	48
3.5.4	Odezva na vliv poruchy.....	49
3.5.5	Ověření funkčnosti navrženého regulátoru.....	50
3.6	Funkce mikrokontroleru.....	51
3.6.1	Vzorkování signálu.....	51
3.6.2	Výstupní řídicí signál.....	53
3.6.3	Regulační děj.....	53
3.6.4	Analýza přechodových dějů navrženého regulátoru .....	54
3.6.5	Analýza dalších vlastností regulátoru.....	59
3.7	Zhodnocení.....	62
3.7.1	Porovnání vlastností regulátorů .....	62

3.7.2	Finanční zhodnocení.....	63
3.7.3	Další vývoj.....	64
3.7.4	Budoucnost projektu.....	64
4	Závěr.....	66
	Literatura.....	68
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	70

# Seznam obrázků

Obrázek 1 - Reléový letecký regulátor [1] .....	10
Obrázek 2 - Blokové schéma "Three-Unit regulator" [1].....	10
Obrázek 3 - Blokové schéma proudového omezovače [1] .....	11
Obrázek 4 - Obvod detekce zpětného proudu [1].....	13
Obrázek 5 - Carbon-Pile regulátor [1].....	14
Obrázek 6 - Schéma zapojení reléového regulátoru LUN2141 [3] .....	17
Obrázek 7 - Graf dovolených mezí přechodných a ustálených hodnot napětí dle AS8020 [6] .....	22
Obrázek 8 - Schéma zapojení napájecí části .....	26
Obrázek 9 - Spínací výkonová část obvodu.....	27
Obrázek 10 - Model úchytu Dynama.....	32
Obrázek 11 - Detail provedení úchytu šroubu.....	32
Obrázek 12 - Instalace příruby na dynamo.....	33
Obrázek 13 - Sestava pro testování dynama .....	34
Obrázek 14 - Ukázka opotřeбенých uhlíkových sběračů .....	36
Obrázek 15 - Odpojení zátěže o velikosti 20A .....	37
Obrázek 16 - Připojení zátěže o velikosti 20 A .....	38
Obrázek 17 - Odpojení zátěže o velikosti 10 A .....	38
Obrázek 18 - Připojení zátěže o velikosti 10 A .....	39
Obrázek 19 - Přechodový děj regulované soustavy.....	40
Obrázek 20 - Naměřená data odezvy dynama na jednotkový skok řídicí veličiny ..	41
Obrázek 21 - Neparametrická identifikace systému prvního řádu [8] .....	42
Obrázek 22 - Měřený systém vs. korigovaný model.....	43
Obrázek 23 - Návrh PID regulátoru v prostředí Matlab SISOtool .....	45
Obrázek 24 - Základní regulační schéma .....	46
Obrázek 25 - ladění PS regulátoru v prostředí MATLAB .....	47
Obrázek 26 - porovnání přechodových charakteristik výchozího nastavení a odladěného regulátoru.....	48
Obrázek 27 - Wind Up jev, akční zásah (žlutá) zesílen .....	49
Obrázek 28 - reakce regulátoru na vliv chyb.....	50
Obrázek 29 - Model vytvořený v prostředí MATLAB Simulink.....	50
Obrázek 30 - Nový Regulátor, odezva na připojení 10A zátěže .....	55
Obrázek 31 - Nový Regulátor, odezva na připojení 10A zátěže, průběh regulačního děje.....	56
Obrázek 32 - Nový Regulátor, odezva na odpojení 10A zátěže .....	57
Obrázek 33 - Nový Regulátor, odezva na připojení 20A zátěže .....	58
Obrázek 34 - Nový Regulátor, odezva na odpojení 20A zátěže .....	59
Obrázek 35 - Akcelerace generátoru .....	60



Obrázek 36 - Průběh ustálené výstupní veličiny při 25 % zátěže.....	61
Obrázek 37 - Průběh ustálené výstupní veličiny při 100 % zátěže .....	61
Obrázek 38 – Porovnání přechodového děje původního a nového regulátoru .....	62

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Technické parametry Dynama LUN 2111.....	16
Tabulka 2 - Základní technické parametry LUN 2141 [3] .....	17
Tabulka 3 - Značky ve schématu regulátoru LUN 2141 [3] .....	18
Tabulka 4 - Technické parametry elektromotoru .....	31
Tabulka 5 - Parametry regulačního děje původní sestavy.....	40
Tabulka 6 - Parametry pro identifikaci dynama .....	41
Tabulka 7 - Naměřené parametry systému.....	43

# 1 ÚVOD

Tato diplomová práce se věnuje analýze současného řešení generování elektrické energie na palubách letadel, cílem je srovnání jednotlivých používaných technologií a definování všeobecných požadavků na taková zařízení. Dále se přesouvá k analýze a popisu zařízení LUN 2141, které popisuje a vyčleňuje základní principy a úkoly takového zařízení tak, aby na základě požadavků z výše uvedené analýzy bylo možné provést návrh moderní náhrady LUN 2141.

Na základě definovaných požadavků je provedena diskuse a následně návrh celého zařízení, včetně hardware a software části.

Nedílnou součástí návrhu regulačního prvku je identifikace regulované soustavy, která je prováděna v laboratorních podmínkách. K simulaci standardních pracovních režimů je proveden návrh testovacího zařízení a přípravků pro provoz zařízení mimo letecký motor, tyto přípravky také sám vyrábím.

Spolu s identifikací původního řešení je prováděn také záznam charakteristik a přechodových dějů pro potřeby srovnání originálního a nového řešení. Pracovní body těchto charakteristik jsou určeny na základě platných norem.

Na základě identifikovaného systému je následně proveden návrh nového regulátoru s využitím počítačového modelačního software, tento model je odladěn pro vhodné přechodové charakteristiky. Získané parametry regulátoru jsou následně implementovány do mikrokontroleru a ten je zapojen do celého systému.

Práci se následně zabývá porovnáváním přechodových dějů a reakcí regulátoru na vliv jednotlivých chyb vzhledem k původnímu řešení.

Výsledkem práce by tedy měl být ucelený návrh nového regulátoru s demonstrací jeho vlastností a zhodnocením jeho možných výhod, nesmí chybět ani návrh mechanického uložení regulátoru, diskuse finanční stránky projektu a nástin možných cest pro nasazení zařízení do provozu.

Veškeré grafy a průběhy vyobrazené v této práci jsou pro přehlednost uvedeny také jako příloha této diplomové práce.

## 2 ANALÝZA SOUČASNÉHO ŘEŠENÍ

### 2.1 Role regulátorů napětí v letadlech

Pomineme-li velmi rané období letectví, můžeme bez problému prohlásit, že všechna letadla a vrtulníky na světě mají na palubě jistou formu elektrické palubní sítě, určené pro napájení nejrůznějších palubních přístrojů a příslušenství. Pokud se odchýlíme od letadel a vrtulníků, určených pro „hobby“ létání, dostáváme se do kategorie takových létajících strojů, u kterých je vysoká míra závislosti na elektrické síti.

Moderní letadla jsou vybavena množstvím přístrojů, počínaje přístroji pro podporu letu (sloužící tedy jako dodatkové), přes přístroje indikující nejrůznější údaje o letu (typicky letové a motorové přístroje), až po navigace a autopiloty, zajišťující bezpečné provedení letu. Právě v poslední kategorii jsme se dostali k bodu, kdy vidíme závislost na elektrické energii.

Elektronickými přístroji v letadle může být ale i samotné řízení chodu motoru. Pokud máme letadlo s motorovou jednotkou využívající technologii „FADEC<sup>1</sup>“, hovoříme o životně důležité nutnosti zásobování elektrickou energií.

Aby bylo možné veškeré tyto přístroje napájet, je potřeba mít na palubě letadla „letadlovou palubní elektrickou síť“. Ta se skládá z několika komponent, které společně fungují – Letadlová baterie, Generátor, Regulátor, Přepětíová ochrana a jistící prvky.

Tato práce se nadále zabývá právě nerozdělitelnou dvojicí generátor – regulátor. Nerozdělitelnou proto, že jedno bez druhého nemůže fungovat (v tomto případě).

Množství energie, kterou generátor vyprodukuje, je závislé na vybuzení generátoru a otáčkách hnací hřídele. Protože v letadle nemáme možnost regulovat otáčky hnací hřídele generátoru, jsme odkázáni pouze na regulování výkonu pomocí vybuzení generátoru budícím proudem.

Zde nastupuje regulátor napětí. Regulátor palubní sítě letadla funguje tak, že měří aktuální napětí palubní sítě a porovnává jej s referencí, akční zásah pro vyregulování odchylky napětí je přiveden do generátoru ve formě budícího proudu.

### 2.2 Všeobecně používané technologie

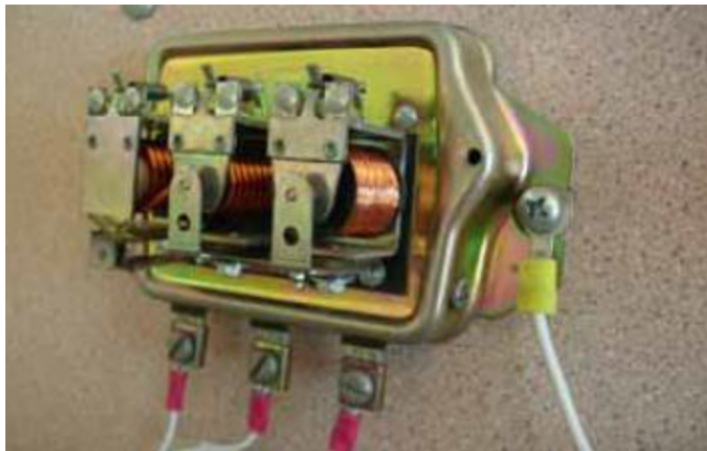
#### 2.2.1 Reléové regulátory

Jedná se o historické řešení, které stále nalzáme v mnoha strojích. Základním principem operace je sestava elektromagnetu a kotvy s kontaktem na pružině. Často

---

<sup>1</sup> Full Authority Digital Engine Control [1]

se také můžeme setkat s anglickým názvem „Three-Unit Regulator“, který odkazuje na tři základní funkce regulátoru napětí v letadle.

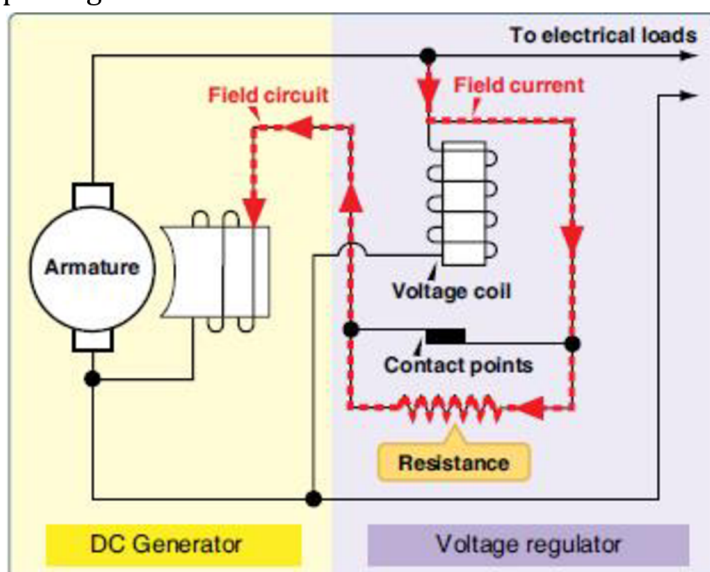


Obrázek 1 - Reléový letecký regulátor [1]

### 2.2.1.1 Regulace buzení

Jakmile není v obvodu dostatečné napětí, je kotva uvolněna a zkratuje tak obvod buzení. Generátor (nejčastěji ve formě dynama) je plně vybuzen. Jakmile napětí v obvodu vzroste nad nastavenou hodnotu, má elektromagnet dostatečnou sílu, aby přemohl sílu pružiny, a přitáhne kotvu, čímž způsobí rozpojení obvodu buzení. Generátor tak není buzen napřímo, ale přes omezovací odpor (na obrázku níže je tento stav vyznačen červenou linií). Jedná se tedy o dvojtavové řízení s hysterezí, neboť mechanické části mají své setrvačné síly.

Na obrázku níže je vidět blokové schéma zapojení obyčejného reléového regulátoru napětí. Regulátor je napojen paralelně s výstupem regulátoru. Takové zapojení poskytuje napájení regulátoru, a tak i vinutí regulátoru, a současně slouží ke snímání napětí pro regulaci.



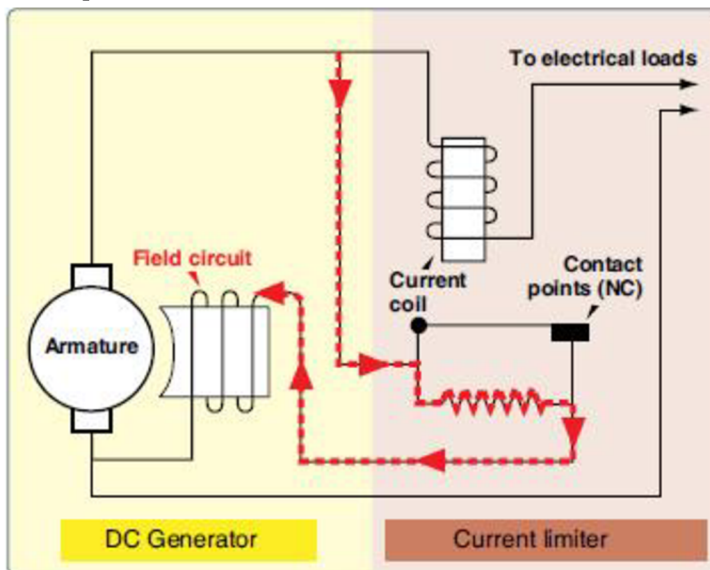
Obrázek 2 - Blokové schéma "Three-Unit regulator" [1]

V reálném zapojení je napájecí vedení jištěno proti zkratu jističem s obecně užívaným označením „GEN FIELD“. Takový regulátor bývá obvykle vybaven několika dalšími pomocnými obvody a elektromagnety, které zastupují další funkce.

### 2.2.1.2 Detekce nadproudu

Generátor je nyní řízen a udržuje napětí. Pro případ, že bude vystaven velkému odběru proudu, je vybaven proudovou cívkou, omezující buzení generátoru v případě, že je výstupní proud nad limit. Tato situace nastane v momentě, kdy je vysoký odběr proudu v síti, generátor je tak buzen na maximum, aby udržel nominální napětí. Pokud je ale odběr vyšší než maximální proud generátoru, je třeba jej omezit, aby nedošlo k poškození zařízení. K tomu slouží proudový omezovač takového regulátoru. Na blokovém schématu níže lze vidět zapojení takového zařízení.

Výstupní proud generátoru prochází proudovou cívkou. V momentě, kdy je výstupní proud nad daný limit (opět nastavený předpětím pružiny kotvy elektromagnetu), dojde k přitažení kotvy a rozpojení obvodu buzení. Generátor tak není buzen napřímo, ale přes omezovací odpor, čímž je zamezeno přetížení generátoru vlivem nadproudu. Z generátoru se tak stává zdroj proudu do doby, než bude snížena jeho zátěž pod maximální hodnotu.



Obrázek 3 - Blokové schéma proudového omezovače [1]

### 2.2.1.3 Omezovač zpětného proudu

Třetí cívkou tříprvkového regulátoru je blok předcházející zpětnému proudu do generátoru. Úkolem této části systému regulátoru je zamezení spotřeby energie z baterie v případě, že generátor nedodává energii do systému.

Základní funkce systému omezujícího zpětný proud je oddělení generátoru v momentě, kdy nedodává proud do palubního systému. Pro aktivaci systému, tedy

pro připojení obvodu generátoru do palubní sítě, je třeba, aby generátor za pomoci svého reziduálního magnetismu zvýšil napětí na svém výstupu nad určitou mez. Ta je snímána napěťovou cívkou (viz obrázek 4), a jakmile je na výstupu generátoru napětí, sepne napěťová cívka a připojí systém generátoru k palubní síti letadla.

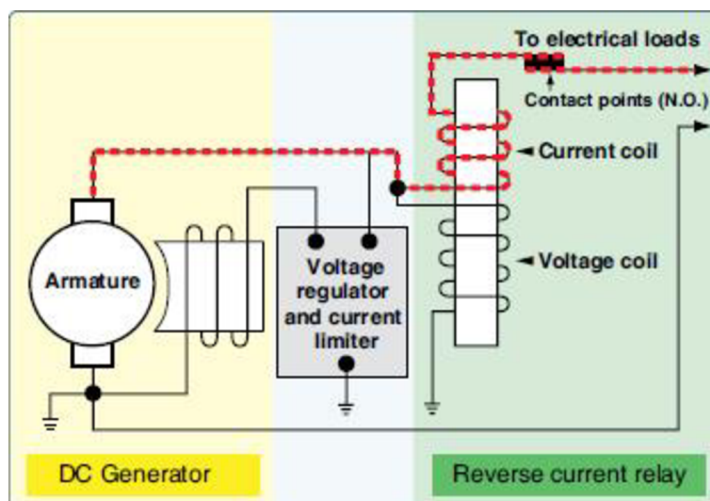
Podotkněme zde, že generátor skutečně musí vygenerovat napětí naprázdno, i když není buzen. Toho je docíleno jednak absencí zátěže generátoru a také díky reziduálnímu magnetismu ve vinutí generátoru. Zde je však nutné brát ohled na to, že například nový generátor nemusí takový zbytkový magnetismus mít, a generátor se tak nepřipojí do systému letadla/vrtulníku. Zde se můžeme podívat například do příručky pro údržbu. V našem případě bereme příklad z vrtulníku Bell B-206 Jet Ranger, který má v údržbovém manuálu popsán postup externího vybuzení generátoru. [2] Ten spočívá v dočasné aplikaci spojovacího vodiče mezi terminály „A“ a „B“ na komponentně „VR1“, jinak řečeno spočívá v přímém vybuzení vinutí generátoru pomocí externího propojení s vodičem. Takové propojení způsobí dočasnou operaci generátoru na maximum, a tím zvýšení výstupního napětí a okamžité připojení generátoru do systému. Za předpokladu, že nejsou přítomny další závady, pokračuje systém po odpojení vodiče v samostatné operaci. Poznamenejme, že motor vrtulníku musí být během takové operace samozřejmě spuštěn.

Jakmile je generátor připojen k palubní síti letadla/vrtulníku, není již možné detekovat výpadek generátoru, protože i při poklesu výstupního napětí generátoru udrží napětí v palubní síti (tím pádem i v napěťové cívce snímače zpětného proudu) palubní baterie, samozřejmě do doby jejího vyčerpání.

Aby bylo možné izolovat zařízení generátoru v případě výpadku dobíjení, je systém vybaven proudovou cívkou, která navazuje na cívku napěťovou, a v momentě, kdy generátor dodává proud, je funkce napěťové cívky suplována cívkou proudovou, a jakmile dojde v poklesu dodávaného proudu, nebo dokonce ke spotřebě proudu, dojde k uvolnění kotvy a tím k odpojení obvodu generátoru.

Blokové schéma zařízení je vidět na obrázku níže.

Dnešní regulátory tento obvod nahrazují použitím výkonové polovodičové diody, která však v době konstrukce těchto zařízení ještě nebyla hojně využívána.



Obrázek 4 - Obvod detekce zpětného proudu [1]

Jak je možné si představit, jedná se o poměrně složité zařízení, a to hlavně na údržbu. Pro seřízení takového regulátoru je třeba testovací zařízení a strávit mnoho času trpělivého seřizování předpětí pružin u jednotlivých elektromagnetů. Protože se jedná o spojitý systém, dochází k velmi vysokým frekvencím spínání jednotlivých regulačních elektromagnetů. To vede k opalování kontaktů, rozjždění charakteristik a nesprávné funkčnosti sestavy.

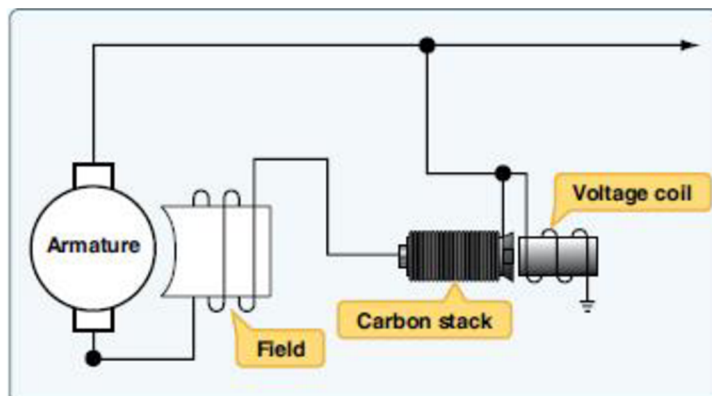
## 2.2.2 Uhlíkové regulátory

Dalším zástupcem dnes již poměrně raritní technologie, kterou ale stále nacházíme v provozuschopných strojích, jsou uhlíkové regulátory napětí.

Základním principem tohoto typu regulátoru je směřování proudu do budící cívky pomocí proměnlivého rezistoru. Tím je v našem případě sestava uhlíkových destiček. Na tuto sestavu je připevněna cívka s pohyblivým jádrem, přičemž v závislosti na velikosti napětí na cívce se mění síla působící prostřednictvím jádra cívky na uhlíkové desky. Tato sestava uhlíkových desek mění svůj elektrický odpor právě v závislosti na deformaci, způsobené tlakem elektromagnetu.

Nastavení nominálního napětí sestavy se pak provádí prostřednictvím regulačního šroubu, který upravuje předpětí elektromagnetu.





Obrázek 5 - Carbon-Pile regulátor [1]

Takový regulátor de facto nahrazuje první část výše zmíněného reléového regulátoru, pro reálné nasazení je však nutné dodat zbývající dvě komponenty. Pokud vezmeme v potaz reálné nasazení této technologie, které nalezneme například ve starších verzích vrtulníku Bell B-206, dostáváme se k řešení ve formě několika samostatně stojících jednotek. Zatímco výše máme „Three-Unit regulátor“, zde máme regulátor uhlíkový a další dvě jednotky, které jsou jako samostatná externí zařízení, avšak založená na naprosto stejném principu, jaký byl popsán výše.

## 2.2.3 Solid State regulátory

Poslední kategorií jsou regulátory bez pohyblivých částí. Může se jednat o analogové či digitální jednotky, obecně vzato můžeme prohlásit, že tyto technologie postupně vytlačují obě výše zmíněné kategorie.

### 2.2.3.1 Analogové regulátory

Analogové regulátory jsou obvody operačních zesilovačů ve zpětnovazebním zapojení, které porovnávají vstupní napětí s napětím referenčním (obvykle nastavitelným pomocí trimru), a v závislosti na diferenci upravují výstupní proud buzení generátoru či alternátoru, dle použité technologie.

Tyto regulátory, založené na polovodičových součástkách, přinesly zlepšení situace hlavně díky menším rozměrům a hmotnostem. Další přidanou hodnotou byla kromě delší stálosti také větší podpora vícemotorových letadel. Takové regulační jednotky často podporují paralelní chod více generátorů. Díky propojení jednotlivých regulátorů nedochází k oscilacím regulované veličiny.

Regulátory jsou často zapojeny v režimu „Master-Slave“, tedy tak, že jeden je vždy řídící a zajišťuje, aby další regulátory následovaly jeho regulační děj. Obvyklé nastavení je, že primární generátor dodává o 10-15% větší výkon.

Paralelní zapojení je samozřejmě možné i bez propojení. Tam se synchronizace regulátorů provádí pomocí nastavení rozdílných ustálených hodnot napětí. Rozdíl však musí být velice malý, obvykle méně než 0,1 V, protože v opačném

případě dojde k situaci, kdy primární regulátor dodává 100 % a sekundární operuje „naprázdno“.

Problémem takových zařízení je opět časová stálost součástek. Zde se ale pohybujeme v řádově vyšších intervalech než u přechozích dvou kategorií.

### **2.2.3.2 Diskrétní regulátory**

Nejmodernější kategorií jsou diskrétní regulátory napětí pro generátory a alternátory. Zde probíhá regulační děj přímo v mikrokontroleru, který řídí výstupní tranzistor, otevírající proud do buzení generátoru. Takové regulátory vynikají hlavně minimálními rozměry za současného zachování všech výše uvedených funkcí.

Hlavním rozdílem je funkce takových regulátorů. Oproti analogovým předchůdcům zde máme regulátory s přímým zadáváním požadovaného napětí, a tedy odpadá nastavování trimru za současného sledování napětí palubní sítě, a to vše se spuštěnými motory. Výrazný posun zde zaznamenala právě možnost paralelního zapojení dvou a více sestav, generujících napětí do jedné palubní elektrické sítě. Například u výrobce Plane Power, modelu R1224B, je systém duálního režimu řešen tak, že pro každý alternátor je instalován jeden regulátor napětí, přičemž jeden je určen jako Master, ostatní jako Slave. Hlavní regulátor je napojen do všech ostatních a svým regulačním obvodem je všechny řídí, a v případě výpadku zařízení převezme sekundární regulátor jeho funkci, avšak už jen pro „svůj“ alternátor.

Další nespornou výhodou diskrétních regulátorů je detekce nejrůznějších typů závad a předání informací o nich. V letectví se vždy používalo co nejjednodušší řešení, proto i jako zpětná vazba o chybě regulátoru je pouhá kontrolka. Ale různými charakteristikami jejího chování (blikání, stálé svícení ...) lze předat daleko více informací o právě probíhající chybě.

## **2.3 Systém Regulátoru LUN2141**

Systém dobíjení v letadlech užívající české motory Walter se sestává z Dynama typu „LUN 2111“, má nominální výkon 600 W pro 28 V a k němu určený regulátor napětí s ochrannými funkcemi „LUN 2141“.

### **2.3.1 Dynamo LUN 2111**

Jak bylo výše zmíněno, jedná se o generátor – dynamo, pracující s nominálním napětím 28 V.

*Dynamo LUN 2111 je provedeno jako derivační, čtyřpolový stroj. Je určeno pro napájení palubní sítě letadla stejnosměrným proudem včetně nabíjení akumulátoru.*

*Připojení dynamu k motoru je provedeno pomocí speciální převodové skříně. Dynamo se provádí jako levotočivé. Směr otáčení se rozumí při pohledu na dynamo ze strany náhonu.*

*Dynamo má vnitřní nucené chlazení. Neohřátý vzduch v množství 30l/vt. se vhání jedním větracím komínkem do vnitřní části dynamu, ochlazuje kolektor a vinutí a druhým větracím komínkem a otvory v břemenovém víku vychází.*

*Dynamo pracuje společně s regulačním relé a sítovým filtrem. [3]*

**Tabulka 1 - Technické parametry Dynamu LUN 2111**

Jmenovité napětí [V]	28 V
Elektrický výkon [W]	600 W
Pracovní otáčky [ot.min <sup>-1</sup> ]	3800–6000 ot.min <sup>-1</sup>
Smysl otáčení [-]	<b>Vlevo</b> při pohledu zepředu na přírubu
Odpor budícího vinutí [ $\Omega$ ]	15,1 $\Omega$
Hmotnost [Kg]	5,7 Kg

### **2.3.2 Regulační Relé LUN 2141**

Regulační relé je zařízení umožňující napájení elektrické sítě letadla pomocí dynamu. Je určeno pro síť o jmenovitém napětí 24 V a pro výkon dynamu 600 W. [3]

V technické dokumentaci jsou dále uvedeny jednotlivé úkoly, které zařízení obstarává, a těchto úkolů se budu při následném návrhu nového zařízení bezpodmínečně držet, stejně tak jako určitých bodů technických parametrů.

Úkolem regulačního relé je:

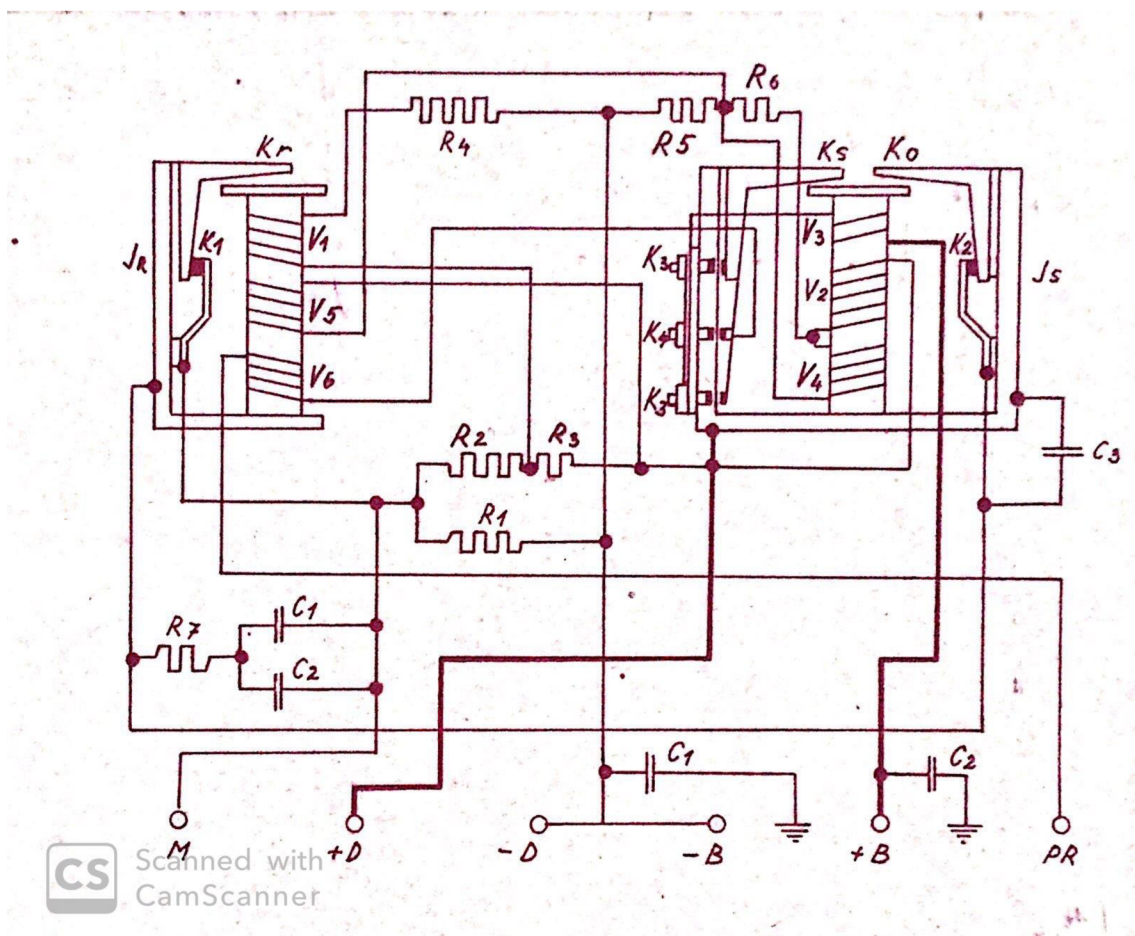
- Připojení spotřebičů a baterie k dynamu při dosažení předepsaného napětí dynamu (zde můžeme uvést referenci na bod 2.2.1.3)
- Odpojení spotřebičů a baterie od dynamu při poklesu otáček pod provozní hodnotu
- Udržování stálého napětí dynamu v předepsaných mezích při proměnlivých otáčkách náhonu
- Omezování odebíraného proudu z dynamu v předepsaných mezích
- Umožnění paralelní spolupráce dvou sestav dynamo-regulátor v jedné palubní síti

Tabulka 2 - Základní technické parametry LUN 2141 [3]

Jmenovité napětí [V]	24 V
Provozní napětí [V]	26,5 - 28,5 V
Jmenovitý výkon [W]	600 W
Jmenovitý proud [A]	23 A
Začátek omezovače proudu [A]	35-45 A
Spínací napětí při 20°C [V]	24,5 - 26,5 V
Přípustná pracovní teplota [°C]	-60 - 50 °C

V tabulce 1 můžeme vidět, že parametry regulačního děje nejsou nijak striktní, důvodem je konstrukce regulátoru a také doba, kdy byl vyvinut.

Na obrázku níže můžeme vidět obvodové schéma reléového regulátoru. Na první pohled jde vidět, že se jedná principiálně stejné zapojení, které bylo popisováno výše.



Obrázek 6 - Schéma zapojení reléového regulátoru LUN2141 [3]

V <sub>1</sub>	Napěťové vinutí regulátoru napětí
V <sub>2</sub>	Napěťové vinutí systému spínače a omezovače
V <sub>3</sub>	Sériové vinutí systému spínače a omezovače
V <sub>4</sub>	Kompenzační vinutí systému spínače a omezovače
V <sub>5</sub>	Kompenzační vinutí regulátoru napětí
V <sub>6</sub>	Vinutí pro paralelní chod
R <sub>1</sub>	Odpor tlumící škodlivý vliv indukčnosti na kontakty regulátoru
R <sub>2</sub>	Regulační odpor
R <sub>3</sub>	Odpor zvyšující kmitočet kotvičky regulátoru
R <sub>4</sub>	Předřadný odpor vinutí V <sub>1</sub>
R <sub>5</sub> + R <sub>6</sub>	Předřadný odpor vinutá V <sub>2</sub> a současně dělič napětí pro vinutí V <sub>4</sub>
R <sub>7</sub> + C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub>	Odrušení regulátoru napětí
C <sub>3</sub>	Kondenzátor potlačující jiskření na kontaktech omezovače
C <sub>1</sub> ; C <sub>2</sub>	Odrušovací kondenzátory
K <sub>1</sub>	Kontakty regulátoru napětí
K <sub>2</sub>	Kontakty omezovače
K <sub>3</sub>	Kontakty spínače
K <sub>4</sub>	Kontakty spojující vinutí V <sub>6</sub> pro paralelní chod
K <sub>s</sub>	Kotvička spínače
K <sub>o</sub>	Kotvička omezovače
K <sub>r</sub>	Kotva regulátoru napětí
J <sub>R</sub>	Jho regulátoru napětí
J <sub>s</sub>	Jho systému spínače a omezovače

Tabulka 3 - Značky ve schématu regulátoru LUN 2141 [3]

## 2.4 Požadavky kladené na vyvíjený letadlový regulátor napětí

Požadavky, které má regulátor splňovat, byly definovány výše v bodu 2.3.2.

Po formální stránce se ale vždy bude jednat o nový výrobek, který musí odpovídat současným předpisům. Ačkoliv třebaže jim původní zařízení odpovídat nemuselo. To splňovalo předpisy dané v době výroby, nejspíše pouze takové, které si sám definoval výrobce. O této části bohužel nejsou dochovány informace.

Současnou předpisovou základnu pro letecké generátory a jejich regulaci spravuje Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví (EASA), konkrétně v Certifikační specifikaci pro Evropské Technické Normalizační příkazy (CS-ETSO) [4].

Dokument ETSO-C56b se zabývá právě letadlovými generátory a startér-generátory obecně a klade na ně požadavky, proto se při následující práci budu odkazovat právě na předpis ETSO-C56b.

Důležitými body dokumentu ETSO-C56b jsou:

- Bod 3 – Technické podmínky
- Bod 4 – Označení

### **2.4.1 Technické podmínky**

Bod 3 se dále dělí na Technické podmínky Základní a Specifické, kde v kategorii specifických podmínek nejsou žádné podmínky specifikovány. Základní podmínky odkazují postupně na tři specifikační dokumenty:

- Norma minimální výkonnosti, která odkazuje na normy specifikované v dokumentu SAE Aerospace Standard (AS): AS8020, „Engine Driven D.C. Generators/Starter-Generators and Associated Voltage Regulators“ z ledna 1980 (a opětovně potvrzené SAE v srpnu 1991).
- Norma pro vliv prostředí, odkazující na dokument EUROCAE ED-14E (RTCA DO160E) „Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment“ z března 2005.
- Norma pro počítačový software odkazující na dokument EUROCAE ED-12B (RTCA DO-178B) „Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification“ z roku 1992.

### **2.4.2 Označení**

Norma dále požaduje označení zařízení dle standartních postupů uvedených v dokumentu CS-ETSO, Hlavě A, bod 1.2. Tento bod následně odkazuje na předpis části 21 (Airworthiness and Environmental Certification (Regulation(EU)No 748/2012)), který nám v bodě 21.A.807 Identification of ETSO articles definuje následující

*Každý držitel ETSO autorizace dle podčásti „O“ musí permanentně a čitelně označit každý výrobek následujícími informacemi:*

- 1) Název a adresa výrobce*
- 2) Název, typ, číslo části nebo označení modelu výrobku*
- 3) Sériové číslo nebo datum výroby výrobku, nebo obojí*
- 4) Příslušné ETSO označení [5]*

## 2.5 Návrh nového řešení

Výsledkem této rešerše a analýzy současného řešení problému regulace napětí v palubní síti letadla vyvstaly celkem jasně definované požadavky pro další práci.

Navrhujeme tedy přímou náhradu reléového regulátoru LUN 2141, která bude splňovat následující požadavky:

- Solid State provedení s využitím digitálních technologií
- Možnost přímé náhrady za typ 2141 bez nutnosti úpravy elektrické instalace letadla nebo motoru (shodné montážní otvory, shodné zapojení)
- Krytí odpovídající normě DO160E
- Odolnost vůči standardním vibracím vyskytujícím se na pístových letadlech definovaných v normě DO160E
- Regulační děj se stejnou charakteristikou, jako současné řešení a zároveň odpovídající normě SAE AS8020
- Zachování všech funkcí uvedených v bodě 2.3.2 v jejich nezměněné podobě

Ve výše popsanych bodech je vidět cíl této práce, tedy to, že chceme návrh zařízení, které bude odpovídat funkci zařízení původního, ale zároveň, vzhledem k předpisové základně, bude navrženo a vyrobeno s veškerými náležitostmi tak, aby v budoucnu byla možná jeho certifikace pro účely získání ETSO oprávnění a jeho následné použití na certifikované letadlové technice, jako schválený díl. Ovšem s jedinou výjimkou, kterou je bod 3.1.3 dokumentu ETSO C56b – „Počítačový software“.

Vzhledem k náročnosti vývoje certifikovaného software, hlavně k finanční náročnosti pořizování schválených vývojových prostředků, jsem se rozhodnul k dočasnému vynechání tohoto bodu s tím, že návrh hardware bude tvořen tak, aby v budoucnu mohlo dojít k výměně pouze regulačního mikrokontroléru za takový, který bude odpovídat výše zmíněnému předpisu. Tedy, že bude kompatibilní se schváleným software a jeho vývojovým prostředím. Zbytek navrženého hardware by měl být takový, aby zcela splňoval požadavky kladené normalizačním příkazem ETSO C56b. Tato diplomová práce se tak, vzhledem s výše popsáním skutečností, nezabývá vývojem certifikovaného software, ale navrhuje software konvenčním způsobem s použitím standardních vývojových prostředí.

### 2.5.1 Technické požadavky

Z odkazů na jednotlivé předpisy a normy můžeme tedy poznamenat parametry, které by mělo zařízení splňovat pro potřeby získání ETSO certifikace.

### 2.5.1.1 Rozsah rychlostí

Generátor musí dodávat nepřetržitý jmenovitý výstupní proud a napětí přes nepřetržitý rozsah pracovních otáček. [6]

### 2.5.1.2 Regulace napětí v ustáleném stavu

Při práci systému musí generátor a regulátor setrvat v pracovním bodě s maximální odchylkou 2,5 % od nastaveného napětí regulátoru. Taková maximální odchylka musí být splněna, pokud regulátor pracuje na minimální i maximální mezi provozních otáček, stejně tak v celém jejím rozsahu. Na každém bodu testovací rychlosti by měla být sestava testována bez zátěže, s 25, 50 a 100% zátěží. Není povoleno upravovat nastavení napětí během testu. Pokud regulátor umožňuje nastavení napětí, rozsah nastavení musí být udán výrobcem.

### 2.5.1.3 Přejídné napětí

Během připojování a odpojování jmenovité zátěže, musí regulátor udržovat napětí ve stanovených mezích daných normou SAE AS8020. Průběh časových limit je vyobrazen na obrázku číslo 7 níže <sup>2</sup>. Zde je nutno vyzdvihnout poznámku číslo 1 v obrázku 1 (Figure(1)) dokumentu AS8020, která nám říká, že tyto průběhy jsou brány na terminálech generátoru při standardním zapojení. Tím se rozumí standardní systém, užívaný v praktické aplikaci, tedy s akumulátorem připojeným do sítě. Ten významně pomáhá k vyhlazení napěťových špiček.

Dále je třeba poznamenat, že dokument ukazuje průběhy pro ustálenou regulovanou hodnotu 26 V, pro náš případ (tedy 28 V), musíme všem limitám dodat offset o hodnotě +2 V.

---

<sup>2</sup> Obr.7 odkazující na „Figure(1)“ dokumentu SAE AS8020 [6] byl z důvodu nečitelnosti původního dokumentu překreslen v prostředí AutoCAD tak, aby byly věrně zachovány jeho hodnoty a zvýšila se jeho čitelnost. Předloha je k nahlédnutí v normě SAE AS8020 [6].



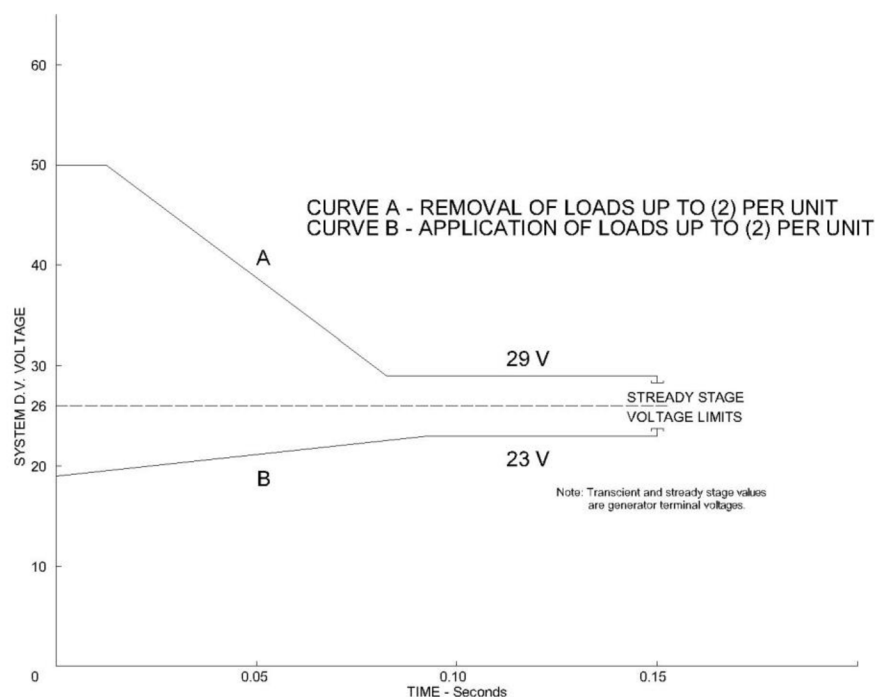


FIGURE (1) - TRANSIENT AND STEADY-STATE VOLTAGE LIMITS

Redrawn IAW to original document, 04/2020, Michael Formanek

**Obrázek 7 - Graf dovolených mezí přechodných a ustálených hodnot napětí dle AS8020 [6]**

#### 2.5.1.4 Teplota a výška

Dle normy by měl být proveden 100hodinový test, při kterém by soustava regulátoru a generátoru měla běžet na nominální rychlosti s nominálním napětím a nominální zátěží, je operována přibližně ve výšce hladiny moře a sestava je vystavena maximální přípustné pracovní teplotě okolí. Test je rozdělen pro regulátor a generátor, dále uvádím pouze část regulátoru.

Regulátor by měl řídit regulátor pracující na rychlosti, která bude způsobovat největší variaci v obvodu buzení generátoru, když je nejvyšší přípustná zátěž generátoru připojena a odpojována. Zátěž by měla být periodicky připínána a odpojována vždy s intervalem 5 s.

Během testu je zkoumána variace výstupního napětí, která by se neměla lišit od nastavené hodnoty napětí o více než 2,5 %. Během testu není povoleno upravovat nastavení napětí regulátoru. [6]

Dalším testem je 100hodinový test na nominální rychlosti, nominálním svorkovém napětí a daném zatížení proveden na maximální provozní výšce. Úseky testů by neměly být kratší jak 6 hodin. Průběh a podmínky testu jsou stejné jako v testu na úrovni hladiny moře.

Po skončení testu je třeba ověřit, zda sestava odpovídá bodu 2.4.1 normy SAE AS8020 (viz. 2.5.1.2).

Regulátor by dále měl být vystaven skladování při -65°C po dobu 8 hodin a následně by měl být přezkoušen pro ověření shody s bodem 2.4.1 normy SAE AS8020.

#### **2.5.1.5 Ochrana před vlivy prostředí**

Bod č. 4 normy AS8020 popisuje vliv okolního prostředí, které by zařízení mělo odolat. Norma prakticky vždy odkazuje na předpis DO-160 „Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment“, který předepisuje míru ochrany před vibracemi, vnikem kapalin a prachu. U kapalin je třeba zdůraznit nutnost odolnosti proti chemickým kapalinám, hlavně pak odolnost před leteckým benzínem, leteckým petrolejem, užívaným standardům hydraulických kapalin a mazacím olejům. Díky vlivům těchto kapalin je zejména nutné užití odpovídajících těsnění a izolačních hmot, konkrétní řešení je popsáno dále v této práci.

## 3 REALIZACE NÁVRHU

Na základě výše popsaných požadavků jsem sestavil návrh zařízení a následně konkrétní řešení. Zařízení je obecně navrženo tak, aby všechny zásadní součásti byly vždy duální a pracovaly paralelně. Dalším požadavkem, který byl kladen při vývoji, byla určitá možnost snadné diagnostiky, případně opravy, proto je zařízení rozděleno na celkem 3 části skládající se ze dvou rozdílných komponent.

### 3.1 Koncept zařízení

Napěťový regulátor sloužící k regulaci napětí v elektrické síti na palubě letadla pracuje součinně s generátorem (dynamem), který je poháněn od pohonné jednotky letadla. Regulační veličinou dynama LUN2111 je tedy pouze velikost proudu budícím vinutím dynama.

Regulátor tedy snímá velikost napětí v systému a pomocí PID regulátoru naprogramovaného do řídicího mikrokontroleru, upravuje velikost střídavého řídicího signálu. Řídicí signál je nízkoúrovňový (0 – 3.3 V), a vstupuje do driveru pro spínání výkonového MOSFET tranzistoru. Tento tranzistor je vlastním spínacím prvkem pro řízení budícího proudu dynama. Vzhledem k zapojení zařízení, konkrétně díky tomu, že dynamo má společnou zem pro budící i generátorovou cívku, je nutné užití High-Side MOSFETu v řídicím obvodu. Změna zapojení není možná vzhledem k výše definovanému požadavku plného zachování původního řešení, a tím možnosti přímé náhrady regulátoru za nový typ bez nutnosti jakýchkoliv změn.

Součástí regulátoru musí být samozřejmě bezpečnostní prvky, jako jsou ochrana před přetížením dynama, přepětová ochrana a ochrana zpětného proudu do dynama.

Jak již bylo zmíněno, veškeré stěžejní komponenty jsou zdvojené a koncepčně to znamená, že v zařízení jsou dva na sobě nezávislé systémy, které mají totožnou funkci.

Veškeré komponenty, které jsou na desce použity, jsou vybírány tak, aby patřily do skupiny „Automotive grade“ a také, aby byly teplotně odolné až do 120°C.

### 3.2 Výkonová část

Hlavní součástí zařízení je výkonová část zařízení napěťového regulátoru. Na této obvodové desce jsou umístěny veškeré výkonové, měřící a další komponenty pro úpravu napětí. Dále je prostřednictvím této desky a jejich šroubových terminálů celé zařízení připojeno do systému. V těsné blízkosti terminálů pro připojení vodičů jsou

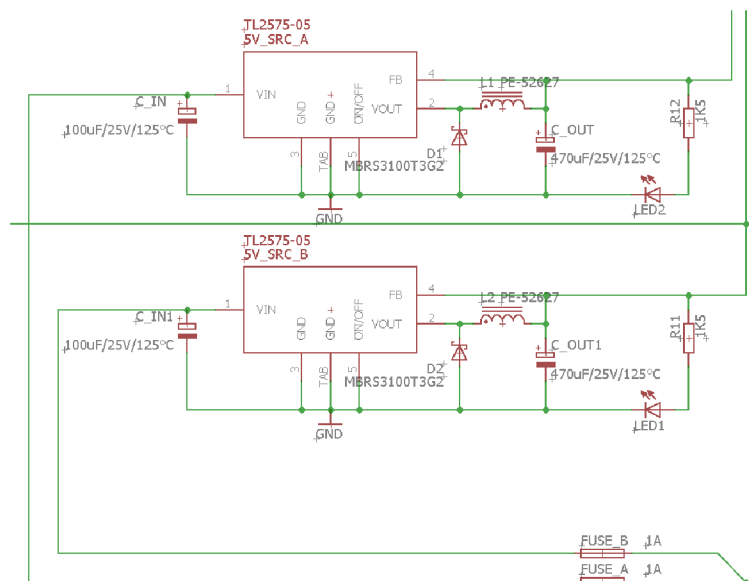
umístěny senzory proudu a výkonová dioda, sloužící pro zamezení zpětného proudu. Přímo z této části jsou také vyvedeny vodivé cesty pro snímání napětí systému, tedy naší regulované veličiny. Veškeré tyto snímací body jsou dovedeny do jednoho ze dvou konektorů, na které se následně připojují řídicí desky.

Buzení generátoru je realizováno, jak bylo zmíněno výše, pomocí signálu z jedné ze dvou řídicích desek. Jelikož se jedná o nízko úrovněový signál, je užito High Side MOSFET driveru, který následně řídí výkonový tranzistor. Budící signál je následně veden do bistabilního relé, které slouží pro nouzové odpojení budícího vedení, například v případě selhání tranzistoru nebo řídicího článku. Relé je překlopeno kterýmkoliv řídicím mikrokontrolerem.

Bistabilní relé od společnosti TE (číslo části: 5-1393243-2) je v konfiguraci s dvojitým přepínacím kontaktem. Druhý kontakt je využit jako zpětná vazba pro řídicí mikrokontrolery. Ten má také možnost relé resetovat. Toho je využito pro možnost automatického obnovení (například po dočasné anomálii). Dalším důvodem, proč je do návrhu zapojeno obousměrné ovládání tohoto bistabilního relé a jeho zpětná vazba, je možnost „self-testu“, který je prováděn vždy po zapnutí zařízení. Zařízení si tak vyzkouší, zda relé správně spíná, v opačném případě zahlásí chybu.

Jak bylo zmíněno, bezprostředně u šroubových terminálů jsou umístěny senzory proudu ACS709, jedná se o zařízení řadící se do kategorie „Automotive“. Ostatně podle stejného klíče byly vybírány i další komponenty tohoto zařízení. Senzor proudu ACS709 ve formě integrovaného obvodu, který obsahuje mimo napěťového výstupu i výstup alarmový. Úroveň limitního proudu je nastavován v nulté verzi desky pomocí víceotáčkového SMD trimru. V další verzi by již měla být nastavena pevně pomocí pevných rezistorů v zapojení napěťového děliče. Alarmový výstup je veden přímo do řídicí desky, kde je zapojen jako diskretní vstup kontrolního členu.

Další komponentou, umístěnou na výkonové obvodové desce, je integrovaný Step-Down měnič pro úpravu napětí pro mikrokontroler. Opět se jedná o duální zapojení, kdy každý mikrokontroler má svůj vlastní zdroj napětí.



**Obrázek 8 - Schéma zapojení napájecí části**

Vzhledem k nutnosti úpravy napětí z 28 V na 5 V, padla volba právě na spínaný zdroj, protože jsem kvalifikovaným odhadem vyhodnotil, že odpadní tepelný výkon lineárního napěťového regulátoru by byl zbytečně vysoký. Step-Down měnič je opět Automotive grade a dle datasheetu by neměl způsobovat významnější rušení. Dalším aspektem, který by měl napomoci od možného rušení, je způsob umístění zařízení v jeho pouzdru, které je kompletně vyrobeno z frézovaného duralu, který je vodivě propojen se zemním vedením desky.

Vzhledem ke komplikacím spojeným s programováním mikrokontroléru, je v revidované verzi desky vyměněn zdroj na 3 V variantu.

Výkonová část je opět složena z několika komponent, kdy ústředním prvkem je MOSFET tranzistor IRFB7545, který je řízen pomocí High-Side Driveru IRS25752. Driver je napájen pomocí lineárního napěťového regulátoru MC7808, zde bylo, vzhledem k minimální spotřebě elektrického proudu, použito lineárního řešení. Součástí spínací skupiny komponent na výkonové desce je také MOSFET tranzistor sloužící ke spínání žárovkového výstupu. Tento výstup slouží pro spínání varovného světla, umístěného v pilotní kabině letadla. Vzhledem k požadavku na přímou náhradu zařízení, není dovoleno měnit signálky v letadle. Proto je systém navržen tak, aby mohl bez problému ovládat originální řešení varovného světla využívající standardní vláknovou žárovku. MOSFET užitý pro varovné světlo, je zvolen pro řízení pomocí TTL signálu v High-Side provedení.

Výkonově jsou součástky vybrány se značným přesahem, například pokud z tabulky (Tabulka 1 - Technické parametry Dynama LUN 2111) víme odpor budícího vinutí,



Master nebo Slave, je rozhodnuto dle toho, do jakého konektoru je zařízení připojeno. Daný pin je pak buď nezapojen (Slave) nebo je uzemněn (Master). Tento způsob ovládání byl použit pro možnost rychlé diagnostiky, například prostým přehozením kabelu desek mezi sebou, případně výměnou kterékoliv desky za novou bez nutnosti zásahu do nastavení zařízení.

Zařízení je dále projektováno tak, aby bylo tzv. „LRU“<sup>3</sup>, tedy že jedinou možností pro opravu zařízení v pověřeném servisním středisku, je výměna celých součástí. Tato praxe je u leteckých zařízení obvyklá, aby byla zajištěna vysoká kvalita a záruka nastavených hodnot zařízení, daných výrobcem.

Kalibrace zařízení je tedy prováděna elektronicky pomocí naprogramovaných korekčních hodnot.

Posledním důvodem pro zvolení externí desky obsahující samotný mikrokontroler, je možnost budoucí výměny za mikrokontroler obsahující program, vyvíjený ve schváleném prostředí dle předpisu DO-178C<sup>4</sup>. Vzhledem k finanční a časové náročnosti vývoje certifikovaného software, se tato diplomová práce návrhem certifikovaného software cíleně nezabývá. Klade však nejvyšší prioritu tomu, aby bylo možné povýšit zařízení pro použití v certifikovaných leteckých zařízeních, a to pouhou výměnou koncové řídicí desky, namísto aktuálního zaměření pouze na kategorii experimentál,

V rámci vývoje zařízení pro tuto diplomovou práci bylo rozsáhlou analýzou trhu vybráno zařízení výrobce STMicroelectronics. Konkrétně jsem vybral zařízení STM8S105K4T6CTR. Jedná se o jednoduchý 8bitový mikrokontroler, pracující s taktem 8 MHz daným externím krystalem. Mikrokontroler obsahuje celkem 25 vstupních a výstupních pinů. Mimo jiné podporuje samozřejmě i veškeré základní komunikační protokoly. Pro plánovanou aplikaci bude ale použita pouze komunikace pomocí protokolu UART pro diagnostické a vývojové účely.

Vzhledem k požadavku na vytvoření jednoduchého programu, snadno přístupného, bylo díky mým pozitivním zkušenostem z minulých projektů, vybráno vývojové prostředí Visual Studio Code s platformou „PlatformIO“, která dovoluje poměrně snadno překládat kód pro různé platformy.

To umožnilo pracovat na programu na vývojovém kitu i v době, kdy ještě nebyla hotová řídicí deska a následně bylo možné program nahrát i na konečný výrobek.

---

<sup>3</sup> LRU – Line Replaceable Unit

<sup>4</sup> DO-178C, Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification

Bohužel v této fázi došlo v konečné části projektu ke komplikacím, když jsem zjistil, že modul PlatformIO vykazuje pro platformu STM8 chybu znemožňující jeho použití. Vzhledem k časové tísní jsem se rozhodl pro rychlou náhradu MCU na řídicí jednotce za kontrolér z vyšší rodiny STM32, který má srovnatelný počet vstupně/výstupních pinů a stejně tak srovnatelné komunikační rozhraní. Konečný vybraný model nese označení STM32F103C8T6TR. Tento model je na rozdíl od první varianty 32bitový, obsahuje celkem 37 vstupně/výstupních pinů. Z toho je 10 vstupů napojených na 12bitový analogově digitální převodník. Maximální frekvence je 70MHz, čehož jsem se rozhodl využít pro zlepšení parametrů regulace. Hlavním rozdílem mezi dvěma uvažovanými mikrokontrolery je právě napájecí napětí, kvůli kterému je nutné provést výměnu spínaných zdrojů na výkonové desce. Zdroje jsou použity ze stejné rodiny, pouze jsem zvolil číslo části, odpovídající výstupnímu napětí 3 V.

### 3.3.1 Analogové signály vedoucí na řídicí desku

- **Snímání napětí** – hlavní řízená veličina vedoucí od terminálu „B+“. Napětí je vedeno až na řídicí desku v plném rozsahu, následně je pak pomocí rezistorů v zapojení napěťového děliče upraveno pro rozsah odpovídající maximální vstupní hodnotě napětí pro analogově digitální převodník. Tedy pro rozsah 0–3 V.
- **Zpětná vazba od budícího signálu** – tento signál, opět v neredukované formě, slouží pro diagnostické účely. Program je navržen tak, že po spuštění (během své sebe diagnostické procedury) v krátkém časovém úseku zapne buzení dynama, tedy aktivuje příslušný PWM výstup a pomocí zpětné vazby je ověřováno, zda sestava PWM výstup – vedení – MOSFET driver – MOSFET tranzistor pracuje dle očekávání. V opačném případě může systém přejít do chybového stavu
- **Zpětná vazba od varovné signálky** – opět účel stejný jako bod výše. Protože signálka není napájena přímo z MCU, ale je řízena TTL MOSFET tranzistorem, je užito kontroly zpětné vazby pro ověření funkčnosti všech komponent.
- **Zpětná vazba od přepětové ochrany** – přepětová ochrana je realizována pomocí snímání napětí A/D převodníkem a jako alternativní detekce přepětí je použita Zenerova dioda, vedoucí do diskretního vstupu řídicího kontroléru. Ta je dále chráněna další Zenerovou diodou pro zamezení poškození kontroléru vlivem vysokého napětí na vstupu. V momentě, kdy dojde k přepětí, dojde k vystavení signálu na digitální výstup mikrokontroleru, tento signál vede do bipolárního NPN tranzistoru zapojeného jako spínač, který následně provede překlopení



relé. Překlopení relé odpojí vedení buzení a tím izoluje napájení budící části generátoru od řídicí části. Pro potřeby ověření funkčnosti obou cívek bistabilního relé, je zařízení vybaveno vedením pro ovládání relé z MCU v obou směrech (linie pro jeho samotné řízení, případně resetování). Pro zjištění stavu relé je systém vybaven právě zpětnou vazbou. Zpětná vazba je napájena z hlavní napájecí větve dané větve (systém A či B), signály tak nejsou upravovány, pouze jsou vybaveny blokovacími rezistory pro ochranu MCU.

- **Snímání proudu** – díky tomu, že senzor proudu má napěťový výstup, není nutné jej jakkoliv upravovat.

### 3.3.2 Digitální signály vedoucí na řídicí desku

- **Detekce nadproudu** – jak bylo výše zmíněno, senzor proudu má kromě napěťového výstupu, odpovídajícího protékanému proudu, také diskretní signál. Ten se objeví v momentě, kdy úroveň proudu překročí stanovenou mez. Tento „alarmový výstup“ musí být povolen, to je řešeno diskretním výstupem z desky, tento výstup také provádí resetování tohoto chybového stavu.
- **Vybavení a resetování přepětové ochrany** – tyto výstupy navazují na princip funkce bistabilního relé, realizujícího odpojení budícího proudu při překročení kritické hodnoty napětí.
- **Varovná signálka** – digitální výstup sloužící pro indikaci chybového stavu, signál je posílen TTL MOSFET Tranzistorem.
- **MCU Interlock** – vedení spojující obě řídicí desky, které je pomocí pull-down rezistoru drženo v nízké úrovni, dokud jeden z MCU pomocí svého diskretního výstupu nezvedne úroveň signálu. Tento signál je používán zejména při selftestu, aby mohl master zablokovat podřízený kontrolér. Tato blokace je nutná zejména při testu budícího vedení a vedení varovné signálky, tyto signály jsou brány až za izolačními diodami, protože by se při testu mohly navzájem slučovat a test by tak nebyl průkazný.
- **MASTER/SLAVE** – tento diskretní vstup byl také popsán výše, jedná se o jednoduché a jednoznačné určení, v jakém modu má mikrokontroler pracovat. Vstupní pin je v režimu „Pull-UP“ a pokud je obvodová deska zapojena na pozici „Master“, je daný pin uzemněním posunut na nízkou logickou úroveň.
- **Signál řízení buzení** – zde se jedná o pin s možností pulzně šířkové modulace (PWM), který řídí samotnou výkonovou část sloužící pro regulaci proudu tekoucího do vinutí dynama.

### 3.4 Analýza současného řešení

Pro potřeby návrhu parametrů regulátoru bylo nutné podrobně prozkoumat původní řešení v standardních podmínkách. Pro tyto potřeby jsem vytvořil sestavu simulující standardní pracovní podmínky, jako by byla sestava dynamu s regulátorem přimontována na přírubu motoru letadla.

Pro potřeby simulace náhonu od motoru letadla jsem použil třífázový indukční elektromotor Vybo o výkonu 2,2 kW. Pro plynulou regulaci výkonu elektromotoru jsem použil frekvenční měnič Vybo E550. Podrobné informace jsou uvedeny v tabulce níže.

**Tabulka 4 - Technické parametry elektromotoru**

Výkon motoru [kW]	2,2 kW
Počet pólů motoru [-]	2
Použité napětí [V]	230 V
Otáčky motoru [ot.min <sup>-1</sup> ]	2920 ot.min <sup>-1</sup>
Pracovní frekvence [Hz]	50 Hz
Počet fází [-]	3

Jak je vidět, jedná se o dvojpólový elektromotor s nominální frekvencí 50 Hz a nominálními otáčkami 2920 ot.min<sup>-1</sup>. Užití frekvenčního měniče nám dovoluje plynulou regulaci pro dosažení pracovních otáček dynamu (3800–6000 ot.min<sup>-1</sup>, viz Tabulka 1 - Technické parametry Dynamu LUN 2111). Pro dosažení pracovních otáček dynamu je třeba na frekvenčním měniči volit rozsah frekvence (63–100 Hz).

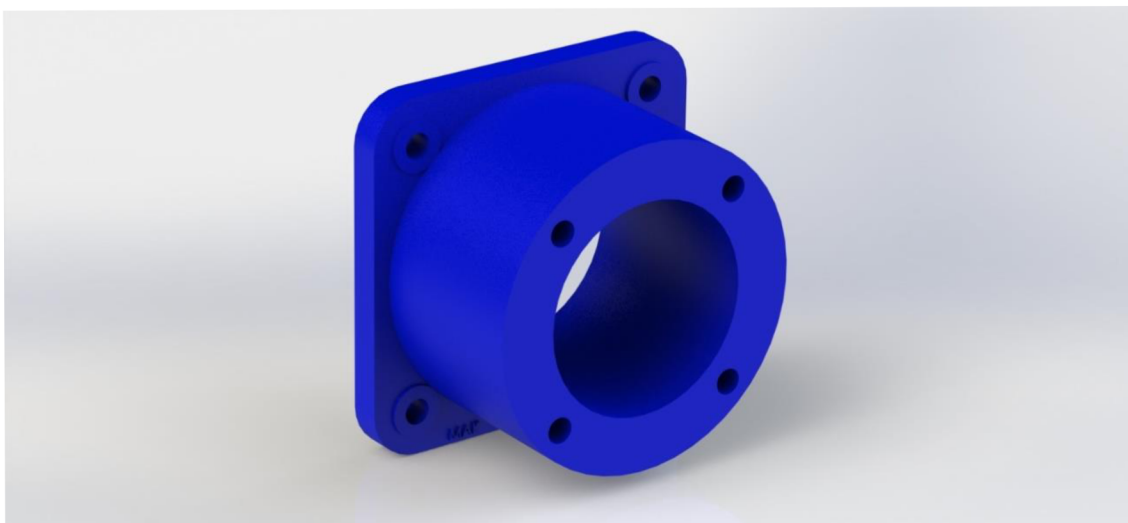
#### 3.4.1 Testovací sestava

Dynamo bylo potřeba vhodně mechanicky připojit k elektromotoru a také vytvořit vhodný přechod mezi rozdílnými hřídelemi. Na základě technického listu elektromotoru [7] a na základě měření rozměrů hřídele a příruby dynamu jsem provedl v modelačním prostředí nejprve návrh úchyty dynamu.

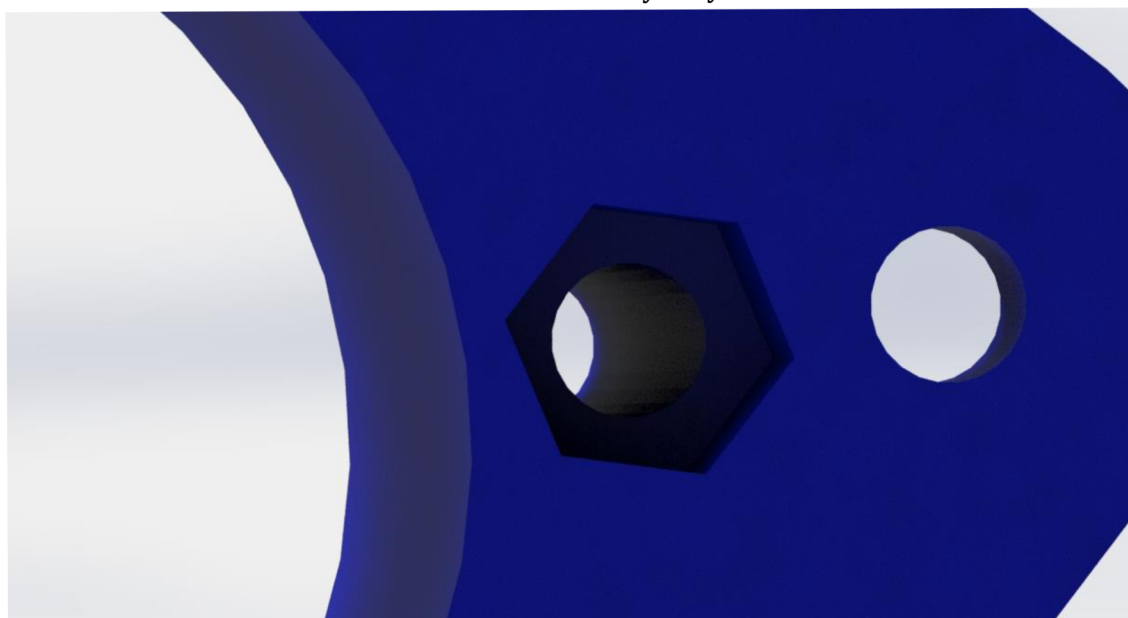
Na obrázku níže je vyobrazen model úchyty. Byl navržen jako prosté spojení mezi dvěma rozdílnými přírubami s přesně definovanými úchytnými otvory. Elektromotor má ve svojí přírubě závity M8, proto jsou v modelu otvory pro tyto šrouby přesně definované. Při výrobě metodou 3D tisku byla manuálně upravena výplň této části tak, aby v těsné blízkosti průchodu šroubu byly stěny se 100% výplní a tím byla zajištěna dostatečná pevnost. Na pevnost 3D tisku byl kladen významný důraz, neboť dynamo je poměrně dlouhé a váží přibližně 6 kg, takže síly působící na přírubu menších rozměrů jsou značné.

Dynamo je originálně přichyceno do příruby motoru pomocí matic M8 na štefty instalované v přírubě motoru letadla. Protože instalovat štefty do plastového dílce nebylo vhodné, rozhodl jsem se pro řešení, které prakticky umožňuje pouze 3D

tisk a to možnost vytvořené specifické díry, která plně kopíruje rozměry šroubu M8. Ten je do ní vložen a drží pevně na místě, zařízení je tak možné uchytit pouze zašroubováním matic na obnažené konce šroubů.



**Obrázek 10 - Model úchytu Dynama**



**Obrázek 11 - Detail provedení úchytu šroubu**



**Obrázek 12 - Instalace příruby na dynamo**

Při návrhu přechodu pro hřídele byla bezpodmínečná nutnost zachování soustřednosti, aby při provozu nedocházelo k vibračním nebo házivosti hřídele. Díky návrhu v počítačovém modelačním programu a následné výrobě na 3D tiskárně, bylo zachování soustřednosti poměrně jednoduché. Pro vymezení jemných odchylek od „počítačové přesnosti“ (která ne vždy koresponduje s realitou a obzvláště ně u staršího zařízení, které bylo vyráběno ručně), jsem provedl drobné úpravy pro zvětšení obrysu děr (zvláště té na zubovou hřídel dynama), tyto úpravy způsobily, že nástroj sice nesedí na hřídeli zcela „natěsno“, ale právě vzniklá vůle umožnila vymezení všech nepřesností nutných pro hladký chod. Ladění dosedací plochy zubové hřídele dynama byl poměrně dlouhý proces čítající přibližně 4 pokusy/výrobky.

Celou sestavu pro zkoušky dynama je možné vidět na obrázku dále.



Obrázek 13 - Sestava pro testování dynamu

### 3.4.2 Analýza charakteristik

Jako základní vědomost, kterou musíme disponovat pro návrh vhodného regulátoru soustavy, je znalost charakteristiky soustavy. K analýze dynamu jsem zvolil přístup takový, že beru soustavu pouze jako „black box“ a měřím její vstup a výstup, ze kterého následně analytickými metodami zjišťuji její přenos.

Ze znalosti řízení tohoto dynamu víme, že jedinou řídicí veličinou ovlivňující velikost výstupního napětí [ $V_{OUT}$ ], je proud cívkou cizího buzení dynamu [ $I_{FIELD}$ ]. O otáčkách dynamu uvažujeme jako o veličině pracující v nominálních hodnotách, kterou nemůžeme ovlivnit. Do systému nám tedy vstupuje jen jako chyba a regulátor ji musí kompenzovat. Stejně tak do systému vstupuje výstupní proud generátoru [ $I_{OUT}$ ], tedy zátěž generátoru.

Pro potřeby analýzy současného řešení bylo také nutné naměřit charakteristiky regulované soustavy, tedy odezvy na vliv jednotlivých „chyb“, vstupujících do regulované sestavy, kde akčním členem je originální reléový regulátor LUN 2141. Zde jsem vybíral takové charakteristiky, které budou následně splňovat podmínky pro dosažení shody s normou SAE AS8020. Vybrané měřené charakteristiky jsou popsány níže.

Měření bylo provedeno na sestavě pospané v bodě 3.4.1. Jako měřicí prostředky pro analýzu přechodových dějů jsem použil následující laboratorní přístroje:

- Dvoukanálový Osciloskop UNI-T UTD4202C (s/n: 2100004213) s maximální frekvencí 200MHz a 2GS/s. Osciloskop disponuje možností exportu naměřených dat ve formátu \*.csv. Taková data jsem následně zpracoval v prostředí programu MATLAB

- Laboratorní zdroj DIAMETRAL P230R51D (s/n: 117), který mi posloužil jako náhrada akumulátoru, který je standardně přítomen v této sestavě, pokud je instalována v letadle.
- Přístroj FLUKE 1507, který jsem používal pro měření napětí
- Elektronická zátěž STATRON Typ 3229.0 (s/n: 0309020), použitá pro simulaci odběru proudu z generátoru do systému
- Klešťový multimetr UNI-T, typ: UT219DS (s/n: 819050218) použitý primárně pro měření proudu ve výkonových vodičích

Jak bylo zmíněno, nejdůležitější data byla exportována z osciloskopu na datový nosič a následně zpracovávána v prostředí programu MATLAB. Ten mi posloužil pro filtraci poměrně zašuměných dat a k měření přechodových charakteristik systému. V tomto programu jsem následně také provedl návrh modelu systému na základě získaných dat, návrh a ladění veličin navrhovaného regulátoru a další.

Měření jsem započal s ucelenou soustavou v originálním provedení, tedy i s původním reléovým regulátorem. Zde jsem natrefil hned na několik problémů, plynoucích z původních součástí. Prvotním problémem bylo nalezení vůbec nějakého funkčního regulátoru, neboť nové se již nevyrábí a čerstvě generálováných kusů je jen velmi málo, protože jsou ve valné většině v provozu, tedy instalovány do letadel.

Dalším problémem byl značný šum výstupního napětí. Prakticky v prvních několika setech měření jsem narážel na šum o velikosti přibližně 50-60 V měřeno „špička-špička“. Data tedy nebyla absolutně použitelná, neboť ustálená hodnota výstupního napětí je 27,5V.

Při bližším zkoumání jsem objevil pravděpodobnou příčinu problému a tím byly (pravděpodobně způsobené dlouhým provozem) opotřebené a špatně usazené uhlíky komutátoru. Tato závada způsobovala značné elektrické výboje u dvou z celkem čtyř uhlíkových sběračů. Provedl jsem tedy demontáž zařízení, demontáž sběracích uhlíků a jejich manuální srovnání a očištění. Při vizuální kontrole bylo zjištěno značné nerovnoměrné opotřebenění a také poškození vzniklé od elektrických výbojů. Díky tomu, že jsem měl ještě dostatek materiálu, byla možná jejich korekce pomocí pilníku a následné začištění jemným smirkových papírem.





**Obrázek 14 - Ukázka opotřebených uhlíkových sběračů**

Na obrázku 13 je vidět původní stav uhlíku, je zde krásně vidět rozdíl mezi uhlíky pro buzení vinutí, které jsou v pořádku a následně dva uhlíky se značnou mírou degradace od elektrických výbojů.

Po instalaci ošetřených kusů byly již měřené výsledky uspokojivé a po následné filtraci v prostředí programu MATLAB, byla získána relevantní data.

#### **3.4.2.1 Odezva na skokovou změnu zátěže**

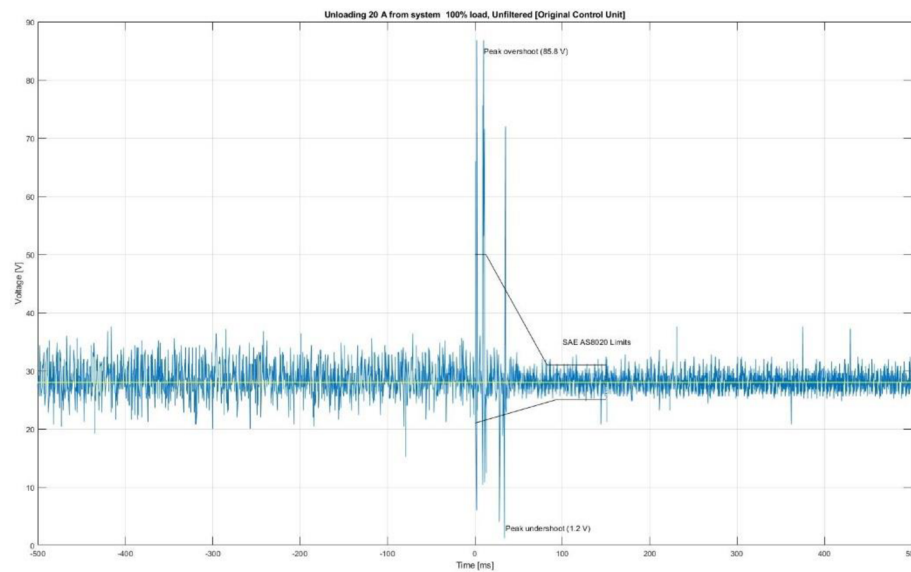
První charakteristikou, kterou jsem měřil, byla odezva systému na skokovou změnu zátěže sestavy. Zde jsem využil elektronické zátěže, kdy jsem si nejprve nastavil daný proud zátěže, který jsem následně pomocí přepínače připojoval a odpojoval dle daného testu. Současně jsem vše zaznamenával na osciloskopu a data ukládal. Vzhledem k charakteristice testu, jsem neprováděl filtraci dat, neboť myšlenkou bylo odhalit případné špičky v systému a následně je srovnat s povolenými maximy, udanými v grafu č. 1 normy SAE AS8020 viz. Obrázek 7 - Graf dovolených mezí přechodných a ustálených hodnot napětí dle AS8020.

Všechna měření byla provedena vždy z ustáleného stavu regulované veličiny při nominálních hodnotách otáček generátoru. Na naší sestavě byly tyto otáčky generovány elektromotorem, kde bylo nastaveno 75 Hz, což odpovídá 4500 ot.min<sup>-1</sup>.

V grafech jsou vždy vyznačeny v měřítku limity přechodových dějů tak, jak udává norma SAE AS8020 [6].

- Situace č. 1 Odpojení zátěže o velikosti  $I_{OUT} = 20 \text{ A}$   
Zde jsem zkoumal průběh regulačního děje v momentně, kdy dojde ke skokové změně (odpojení) zátěže o maximální hodnotě. Maximální hodnota napětí při přechodovém ději dosahovala téměř 86 V,

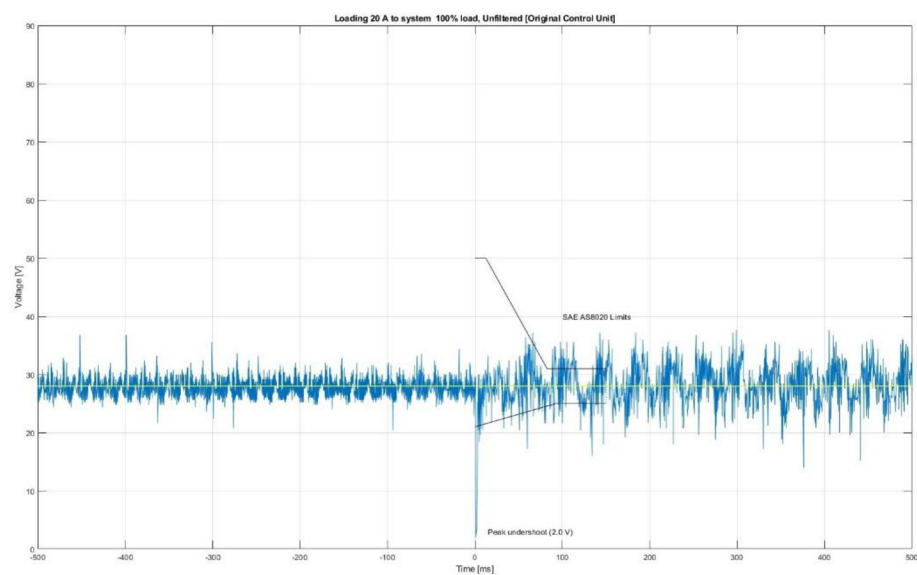
naopak minimální hodnota klesla ke 3 V. V přechodovém ději byly ještě celkem tři významné zákmity, než se systém ustálil na hodnotě přibližně 27,5 V. Z průběhu signálu lze zcela jistě vyloučit významnější vliv šumu na měření amplitudy nejvyšších zákmitů, protože se nejednalo o ojedinělý jev, a také proto, že amplituda šumového signálu je přibližně 10× menší. Dalším zajímavým úkazem je rozptyl regulované veličiny okolo osy požadované hodnoty. Zde si lze povšimnout útlumu rozptylu po odpojení zátěže, tento jev je způsoben mechanickými limity reléové regulace.



**Obrázek 15 - Odpojení zátěže o velikosti 20A**

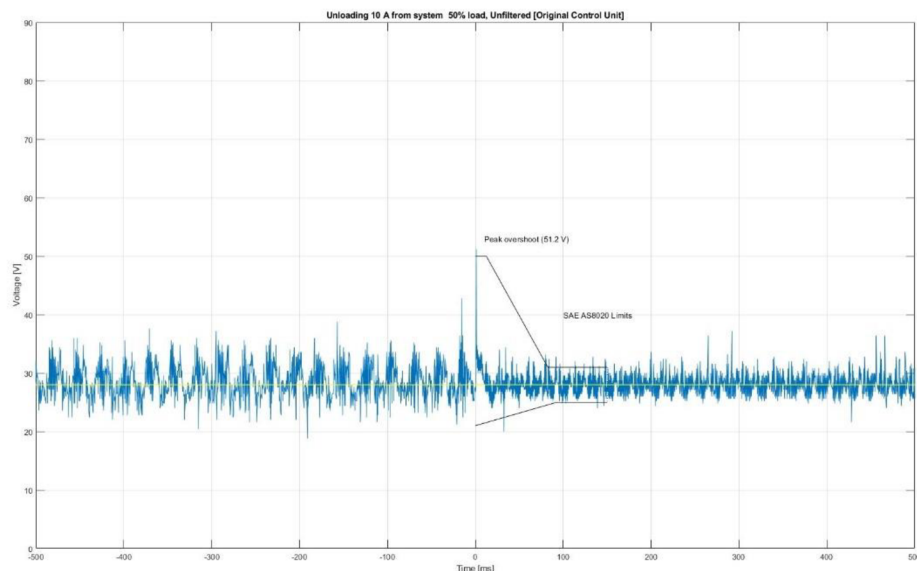
- Situace č. 2 Připojení zátěže o velikosti  $I_{OUT} = 20\text{ A}$ . Zde se projevily opět podobné jevy, jako v prvním případě, ale zákmitů bylo významně méně. Nejvýznamnějším vrcholem byl podkmit na 1 V. O čase ustálení regulačního děje se zde nedá hovořit, neboť výše zmíněná kmitavost regulované veličiny pod 100% zátěží znemožňuje přesný odhad daného bodu.





**Obrázek 16 - Připojení zátěže o velikosti 20 A**

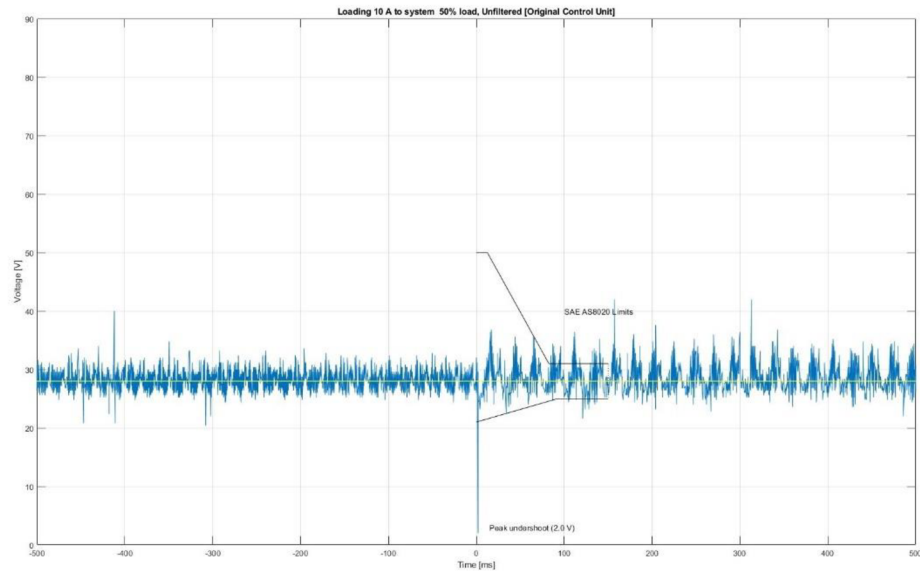
- Situace č. 3 Odpojení zátěže o velikosti  $I_{OUT} = 10\text{ A}$   
Opět stejné charakteristiky jako v předchozích případech, maximální překmit je zde o hodnotě 50,2 V. Lze zde opět pozorovat ustálení kmitání při odpojení zátěže.



**Obrázek 17 - Odpojení zátěže o velikosti 10 A**

- Situace č. 4 - Připojení zátěže o velikosti  $I_{OUT} = 10\text{ A}$ .  
Posledním měřením jsem zkoumal opět charakteristiku přechodového děje, tentokrát při situaci, kdy připojujeme 50% maximální zátěže

dynama. Opět lze vidět významný prvotní podkmit sahající až na 0 V. Jak bylo zmíněno výše, jedná se o nedostatky reléové regulace. Pokud aplikujeme zátěž v čase, kdy je relé odpojeno, trvá určitý čas, než je systém schopen buzení opět připojit a generovat tak více energie. Pokud je systém standartně zapojen v letadle, obsahuje akumulátor. Který tyto špičky pokryje a vyrovná, pokud ale dojde k poruše akumulátoru, systém musí pracovat dále a tyto výkyvy jsou do přístrojového vybavení letadla.



**Obrázek 18 - Připojení zátěže o velikosti 10 A**

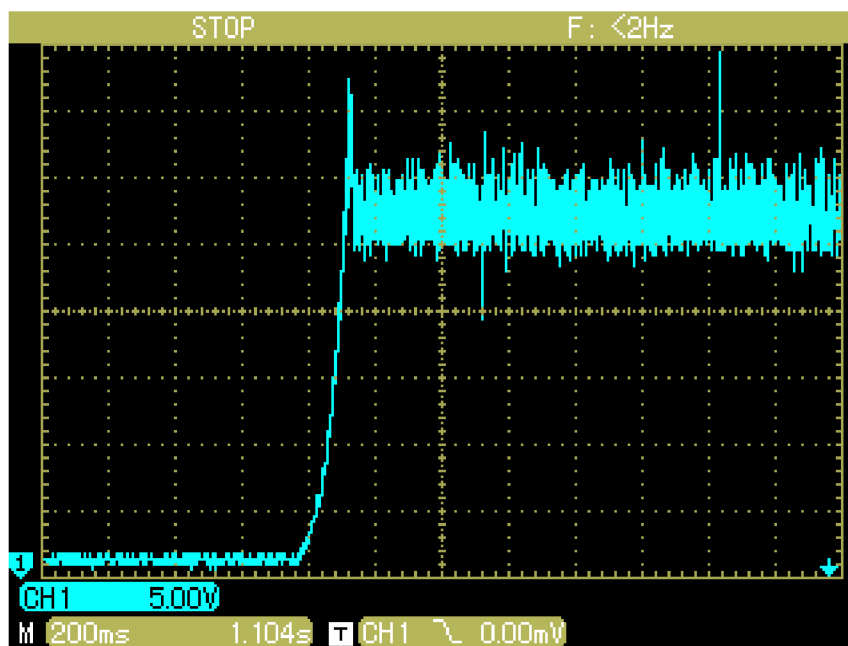
### 3.4.2.2 Odezva na skokovou změnu řídicí veličiny

Vzhledem ke konstrukci Regulátoru není možné způsobit skokovou změnu žádané veličiny, neboť je pevně nastavena. Pro potřeby zjištění odezvy jsem tedy použil jističe, instalovaného na větvi buzení dynama. Pomocí spínání jističe jsem tak byl schopen simulovat změnu žádané veličiny a tím změřit parametry regulované soustavy. Vzhledem ke konstrukci regulátoru je zřejmé, že není možné tímto zásahem (přerušením výstupu akční veličiny) ovlivnit průběh regulovaného děje, jako by k tomu mohlo například dojít u PID regulátoru bez Anti-Windup systému, kdy by mohlo dojít k přesycení integrační složky.

Na obrázku 18 níže lze pozorovat náběh řízené veličiny při započetí regulačního děje. Na osciloskopu jsem naměřil následující hodnoty:

Tabulka 5 - Parametry regulačního děje původní sestavy

Doba náběhu [ms]	96 ms
Doba ustálení [ms]	165 ms
Ustálená hodnota [V]	27,5 V



Obrázek 19 - Přechodový děj regulované soustavy

### 3.4.2.3 Identifikace systému dynama

Nejdůležitější částí byla identifikace samotného systému dynama, tedy již bez regulátoru. K tomuto systému přistupujeme jako k tzv. „black boxu“. Vzhledem k tomu, že neznáme jeho přesné fyzikální parametry, zvolil jsem metodu analýzy systému měření odezvy výstupu na jeho vstup.

Základní parametry jsou již dány v Tabulka 1 - Technické parametry Dynama LUN 2111, dále jsem již vypočetl maximální teoretický proud vinutím buzení

dynama  $I_{\text{FIELD MAX}} = 1,85 \text{ A}$ . S těmito vstupními daty jsem tedy přešel k experimentální části měření.

Dynamo jsem připojil k elektronické zátěži a provedl sérii pokusných měření, kdy jsem postupně pouštěl ze zdroje konstantního proudu proud do vinutí buzení generátoru a sledoval odezvu. Můj předpoklad, že by napětí, při aplikaci byť jen minimálního proudu do vinutí při nulové zátěži zařízení, nekontrolovatelně vzrostlo, se nepotvrdilo. Naopak se ukázalo, že ztráty v celém zařízení jsou tak významné, že se systém na první pohled chová jako setrvačný člen prvního řádu.

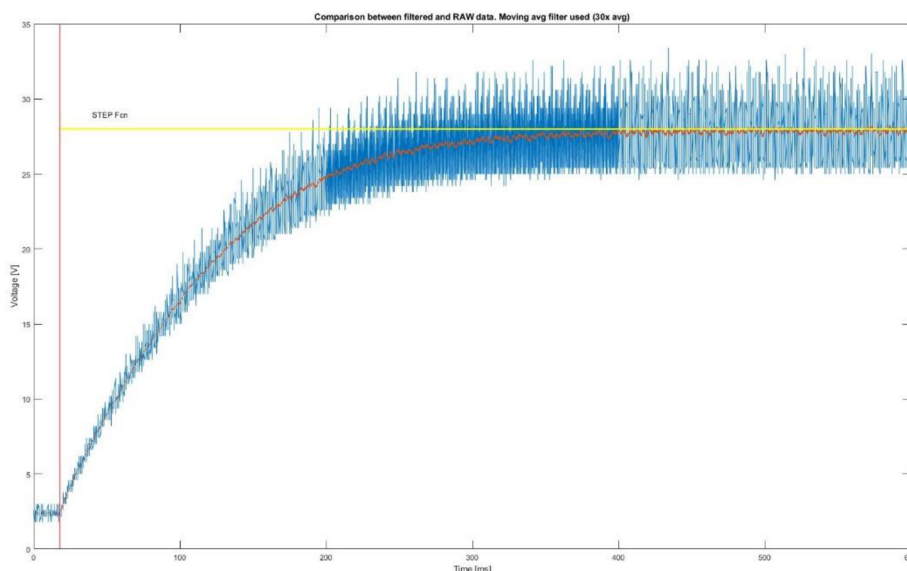
Postupně jsem tedy snižoval zátěž až do chvíle, kdy jsem ji zcela odpojil a přešel k měření odezvy na skokovou změnu akční veličiny dynama bez zátěže. Systém jsem měřil bez zátěže, protože v této fázi je nejnáchylnější k zakmitání.

Testovací parametry byly následující:

**Tabulka 6 - Parametry pro identifikaci dynama**

Ustálená hodnota napětí [V]	28 V
Otáčky hřídele dynama [ $\text{ot.min}^{-1}$ ]	4500 $\text{ot.min}^{-1}$
Zátěž systému [A]	0 A
Proud do vinutí buzení [ $I_{\text{FIELD}}$ ]	0,491 A

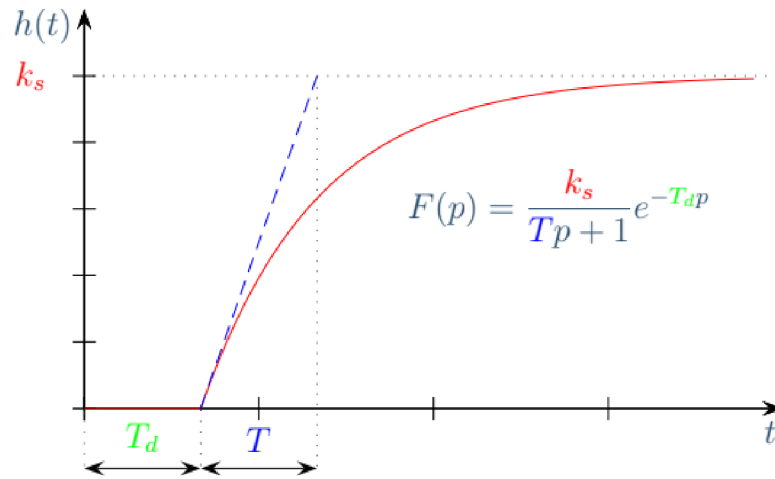
Systém jsem opět měřil pomocí osciloskopu, data byla exportována do souboru a následně zpracována v prostředí programu MATLAB.



**Obrázek 20 - Naměřená data odezvy dynama na jednotkový skok řídicí veličiny**

Na obrázku č. 19 jsou vykreslena naměřená data, žlutá linie značí jednotkový skok žádané veličiny, červená lile označuje počátek identifikace, systém nemá měřitelné dopravní zpoždění.

S užitím Neparametrické metody identifikace popsané v [8], konkrétně s měřením časové konstanty přechodové charakteristiky systému prvního řádu, statického, bez dopravního zpoždění, jsem provedl identifikaci daného systému.



Obrázek 21 - Neparametrická identifikace systému prvního řádu [8]

Vzhledem ke značné míře šumu v signálu jsem se rozhodl pro filtraci křivky s využitím klouzavého průměru. V prostředí programu MATLAB jsem použil fci „movmean(X, 30)“, tedy již výše zmíněnou filtraci dat metodou klouzavém průměru s délkou průměrování 30.

Vztah mezi originálními daty a filtrovanými lze vidět přehledně na obrázku č. 19, kde originální data jsou zobrazena modře a filtrovaná červeně.

Na základě metody vyobrazené na obrázku 20 jsem naměřil následující parametry soustavy (uvedeny v tabulce č. Tabulka 7). Vzhledem k počítačovému zpracování jsem použil metodu založenou na stejném principu, ale s analytickým přístupem, tedy že hledám místo, kdy signál dosáhne 63 % své ustálené hodnoty.

Hodnotu statického zesílení po ustálení přechodných dějů jsem určil jako podíl hodnoty ustálené výstupní veličiny ku hodnotě veličiny vstupní.

$$k_s = \frac{y(t)}{u(t)} = \frac{27,92}{0,491} = 56,8635 [-] \quad (2)$$

pro  $t \rightarrow \infty$

Naměřené hodnoty jsou zapsány do tabulky níže.

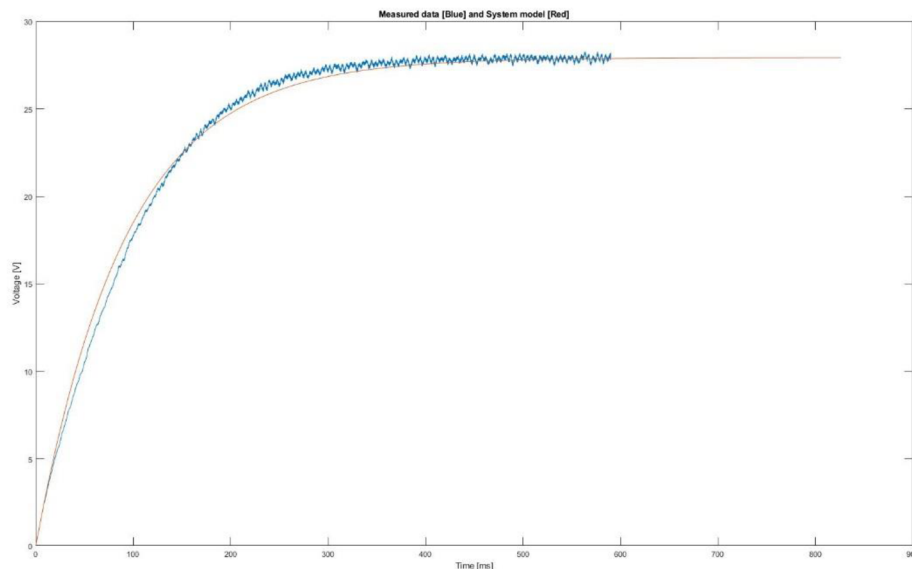
**Tabulka 7 - Naměřené parametry systému**

$k_s$ [-]	56,8635
$T$ [ms]	78,3 ms
$T_d$ [ms]	0 ms

Z naměřených parametrů jsem tedy sestavil přenos soustavy.

$$F_S(p) = \frac{k_s}{Tp + 1} = \frac{56,8635}{0,0783p + 1} \quad (3)$$

Tento systém jsem si nasimuloval v prostředí MATLAB a porovnal jej s naměřenými filtrovanými daty. Na základě zjištění diferencí jsem následně drobnými změnami model soustavy upravil tak, aby co nejvěrněji kopíroval naměřená data.



**Obrázek 22 - Měřený systém vs. korigovaný model**

Na základě experimentálního doladění byl určen výsledný model soustavy dynamy s následujícími parametry.

$$F_S(p) = \frac{k_s}{Tp + 1} = \frac{56,8635}{0,092p + 1} \quad (3)$$

Soustava je brána jako odezva na jednotkový skok, který je roven 0,491 A.

## 3.5 Návrh regulátoru

V momentě, kdy jsem měl identifikovaný systém, bylo možné přejít k návrhu regulátoru. K této činnosti jsem dále využíval prostředí programu MATLAB a jeho komponenty, programu Simulink.

K návrhu jsem vždy používal identifikovaný model spojitého systému uvedeného v rovnici č. (3).

Pro zjednodušení situace jsem nejprve začal s návrhem spojitého PID regulátoru. Vzhledem k charakteristice systému jsem si konkrétně vybral PI regulátor. Již dopředu jsem uvažoval použití diskrétního regulátoru a ačkoli předpokládanou periodou vzorkování mikrokontroleru, a tedy dobou mezi dvěma regulačními ději je perioda 10 ms, uvažoval jsem dopravní zpoždění spojitého systému jednu polovinu periody vzorkování.

Pro návrh spojitého regulátoru jsem tedy uvažoval systém:

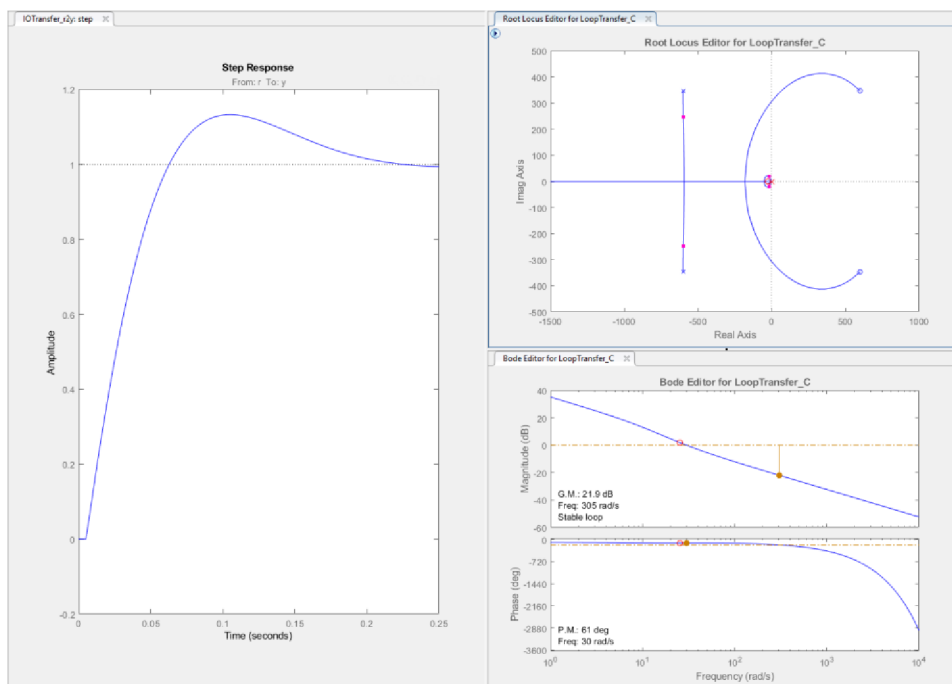
$$F_S(p) = \frac{k_s}{Tp + 1} e^{-T_d p} = \frac{56,8635}{0,0783p + 1} e^{-0,005p} \quad (4)$$

Tento přenos jsem následně použil pro návrh regulátoru pomocí aplikace „sisotool“ prostředí MATLAB.

### 3.5.1 Návrh prostřednictvím aplikace sisotool

Zvolil jsem základní postup, tedy umístění integrátoru, pólu do počátku kořenového hodografu, následně umístění nuly na pozici reálného pólu systému. Dopravní zpoždění jsem v této fázi nekompensoval.

Následně jsem přešel k úpravě zesílení tak, abych dosáhl optimální fázové bezpečnosti okolo 60°, která mi zajistí optimální rychlost přechodové charakteristiky a zároveň předejde kmitání soustavy.



**Obrázek 23 - Návrh PID regulátoru v prostředí Matlab SISOTool**

Výsledkem návrhu byl spojitý PI regulátor, jehož přenosovou funkci můžeme pospat následujícím zápisem ve standardním tvaru.

$$F_R(p) = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I p} + T_D p \right) = 0.0393 \left( 1 + \frac{1}{0.0393 p} \right) \quad (5)$$

Tento standardní tvar nám zapisuje jednotlivé složky v jejich časových konstantách. Pro použití v mikrokontroleru, a tedy k programovému zápisu PID regulátoru, je nutné převést regulátor do tzv. paralelního tvaru. Ukázka převodu je dohledatelná například zde [9].

Další možností převodu mezi jednotlivými tvary regulátorů je užití programu MATLAB a jeho funkce „pid(sys)“ pro převod do paralelního tvaru, či „pidstd(sys)“ pro převod do standardního tvaru zápisu regulátoru.

Regulátor navržený výše jsem si tedy převedl do paralelního tvaru, abych získal jeho zesílení a integrační konstantu, se kterými budu následně pracovat v dalších blocích programu simulink.

$$F_R(p) = K_P + \frac{K_I}{p} + K_D p = 0.0393 + \frac{1}{p}$$

$$\text{kde: } r_p = K_p; K_i = \frac{K_p}{T_I} ; K_D = K_p * T_D \quad (5)$$

$$K_p = 0.0393$$

$$K_i = 1$$

Právě  $K_p$  a  $K_i$  jsou konstanty užívané prostředím matlab pro zadávání parametrů regulátoru, stejně tak jsou to konstanty, které budu následně programovat do řídicího mikrokontroleru.



Z přechodové charakteristiky je viditelné, že se jedná o poměrně pomalý přechodový děj, vzhledem k limitům udaným v grafu (- Graf dovolených mezí přechodných a ustálených hodnot napětí dle AS8020Obrázek 7) v normě AS8020 [6].

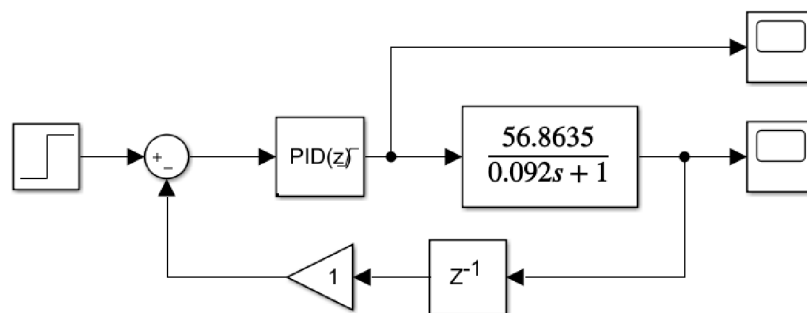
Avšak navrhnout ideální regulátor nebylo v této situaci mým cílem. Zde šlo pouze o návrh regulátoru, který bude dostatečně robustní a bude splňovat základní parametry, hlavně pak věrné sledování řízené veličiny bez kmitání.

Následným krokem bylo vytvoření modelu celého systému v prostředí MATLAB – Simulink, kde jsem pokračoval v optimalizaci, nyní již diskrétního regulátoru. Vzhledem k možnostem prostředí simulink, nebylo nutné provádět přepočty konstant regulátoru pro diskretizaci. Pro názornost uvádím níže jako rovnici 6. Diskretizace se provádí převedením časových konstant regulátoru, tedy vycházíme ze standardního tvaru přenosu PID regulátoru. [10]

$$F_R(z) = K_P \left( 1 + \frac{T_{vz} z^{-1}}{T_I (1 - z^{-1})} + \frac{T_D}{T_{vz}} (1 - z^{-1}) \right) \quad (6)$$

kde:  $T_{vz}$  je perioda vzorkování diskrétního regulátoru

Máme tedy základní regulátor ve spojitě formě a vypočetl jsem si jeho zesílení a integrační konstantu. Spolu s periodou vzorkování definovanou na 0,10 s., to jsou postačující informace pro definování diskrétního PSD regulátoru a jeho zkoušku v prostředí MATLAB Simulink. Na obrázku dále je viditelný simulační obvod, který sloužil k prvním pokusům, jedná se o věrnou kopii reálného zapojení. Z hlediska časové jsem provedl nastavení vzorkovací periody simulace simulinku na fixní krok s periodou desetinásobně vyšší, než je perioda vzorkování PS regulátoru, tedy na 0,001 s. Takové nastavení by mělo pomoci se simulací spojitěho systému dynamika a diskrétního systému regulátoru.



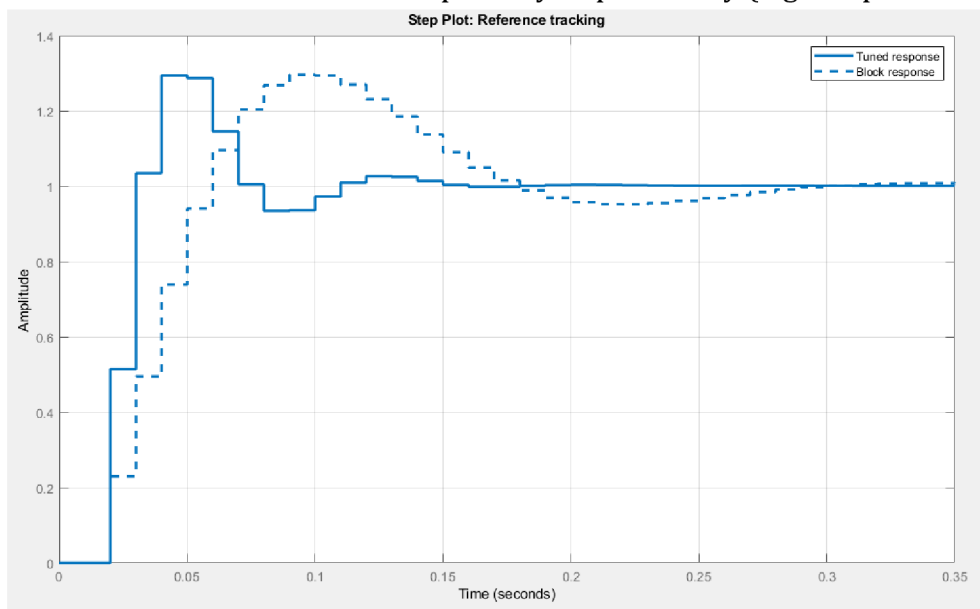
Obrázek 24 - Základní regulační schéma

Do bloku PID(z) jsem zadal regulační konstanty, které jsem získal z programu sisotool a časovou konstantu  $T_{vz}$ , kterou jsem určil na základě testování výkonosti mikrokontroleru. Posledním parametrem tohoto bloku bylo zadání oblastí saturace výstupu, které jsem určil na interval  $\langle 0; 0,95 \rangle$  tak, aby odpovídaly realitě.

### 3.5.2 Ladění regulátoru v aplikaci PID Tuner

Na sestavě v simulinku jsem následně provedl ladění, nyní již PS regulátoru, a to pomocí aplikace „PID Tuner“, která snadno umožňuje měnit parametry regulátoru a živě tak sledovat predikci odezvy systému na jednotkový skok. Vzhledem k tomu, že parametry regulace jsou definovány normou, měl jsem jasný cíl, jakým způsobem upravit nastavení tak, aby křivka přechodu regulačního děje měla co nejlepší parametry s ohledem na splnění požadavku normy. Jak je vidět na obrázku (Obrázek 7), je hlavním parametrem doba ustálení řízené veličiny (150 ms) a také míra překmitu v různých časových úsecích.

Provedl jsem tedy úpravu přechodové charakteristiky pro rychlejší náběh a rozumnou míru překmitu. Prostředí pro ladění regulátoru je viditelné na obrázku níže, dále je také pozorovatelný rozdíl mezi původní (pomalou, v grafu čárkovaně) charakteristikou a charakteristikou s upravenými parametry (v grafu plnou čarou).



Obrázek 25 - ladění PS regulátoru v prostředí MATLAB

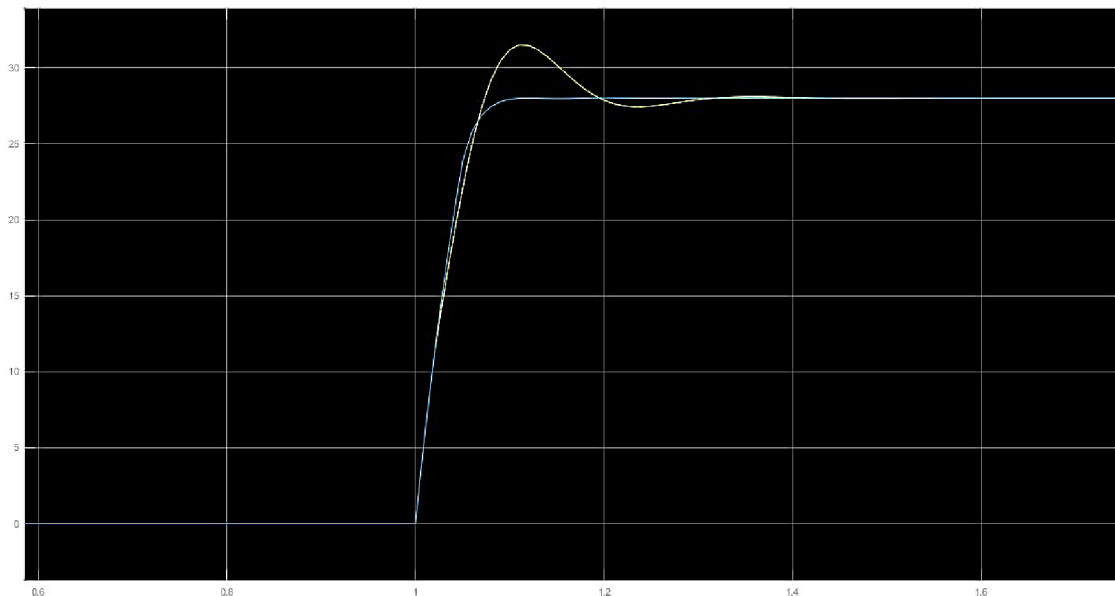
Po provedení změn se však ukázalo, že výsledek zcela neodpovídá předpovědi (i v rámci simulace) a bylo tak třeba provést ladění v několika krocích. Nejlepších výsledků (i v reálné soustavě) jsem nakonec dosahoval při nastavení, které se prostředí programu MATLAB PID Tuner jako soustava s velmi významným překmitem, v simulaci tomu ale již tak nebylo a praktické pokusy to potvrdily.

V programu jsem tedy upravil parametry PS regulátoru na následující přenos.

$$F_r(z) = K_r + \frac{K_I * T_{vz}}{z-1} = 0.09 + \frac{3 * 0.01}{z-1} \quad (7)$$

$$T_{vz} = 0,01 \text{ s}$$

Na obrázku níže je porovnání systému řízeného regulátorem navrženým v prostředí sisotool, tedy našeho výchozího regulátoru (zobrazeného žlutě) a dále systému s regulátorem odladěným pomocí manuálního nastavení parametrů v programu PID Tuner (na obrázku zobrazeno modře).



**Obrázek 26 - porovnání přechodových charakteristik výchozího nastavení a odladěného regulátoru**

Lze zde pozorovat poměrně významné rozdíly mezi tím, co nám predikuje aplikace PID Tuner a realitou (byť jen v simulaci). Bylo tedy nutné provádět pouze drobné úpravy nastavení regulátoru a ty okamžitě ověřovat simulací.

Postupnou prací se mi podařilo odladit regulátor pro velmi rychlý náběh a ustálení s časovou rezervou oproti limitům udávaným normou.

Dalším bodem, ke kterému jsem prostředí simulink využil, byla kontrola odezvy regulátoru na různé poruchy vstupující do řízeného systému.

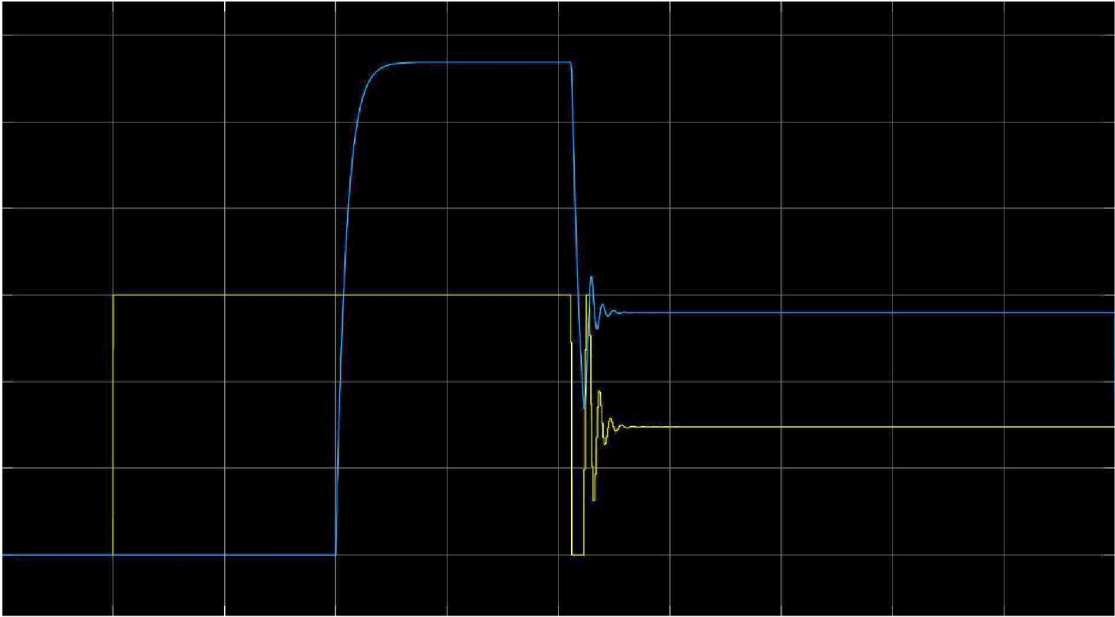
### 3.5.3 Wind Up jev

Jedním z prvních poruch, které jsem testoval, byla správná funkce antiwind up metody použité v mém návrhu. Vzhledem k tomu, že regulátor bude následně programován do mikrokontroleru prostřednictvím programovacího jazyka, a také díky charakteristice soustavy, se mi jevilo užití metody „Clamping“ jako prostředku zabránění Wind Up jevu jako zcela dostačující. Praktické pokusy tuto domněnku potvrdily.

Wind Up jev by se u této soustavy v reálném použití projevil například při následující situaci. Pilot usedne do letadla, dle postupu zapne baterii, generátor, motorové a letové přístroje a přechází ke spouštění motoru. V této situaci ale regulátor již běží a budí generátor maximálním proudem bez toho, aby generátor

zvýšil napětí v palubní síti. To vše, protože motor ještě není spuštěn a generátor se tak nenachází v provozních otáčkách.

Průběh takové situace jsem simuloval pomocí bloku podmíněného přepnutí, kde požadavek na žádanou hodnotu přejde v 1. vteřině simulace, ale obvod buzení je s generátorem spojen až ve 3. vteřině. Principiálně se jedná o stejnou situaci jako by byl úsekový spínač generátoru spuštěn v 1. vteřině simulace a ke spuštění motoru by došlo ve 3. vteřině. Žlutá linie je průběh akčního zásahu, který byl pro přehlednost zesílen na rozsah  $<0;30>$ .



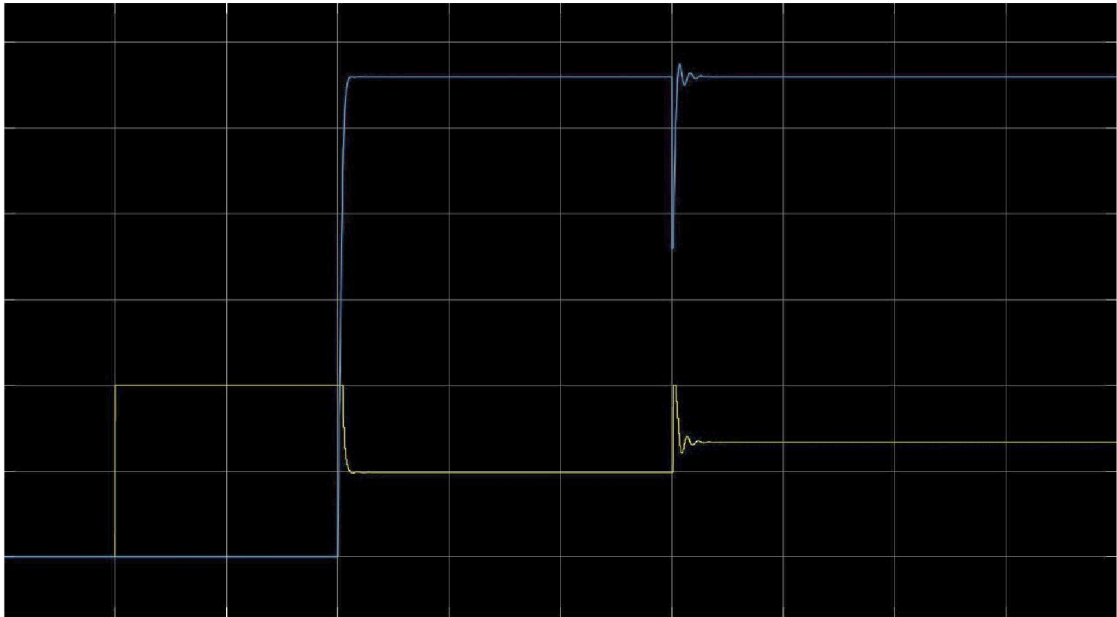
Obrázek 27 - Wind Up jev, akční zásah (žlutá) zesílen

Na obrázku 27 lze pozorovat vliv přesycení sumační složky regulátoru a tím vznik wind up jevu.

### 3.5.4 Odezva na vliv poruchy

Další situací, kterou jsem simuloval v prostředí MATLAB, a která se také zcela normálně vyskytuje v reálném provozu navrhovaného zařízení, je odezva na vliv poruchy působící na řízenou veličinu. V reálu se nejčastěji jedná o vliv připojení zátěže do systému, která způsobí zvýšení odběru proudu a tím pokles napětí (pokud nedojde ke kompenzaci). V mém případě jsem použil bloku jednotkového skoku o velikosti -10 V, který v 6. vteřině začne působit na výstup systému. Regulátor jej následně vyreguluje na požadovanou hodnotu výstupního napětí.

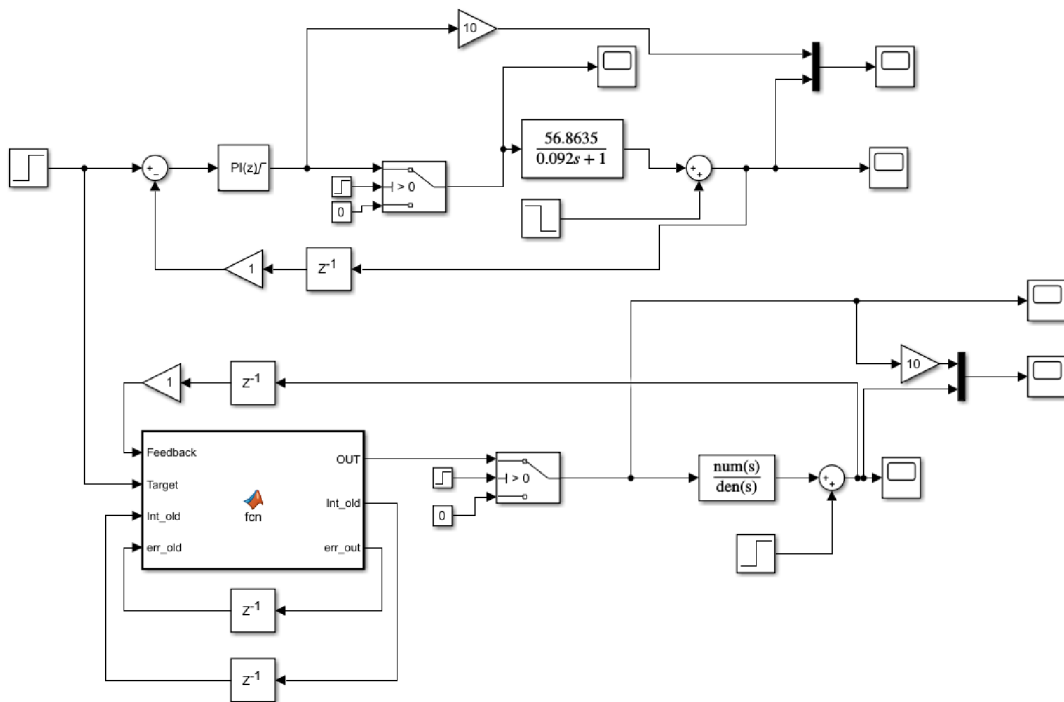
Na obrázku 28 je tedy pozorovatelný vliv zamezení wind up jevu ve 3. vteřině a následně korekce působení poruchy na výstup soustavy v 6. vteřině. Opět je do grafu promítnuta i akční veličina, která je pro přehlednost 10× zvětšena.



Obrázek 28 - reakce regulátoru na vliv chyb

### 3.5.5 Ověření funkčnosti navrženého regulátoru

Posledním bodem, který jsem si v prostředí simulink ověřil, byla funkčnost PS regulátoru. Nyní ale bez využití bloků simulačního programu. Jednalo se o prosté ověření funkčnosti kódu, který jsem chtěl odladit na simulaci, aby při konverzi na mikrokontroler docházelo k co možná nejmenším komplikacím.



Obrázek 29 - Model vytvořený v prostředí MATLAB Simulink

## 3.6 Funkce mikrokontroleru

Výše byly veškeré stěžejní funkce mikrokontroleru již popsány, v následující kapitole se tedy budu věnovat hlavně problematice časování stěžejních funkcí mikrokontroleru a dalším činnostem spojeným s regulačním dějem zařízení.

### 3.6.1 Vzorkování signálu

Vzhledem k obecně známému faktu, tedy že čím lepší zdrojová data, tím lepší výsledek regulace, jsem se soustředil v prvotní fázi hlavně na snímání řízené veličiny, tedy napětí palubní sítě.

Při pohledu na data získaná z osciloskopu při měření původní sestavy, bylo zřejmé, že největším problémem celé regulace bude značný šum. Tento nežádoucí jev má mnoho původců. V našem případě je asi nejvýznamnějším působitelem šumu v palubní síti uhlíkový sběrač na komutátor. Jak bylo výše zmíněno, opotřebením uhlíků může vznikat šum, který znemožňuje analytické měření systému.

Při samotné identifikaci systému jsem si ověřil, že velice dobře funguje filtrování dat metodou klouzavého průměru, proto jsem se rozhodl pro použití této metody i pro filtraci dat v mikrokontroleru.

Systém by nebylo možné regulovat kvalitně, kdybychom načítali vstupní signál pouze v okamžicích regulačního děje. Pokud bychom ještě přidali průměrování těchto hodnot, byly by výsledky díky vzniklému dopravnímu zpoždění více než neuspokojivé a byla by ohrožena stabilita celého systému.

Vzhledem k poměrně vysokému výkonu zařízení STM32, jsem se rozhodl pro takové rozdělení programu, kde v hlavní smyčce je cyklicky volána pouze funkce pro průměrování vstupního signálu. Program obsahuje pole o volitelné délce (v mém případě o délce 32 pozic), do kterého se zapisují naměřené hodnoty. Při každém zavolání funkce program posune hodnoty v poli o jednu (tedy, že poslední zahodí) a následně provede načtení hodnoty z analogového vstupu a zapíše tuto hodnotu na 1. pozici v poli. Jak bylo zmíněno, je nejvyšší prioritou, aby program načel co nejvíce hodnot mezi jednotlivými vzorky, aby bylo možné vytvářet průměr z dostatku hodnot, abychom jednak filtrovali šum, ale také abychom nezpůsobovali dopravní zpoždění. To by vznikalo, kdybychom začali průměrovat z dat starších, než jedna perioda regulačního děje (10 ms v našem případě).

Pro splnění výše definovaných kritérií jsem se rozhodl ve funkci pro sběr dat z analogového vstupu provádět pouze načítání a záznam dat. Veškeré přepočty a normalizace jsou prováděny až když přijde dotaz na aktuální hodnotu napětí. Pole hodnot, určené pro průměrování vstupních dat, tedy vždy obsahuje posledních  $n$  hodnot čtených z analogového vstupu v původním formátu.

Normalizace vstupních dat je prováděna v momentě, kdy je v programu volána funkce pro vytvoření vzorku vstupního napětí. Tato funkce tedy provede

průběh z n hodnot uložených v poli, a z výsledku provede normalizaci. Tedy úpravu signálu z rozsahu:

$$U_{IN} = \langle 0; 3,3 \rangle V \quad (8)$$

na rozsah odpovídající vstupnímu napětí. Tento převod je definovaný na základě užitého napětového děliče pro úpravu napětí. V našem případě je dělicí poměr 1:13.

$$U_{IN'} = \langle 0; 42,9 \rangle V \quad (9)$$

Samozřejmostí je nutnost převodu z 16bitového čísla na základní napětový rozsah. 16bitové číslo je dané programovacím prostředím.

$$U_{Read} = \frac{U_{RAW}}{2^{16}} * 3,3 [V] \quad (10)$$

Zařízení disponující analogově digitálním převodníkem s rozlišením 12 bitů tedy disponuje následujícím rozlišením.

$$U_{res} = \frac{U_{MAX}}{2^{12}} = \frac{42,9}{4096} \doteq 0,0105 V \quad (10)$$

Z praktického hlediska však musíme uvažovat vliv šumu, který teoretickou hodnotu rozlišení A/D převodníku snižuje.

Při provedení prvních pokusů s regulací jsem natrefil na určité náhodné zakolísání systému. Takové rušivé zákmity vstupovaly do systému v poměrně pravidelném intervalu, ale způsobovaly poměrně významné odchylky regulované veličiny od požadované hodnoty. Vzhledem k periodičnosti děje (periodičnost byla určena pouze kvalifikovaným odhadem) jsem usoudil, že možnou příčinou může být právě má snaha o maximální vzorkování vstupního signálu. Funkci jsem cíleně neprogramoval jako synchronní, ale nechal ji běžet tak, aby využívala maximum volného strojového času. Tím jsem však mohl způsobit konflikt více funkcí v určitém čase a tím i zákmit systému vlivem nedokonalé regulace.

Na základě této úvahy jsem tedy provedl úpravu vzorkovací funkce na synchronní provádění. S využitím čítače tedy cyklicky kontroluji, zda uplynulo 250 us, a pokud je tato funkce splněna, provádím resetování čítače a načtení vzorku pro jeho uložení v poli hodnot. Nulování čítače je první příkaz vykonaný po splnění podmínky - po uplynutí stanovené doby, a tedy snaha o co nejpřesnější dodržení jednotlivých časových rámců. Synchronizace vzorkování vstupního napětí dovoluje provést 40 vzorkovacích cyklů mezi jednotlivými regulačními ději.

Po provedení synchronizace již nedocházelo k náhodným zákmitům a regulace byla velmi uspokojivá.

### 3.6.2 Výstupní řídicí signál

Výstup mikrokontroleru je proveden pomocí pulzně šířkové modulace, velikost akčního zásahu je tak řízena pomocí střídy výstupního signálu.

Frekvence výstupního signálu jsem zvolil 10 kHz. Jednak se jedná o frekvenci dostatečně vysokou pro řízení zátěže pomocí PWM a MOSFET tranzistoru a také byla zvolena cíleně s ohledem na rušení.

Frekvence 10 kHz je složkou vyšší harmonické signálu o frekvenci 400 Hz, tento signál se obvykle v letadlech vyskytuje (v napájecích obvodech) a je tedy předpoklad zvýšené odolnosti vůči rušení.

### 3.6.3 Regulační děj

V momentě, kdy máme přesné hodnoty napětí palubní sítě, tedy hodnotu regulované veličiny, můžeme započít výpočet akčního zásahu na základě dříve určených regulačních konstant PS regulátoru.

Tento děj probíhá cyklicky a synchronně. Vždy je volán po uplynutí vzorkovací periody regulačního cyklu, tedy jednou za 10 ms.

Opět je zde použit mechanismus podobný jako výše, tedy že nejprve dochází k resetování časovače a až následně provádět další kroky, neboť nejdůležitějším bodem je zde co nejlépe zachovávat periody mezi jednotlivými kroky regulace.

V hlavní programové smyčce je tedy opět podmínka, která cyklicky ověřuje, zda již uplynula doba periody vzorkovacího cyklu. Pokud je splněna, dojde k resetování čítače a k zavolání funkce regulátoru. Tato funkce následně volá funkci pro provedení vzorkovacího cyklu k získání vyfiltrované hodnoty napětí. Princip této funkce je popsán výše v bodě 3.6.1.

Dalším krokem funkce regulátoru je výpočet chybových konstant, tedy výpočet absolutní odchylky regulace (`err`) a sumační chyby (`int_err`). Obě tyto proměnné jsou provedeny jako globální, protože je nutný jejich přenos mezi jednotlivými regulačními ději.

Jamile máme vypočítány jednotlivé odchylky dané na základě aktuálních dat, můžeme provést výpočet nového akčního zásahu na dle rovnice PS regulátoru.

$$OUT = K_p * err + (K_I * int_{err} * dt)$$

kde:

$K_p = 0,095$  je konstanta zesílení PS regulátoru

$K_I = 3$  je Sumační konstanta PS regulátoru (11)

$dt = 0,01$  s je perioda vzorkování regulátoru

a

$OUT$  je akční zásah regulátoru



Vzhledem k omezenému akčnímu zásahu danému vlastnostmi mikrokontroleru (výstupem je hodnota odpovídající střídě pulzně šířkové modulace na intervalu  $(0; 1)$ ) a konstrukčními vlastnostmi samotného driveru je třeba provést kontrolu a případné omezení výstupního signálu.

Řídicí člen, který ovládá samotný MOSFET tranzistor řídicí velikost proudu jdoucího do budícího obvodu generátoru, není schopen operovat na maximální hodnotě střídý. Tento jev je dán nutností nabíjení kondenzátoru na výstupu High Side driveru pro MOSFET. Tento kondenzátor je nabíjen z výstupu „Source“ MOSFET driveru a umožňuje řízení takového tranzistoru z napětí na logické úrovni. Delší působení 100 % střídý signálu by způsobilo otevření tranzistoru na maximum, a absence střídání vysoké a nízké úrovně na jeho výstupu (100 % střídý řídicího signálu pulzně šířkové modulace znamená signál trvale v logické 1) způsobí vybití kondenzátoru a tím padnutí řídicího signálu na výstupu driveru, čímž dojde k vyřazení driveru z činnosti a pád signálu do logické 0, tedy i uzavření tranzistoru.

Z výše popsaných důvodů nám do systému vstupuje další omezení akčního zásahu, a to na interval  $(0; 0,95)$ .

Omezení je třeba následně zakomponovat do řídicí funkce. To je provedeno jednoduše pomocí série podmínek kontrolujících velikost akčního zásahu. Pokud je tato hodnota v mezích intervalu, je následně zapsána na výstupní pin. Pokud je nad limit výše definovaného intervalu, je na výstupní pin zapsána hodnota 0,95, tedy maximální hodnota z omezujícího intervalu. Naopak pokud je hodnota nižší, je na výstupní pin zapsána hodnota nulové střídý.

Dalším mechanismem regulátoru je omezení wind up jevu. Výše bylo definováno užití anti wind up metody známe jako „clamping“. Tato metoda byla také naprogramována do omezujících podmínek.

Pokud je splněna jedna z podmínek omezení akčního zásahu, provede se pouze převod sumační chyby z minulého děje do děje následného. Nedochozí tedy ke změně sumační chyby a nemůže tak dojít k jejímu přesycení.

### **3.6.4 Analýza přechodových dějů navrženého regulátoru**

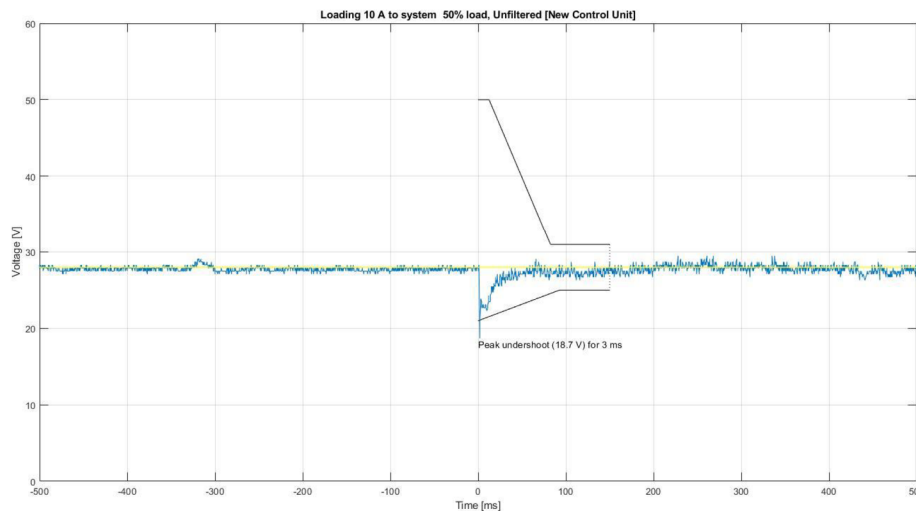
Výsledkem analýzy původního řešení, modelového návrhu regulátoru a následné implementace navržených konstant do navrženého hardware, je ucelené řešení. Na začátku této diplomové práce byly definovány limity přechodných dějů, požadavky a další náležitosti spojené s designem nového řešení.

Pro porovnání jsem v kapitole 3.4.2 definoval několik kontrolních nastavení, které následně budu porovnávat. V této kapitole postupně budou zobrazeny průběhy odezev regulované soustavy na vliv chyb vstupujících do soustavy. Tyto

chyby jsou ve formě skokové změny zátěže generátoru udávané v jednotkách proudu [A]. Hodnoty těchto proudu byly definovány tak, aby bylo možné exaktní porovnání původního a nového řešení.

Ve všech grafech jsou definovány limity přechodných dějů dle normy SAE AS8020 [6]. Všechny pokusy byly prováděny při otáčkách dynama rovnajících se středu jejich pracovního rozsahu.

### 3.6.4.1 Odezva řízené veličiny na skokovou změnu zátěže – připojení 10 A zátěže.



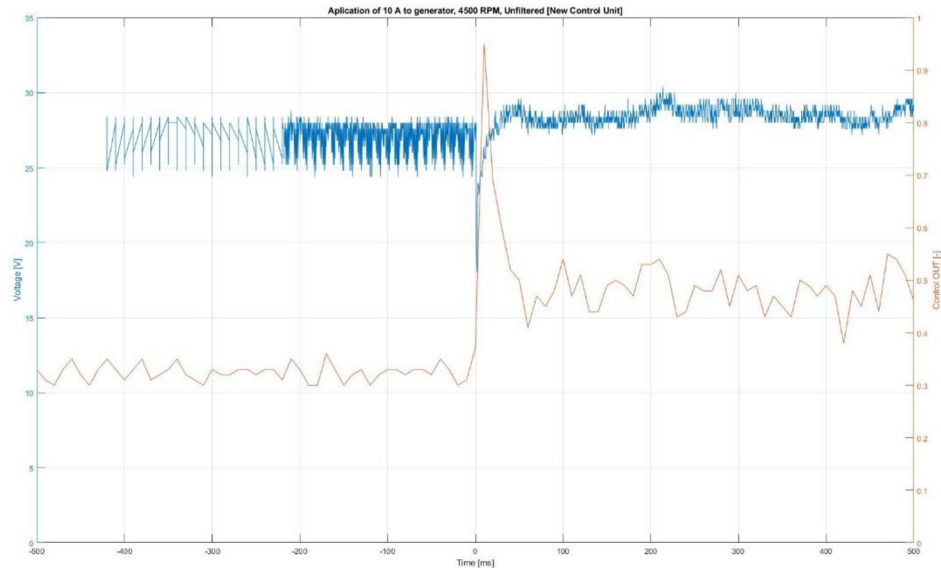
Obrázek 30 - Nový Regulátor, odezva na připojení 10A zátěže

Na obrázku 30 je pozorovatelný regulační jev při připojení zátěže o jmenovité hodnotě 50 % maximálního výkonu generátoru. V prvotní fázi je pozorovatelný podkmit výstupního napětí na 18,7 V, tento podkmit trvá 3ms. To znamená, že jeho trvání je minimální a vzhledem ke vzorkovací frekvenci, není regulátor schopen tak rychle zasáhnout. V reálném systému by do obvodu byl, namísto laboratorního zdroje, zapojen akumulátor, který by takové sokové výkyvy vykryl. Můžeme tedy prohlásit, že regulátor v této části testu splňuje podmínky kladené normou. Můžeme dále prohlásit, že je schopen činnosti právě i bez zapojeného akumulátoru (například při jeho poruše).

Dalším zajímavým poznatkem je významný útlum šumu v ustálených stavech oproti původnímu řešení. Pro porovnání může sloužit záznam přechodového děje původního regulátoru (Obrázek 18 - Připojení zátěže o velikosti 10 A).

Na obrázku 31 je vyobrazen průběh stejného přechodového děje (za stejných podmínek), avšak do grafu je proložen i průběh akční veličiny. Tento graf je třeba brát s rezervou, či jako ilustrativní, neboť záznam průběhu akční veličiny byl zaznamenáván prostřednictvím samotného mikrokontroleru a vzhledem

k nedostatku času jsem nedokázal dostatečně optimalizovat tento kód, regulační děj je tedy horší. Pravděpodobně je to způsobeno nedodržením pevných časů mezi jednotlivými vzorky.

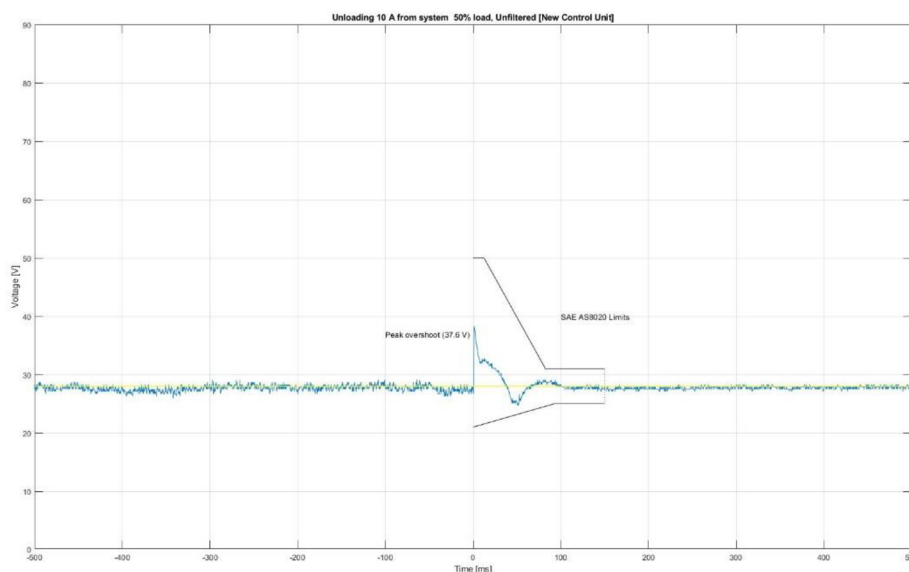


**Obrázek 31 - Nový Regulátor, odezva na připojení 10A zátěže, průběh regulačního děje**

Na obrázku č.31 je modře vyznačen průběh napětí soustavy, červeně pak průběh akčního zásahu regulátoru. Je třeba ale vzít v úvahu, že průběh akčního zásahu je načten přímo z mikrokontroleru. V reálné soustavě je na výstupu programu tvarovač nultého řádu, který tuto hodnotu vždy drží po dobu jedné periody regulačního děje.

Vzhledem k tomu, že výstup je pulzně šířková modulace o frekvenci 10 kHz, rozhodl jsem se pro výše popsany přístup. Zobrazení pomocí osciloskopu by bylo, vzhledem k časovým konstantám systému, nepřehledné.

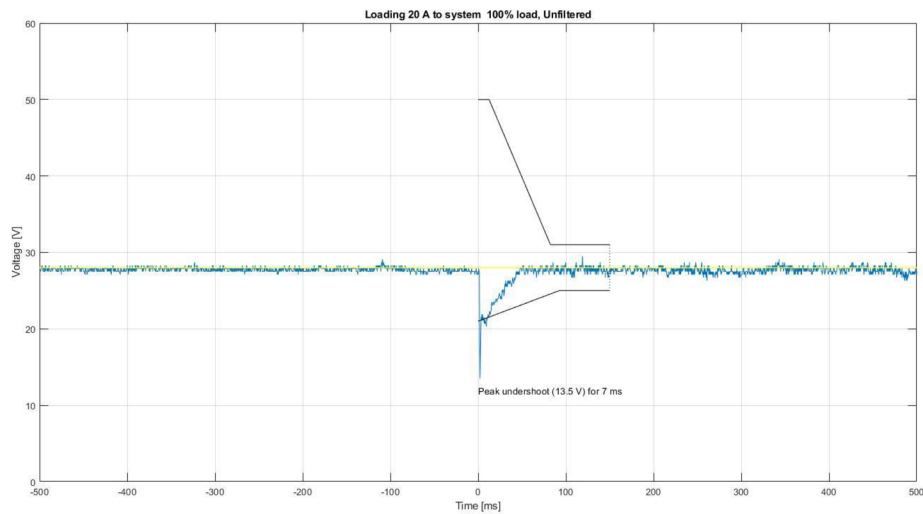
### 3.6.4.2 Odezva řízené veličiny na skokovou změnu zátěže – odpojení 10 A zátěže



**Obrázek 32 - Nový Regulátor, odezva na odpojení 10A zátěže**

Na obrázku 32 je vidět průběh modelové situace, kdy skokově odepneme zátěž o velikosti 50 % maximálního výkonu. Z grafu je patrný průběh regulačního děje, který v tomto případě i bez setrvačného článku ve formě akumulátoru v soustavě, dokázal splnit limity. Opět se vyskytnula napěťová špička, která bude vyhlazena právě akumulátorem v sestavě, protože regulátor není schopen takovým špičkám, vzhledem k jeho vzorkovací frekvenci, zamezit. Opět je pozorovatelný značný úbytek šumu řídicí veličiny, a lze tedy předpokládat, že zatímco u původního řešení byl šum působen z velké části právě regulátorem, zde se jedná o šum vznikající na mechanických styčných bodech zařízení (uhlíkové sběrače komutátoru).

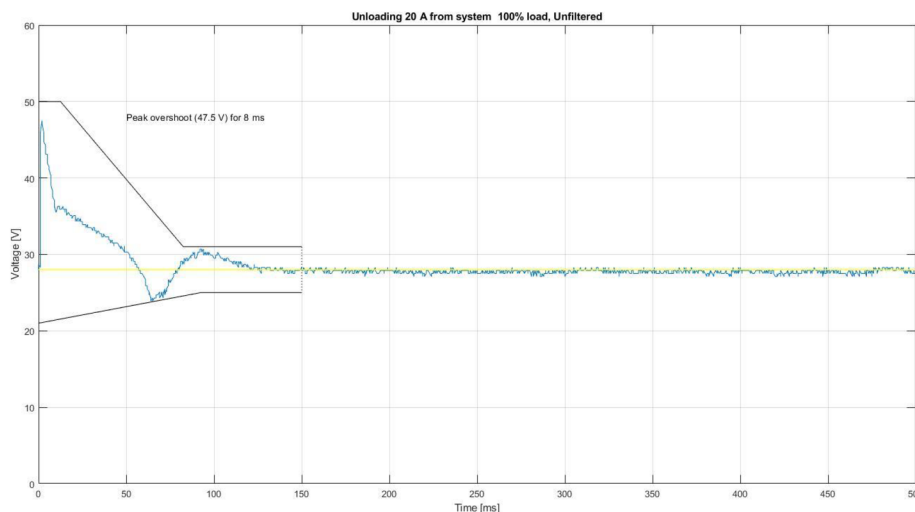
### 3.6.4.3 Odezva řízené veličiny na skokovou změnu zátěže – připojení 20 A zátěže



Obrázek 33 - Nový Regulátor, odezva na připojení 20A zátěže

V této situaci opakujeme postup z bodu 3.6.4.1, avšak se 100 % zátěží. Průběh je zcela podobný průběhům v bodech výše. Opět je znatelný podkmit řízené veličiny, opět je to na dobu dostatečně nízkou, aby jej regulátor nedokázal kompenzovat ihned při jejím vzniku. Ke kompenzaci ale dochází následným vystavením maximálního akčního zásahu. V grafu je následně pozorovatelný náběh na cílovou hodnotu. Napětí je ustáleno za přibližně 50 ms, což je třetina limitního času.

### 3.6.4.4 Odezva řízené veličiny na skokovou změnu zátěže – odpojení 20 A zátěže



Obrázek 34 - Nový Regulátor, odezva na odpojení 20A zátěže

Přechodová charakteristika opět potvrzuje splnění limitů (zde i bez nutnosti akumulátoru jako setrvačného článku). Je zde tedy potvrzeno, že regulátor je možné v případě nouze použít pro přímé napájení elektronického systému v letadle. Opět je velmi znatelný útlum šumu oproti situaci vyobrazené v grafu (Obrázek 15).

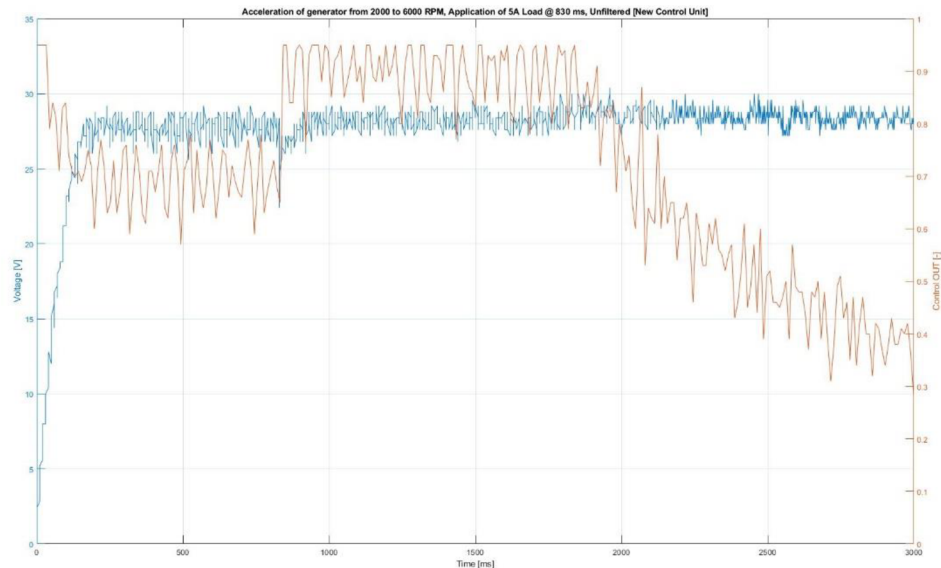
### 3.6.5 Analýza dalších vlastností regulátoru

V průběhu testování zařízení jsem pozoroval i další vlastnosti soustavy. Například původní reléové zařízení se stykačem pro zamezení zpětného proudu, připnulo dynamo do systému letadla až při přibližně 1700–1800 ot.min<sup>-1</sup> na hřídeli motoru. Tyto otáčky odpovídají velmi zvýšenému volnoběhu, otáčky dynama jsou v tu chvíli přibližně 3650 až 3850 ot.min<sup>-1</sup>. To znamená, že pokud posádka chtěla zapojit například základní navigační přístroje, musela spoléhat na palubní akumulátor. Pro situaci, kdy má letadlo studený motor (například v zimních měsících), je třeba motor nejdříve zahřát. Obvyklá procedura je začít ohřívání na 1000 až 1100 otáčkách motoru. Jakmile teplota (a tedy i tlak) olejové soustavy dovolí, může pilot postupně zvyšovat otáčky na 1500 ot.min<sup>-1</sup>, kdy ohřívá motor na provozní otáčky. V takové situaci není dynamo připojeno a nedodává žádnou energii.

Takovou situaci jsem proto testoval na zkušební sestavě spolu s mnou navrženým regulátorem. Díky tomu, že regulátor nemá odpínací relé, ale zpětný proud je limitován polovodičovou diodou, může dodávat energii ihned v momentě, kdy nějakou vyprodukuje. Tomu také napomáhá to, že generátor je neustále plně buzen, dokud není dosaženo kýžené hodnoty napětí a neprobíhá standardní regulační děj.

V praxi to znamená, že pokud je v letadle nominální odběr 5 A a posádka spustí motor, tak již při 3000 ot.min<sup>-1</sup> je dynamo schopno dodávat do systému 4 až 5 A, byť ještě nedokáže zvýšit napětí na nominální hodnotu. Takové otáčky na hřídeli dynama odpovídají otáčkám motoru přibližně 1400 ot.min<sup>-1</sup>, což je markantní rozdíl z uživatelského hlediska. V neposlední řadě to také znamená, že využíváme plného technického potenciálu zařízení.

V následujícím grafu pro zajímavost uvádím průběh napětí na generátoru a průběh akční veličiny pro situaci, kdy je generátor postupně akcelerován z 2000 ot.min<sup>-1</sup> na 6000 ot.min<sup>-1</sup>. Dynamu je také připojena zátěž 5A. V průběhu lze pozorovat maximální vybuzení generátoru díky kombinaci působící zátěže a nízkých otáček. Jakmile se otáčky zvyšují, snižuje se úroveň buzení generátoru při zachování kýžené výstupní veličiny. Tento trend také potvrzuje správnou funkci všech složek regulátoru (antiwind-up v počátku, korekce změn v průběhu).

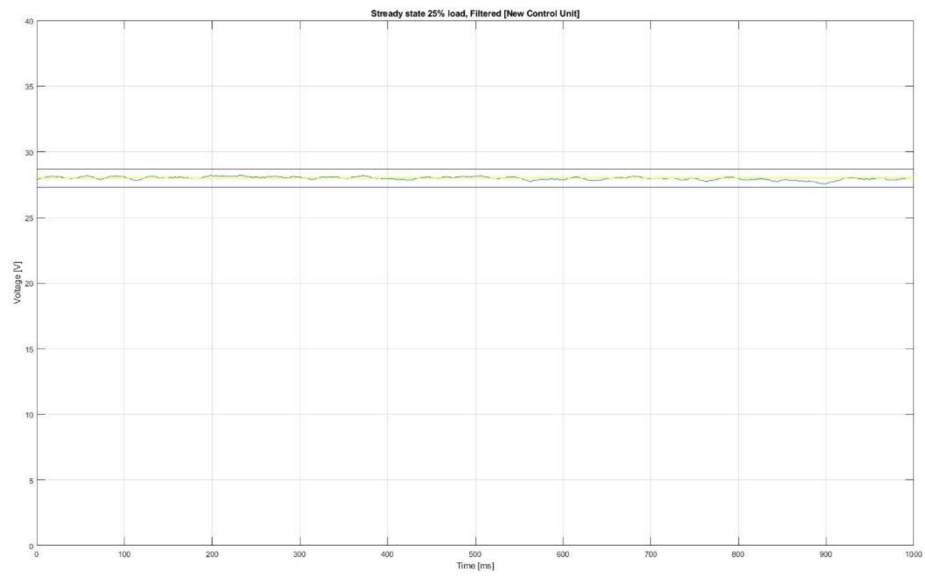


**Obrázek 35 - Akcelerace generátoru**

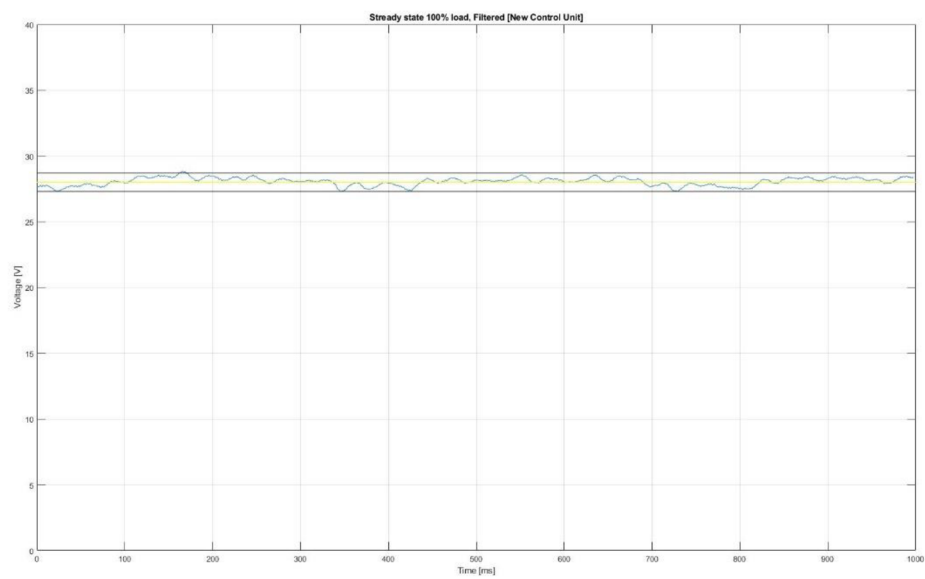
V průběhu testů byly také testovány limitní stavy regulátoru, tedy nadproud a přepětí, regulátor vždy korektně zareagoval krátkodobým odpojením buzení po dobu 250ms.

Posledním prováděným testem byla analýza průběhu napětí v ustáleném stavu. Norma SAE AS8020 definuje požadavky na ustálený jev regulačního děje, které jsem popisoval v bodě 2.5.1.2.

Na grafu níže je vyobrazen průběh pro 25 % a 100 % zátěž, průběh napětí je v limitech (vyznačeny černými liniemi), avšak není zcela hladký. Chybu zde přisuzuji nižší kvalitě A/D převodníku. V další verzi bych se chtěl zaměřit právě na řešení problematiky snímání řízené veličiny. Další průběhy jsou uvedeny v příloze.



**Obrázek 36 - Průběh ustálené výstupní veličiny při 25 % zátěže**



**Obrázek 37 - Průběh ustálené výstupní veličiny při 100 % zátěže**

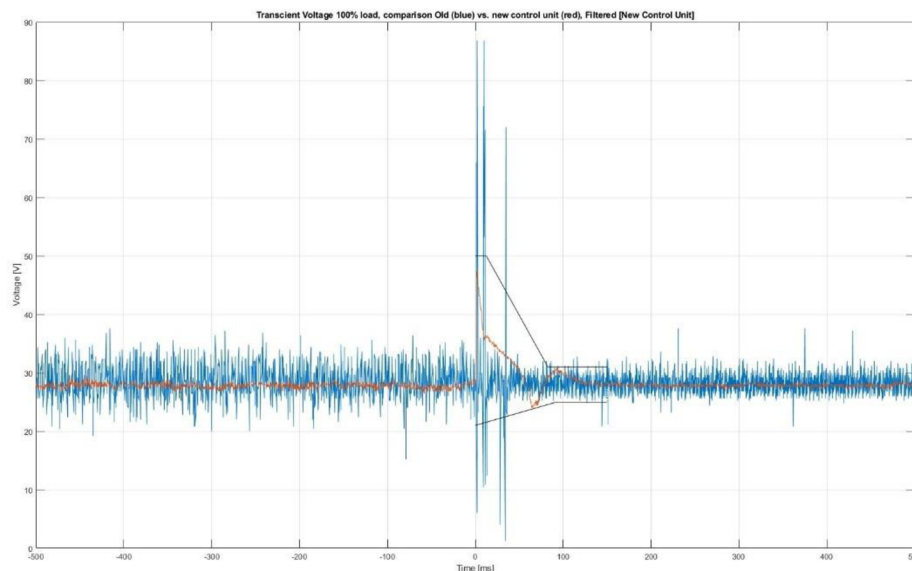


## 3.7 Zhodnocení

### 3.7.1 Porovnání vlastností regulátorů

V odstavcích výše jsou vyobrazeny průběhy a charakteristiky jednotlivých regulačních dějů v daných modelových situacích, které odpovídají zadání v normě SAE AS8020.

Na první pohled je vidět značný posun v průběhu charakteristik s užitím mnou navrženého regulátoru. Hlavním aspektem, na který jsem upozorňoval výše, je významný úbytek šumu v signálu výstupní veličiny. Tento šum jsem nejprve přisuzoval pouze uhlíkovým sběračům na komutátoru dynamu. Ukázalo se ale, že svou část na šumu nesl samotný reléový regulátor LUN 2141.



**Obrázek 38 - Porovnání přechodového děje původního a nového regulátoru**

Z obrázku č.38 je také patrné, že původní regulátor, na rozdíl od mého řešení, nesplňoval podmínku přechodných jevů, ani podmínku ustáleného napětí. Což ale není překvapivé, neboť norma definující tyto podmínky přišla přibližně o 30 let později než regulátor dynamu LUN 2141.

Obecně se dá říct, že s novým regulátorem jsem dokázal využít celého potenciálu generátoru, zvláště pak v oblasti nízkých otáček motoru letadla, kdy se mi podařilo posunout práh o přibližně 400 ot.min<sup>-1</sup> níže. Takové snížení přispěje ke komfortu posádky a předejde nadměrné zátěži palubního akumulátoru při přípravách před samotným letem.

Dalším zlepšením, kterého bylo dosaženo implementací nového zařízení, je významné snížení šumu v palubní síti a také omezení napěťových špiček. Tato

vlastnost dovoluje použití zařízení pro přímé napájení spotřebičů (případně i provoz bez zátěže) například při poruše akumulátoru. Regulátor tak potřebuje pouze prvotní impuls o velikosti přibližně 10 až 11 V pro spuštění regulačního děje (zvláště jde o driver tranzistoru), poté se již pracuje soběstačně.

Z konstrukčního hlediska můžeme prohlásit, že došlo k více než poloviční úspoře hmotnosti. Zařízení je navrženo, aby bylo mechanicky a elektricky zcela kompatibilní s původním řešením. To znamená, že byl navržen regulátor, který je samostatně stojící jednotkou, která se dá snadno vyměnit za původní zařízení. To vše bez nutnosti mechanických a elektrických úprav. Takto vlastnost byla podmínkou kladenou na vývoj takového zařízení.

Z hlediska předpisové základny nový regulátor splňuje podmínky dané normou, zvláště ty popisující chování zařízení v ustáleném stavu a při přechodných dějích.

Další testy zařízení, hlavně pak z hlediska vlivu prostředí a vytrvalosti, jsou předmětem další práce.

### 3.7.2 Finanční zhodnocení

Vzhledem k faktu, že na zařízení je třeba ještě pokračovat ve vývoji některých okrajových vlastností, je nákladová cena pouze odhadová. Avšak je možné kvalifikovaným odhadem dospět k poměrně přesným číslům.

Díl	Cena za kus [USD]	Počet	Celkem [USD]
Výkonová deska	49,6	1	49,6
Řídicí deska	24,8	2	49,6
Montážní krabice	520,0	1	520
Celková částka za materiál			619,2

Celková nákladová cena za prototypový kus je tedy přibližně 620 USD bez DPH. Poměrně vysokou částkou, kterou jsem nepředpokládal, byla cena za výrobu frézovaného dílce montážní krabice. Vzhledem k faktu, že v této fázi se jednalo o kusovou (prototypovou) výrobou, můžeme očekávat snížení tohoto nákladu v případě sériové výroby (i v případě série v řádech desítek kusů).

Reálná prodejní cena by měla být stanovena okolo 700 USD bez DPH, neboť je třeba počítat s náklady vzniklými vývojem tohoto zařízení, dále ne třeba počítat s náklady, které ještě budou spojeny s certifikací zařízení a například vývojem certifikovaného software. To znamená, že je nezbytně nutné snížit cenu instalační krabice, aby celý projekt měl ekonomický smysl.

Vzhledem k faktu, že cena obvyklá pro tato zařízení se pohybuje mezi 400 a 800 dolary, je třeba udržet výslednou prodejní právě na hodnotě 600 amerických dolaru bez DPH.

### 3.7.3 Další vývoj

Zařízení bylo v rámci tohoto projektu kompletně vyvinuto a dopracováno do funkční podoby, avšak díky nastalé krizi, která způsobila přibližně 6týdenní zpoždění. A to zejména díky nemožnosti přístupu k některým komponentám, díky zpoždění při dopravě různých dílů potřebných ke konstrukci, ale také díky nemožnosti kontaktu s lidmi, kteří toho času byli díky krizi mimo své zaměstnání. Takové zpoždění způsobilo nevratné prodlevy v pracích na jednotlivých částech projektu, proto jsem se postupně rozhodnul k přehodnocení přístupu a zvolil jsem jako prioritu uvedení zařízení do funkční podoby v základním režimu. Pro další vývoj tedy zůstávají úpravy obvodových desek na základě poznatků vzniklých při jejich ožívání (zejména výměna řídicího mikrokontroleru). Dále je třeba dodat pro zařízení ještě externí ochranu proti přepětí v systému a ochranu zkratu na větvi buzení generátoru. Dalším podmětem k vývoji je vlnění výstupního napětí, které sice splňuje předpisy, ale mohlo by být sníženo. Tento jev by se dal redukovat použitím kvalitnějšího A/D převodníku. Posledním bodem je odladění funkčnosti paralelního chodu dvou mikrokontrolerů a následně vytvoření derivátu zařízení pro regulaci dvou a více generátorů v jednom letadle (například pro vícemotorová letadla).

### 3.7.4 Budoucnost projektu

Budoucnost využití takového zařízení bude samozřejmě záviset na jeho odbytu. Osobně si myslím, že doba přijde v momentě, kdy se kapacity společnosti SPD Kroměříž budou snižovat a společnost tak nebude schopna provádět generální opravy zařízení LUN.

Další nutností pro certifikaci je navázání kontaktu se společností disponující oprávněním EASA DOA<sup>5</sup>, která by mohla provést certifikační proceduru. Pro výrobu zařízení je následně nutná společnost s oprávněním EASA POA<sup>6</sup>. Jako vhodná společnost se aktuálně jeví firma Air Team Service, která je ve finální fázi schvalování DOA organizace.

Posledním bodem, který bych zde vyzdvihнул, je možná výměna kompletně celé dobíjecí soustavy. Tedy nahrazení dynama a regulátoru systému, které jsou aktuálně standardně užívány na letadlech. Standardně jsou na letadlech užívány alternátory, ty vynikají nižším šumem na výstupu (nemají komutátor ale jen sběrné kroužky) a vyšším výkonem při nižší hmotnosti. Právě tento argument mne přivedl na myšlenku výměny celého zařízení, neboť současné dynamo při své hmotnosti

---

<sup>5</sup> Design Organisation Approval – Organizace schválená pro vývoj leteckých zařízení dle části 21 [14]

<sup>6</sup> Production Organisations Approvals – organizace osvědčená pro výrobu letadlových částí, potvrzuje schválení EASA pro schodu s jednotlivými nařízeními, [13]

dosahující 6 Kg generuje pouze 20–21 A na 27,5 V. Alternátory malých rozměrů disponují výstupním proudem minimálně 30 A při nižších hmotnostech.

Problémem implementace takového zařízení je ale umístění příruby s náhonem generátoru na motorech Walter M137/337. Pro instalaci alternátoru by bylo nutné vyvinout přírubu, která by posunula osu dále od motoru, aby bylo možné instalovat nové zařízení. To vše, plus náklady na certifikaci takové změny znamenají poměrně veliký zásah, což bylo mou hlavní motivací pro vývoj nového regulátoru dobíjení.

## 4 ZÁVĚR

V rámci tohoto projektu jsem analyzoval současné řešení problematiky výroby elektrické energie na palubě letadla. Provedl jsem rešerši a popis obecně užívaných metod výroby elektrické energie na palubě letadla, a hlavně způsobu jejich regulace.

Následně jsem provedl podrobnou analýzu a popis funkce regulátoru LUN 2141, abych touto prací dokázal, jakým způsobem jej lze plnohodnotně nahradit. Vzhledem k potenciálu zařízení jsem se v rámci této diplomové práce zabýval také předpisovou základnou, spravující takovéto letadlové díly. V práci jsou popsány jednotlivé předpisy, upravující parametry kladené na letadlové generátory a regulátory. Na základě těchto parametrů jsem následně upravil i požadavky kladené na mnou navrhované řešení.

Dalším krokem, ke kterému jsem se přesunul, byla identifikace systému generátoru a identifikace charakteristik regulačního děje původního řešení. Pro tento pokus jsem navrhnul a vyrobil přípravek pro provoz generátoru mimo letadlový motor, a prokázal, že tento přípravek je schopen simulovat celý rozsah pracovních otáček. V laboratorním prostředí jsem následně s využitím záznamových zařízení provedl analýzu charakteristik dynama a sestavy a porovnal je s původním regulátorem.

Na základě naměřených dat jsem následně vytvořil model systému dynama, který jsem experimentálně doladil v prostředí modelačního programu MATLAB tak, aby věrně kopíroval naměřená data. Na základě těchto dat jsem pak pokračoval návrhem regulátoru.

Prvním krokem bylo použití aplikace „sisotool“, díky které jsem navrhnul základní PI regulátor. Ten jsem následně v prostředí Simulink převedl na diskrétní PS regulátor a odladil tak, aby modelovaná přechodová charakteristika odpovídala limitům daným normou. Dále jsem v programu Simulink provedl demonstraci wind up jevu a jeho potlačení.

Navržené konstanty regulátoru jsem naprogramoval do mikrokontroleru a přešel k fázi testování nového regulátoru.

V této fázi se vyskytlo několik problémů, které jsem následně identifikoval jako problém s asynchronním vzorkováním. Tento problém způsoboval anomálie v programu, jehož výsledkem bylo nekvalitní řízení. Zjištěný nedostatek jsem odstranil drobnou úpravou programu.

Při měření přechodových charakteristik regulátoru se mi potvrdily charakteristiky modelované v předchozí fázi v prostředí Simulink. Dále byl znatelný významný posun mezi původním řešením a mnou navrženým regulátorem. Významně klesla velikost šumu v řízené veličině (napětí palubní sítě) a byly významně omezeny zákrmy přechodových dějů při působení skokových změn

zátěže. Dále byly zkoušeny různé další vlastnosti a tyto zkoušky potvrdily významné zlepšení parametrů dobíjecí sestavy pro letadlo. Nejvýznamnějším zlepšením bylo snížení minimálních otáček dynama pro dobíjení, takže operátor letadla nemusí udržovat vysoké otáčky motoru, aby měl funkční dobíjení palubního akumulátoru. Na základě těchto dat mohu prohlásit, že navrhované řešení pracuje dle očekávání a přispělo ke zlepšení parametrů regulace napětí.

Práce se nakonec věnuje zhodnocení navrhovaného řešení, zhodnocení finanční stránky a podmínky k dalšímu vývoji. Protože během vývoje došlo k několika komplikacím, které jsem naprosto neočekával, bylo nutné redukovat některé cíle. Proto je nutné pokračovat v práci, ale to už pouze pro „doladění“ některých detailů, neboť zařízení jako takové je zcela funkční a plnohodnotně plní svou hlavní funkci, a to regulaci napětí palubní sítě letadla.

Dále mohu prohlásit, že jsem splnil jeden z hlavních požadavků, kladených na konstrukci takového zařízení, protože mnou zavržený regulátor dobíjení je plně zaměnitelný s původním řešením, a pro jeho instalaci není nutné provádět žádné mechanické ani elektrické změny na instalaci letadla.

Posledním bodem této práce bylo vytvoření metodiky pozemních a letových testů po instalaci nového zařízení do letadla. Tyto postupy jsou přiloženy k této práci jak příloha č.1.

# Literatura

- [1] A. S. Tech, „Aircraft Systems Tech,“ 06 2017. [Online]. Available: <https://www.aircraftsystemstech.com/2017/06/generator-controls.html>. [Přístup získán 12 2019].
- [2] Bell, „Bell Helicopter Maintenance Publications,“ Bell Helicopter , 12 2019. [Online]. Available: <http://bellhelicopter.net/#/doc/206B3/206-MM-CH96/p35>. [Přístup získán 12 2019].
- [3] M. O. s.p., Technická příručka letadla Zlín Z-142.
- [4] E. A. p. b. letectví, „CERTIFIKAČNÍ SPECIFIKACE PRO EVROPSKÉ TECHNICKÉ NORMALIZAČNÍ PŘÍKAZY,“ 12 3 2020. [Online]. Available: [https://ucl.devlab.cz/wp-content/uploads/2019/07/CS-ETSO\\_konsolidovane\\_Amdt\\_7\\_CZ.pdf](https://ucl.devlab.cz/wp-content/uploads/2019/07/CS-ETSO_konsolidovane_Amdt_7_CZ.pdf).
- [5] E. eRules, Powered by EASA eRulesPage 2of 560| Dec 2019Easy Access Rules for Airworthiness and Environmental Certification (Regulation(EU)No 748/2012), European Union, Dec 2019.
- [6] A. Standard, Minimum Performance Standards for Engine Driven D.C. Generators/Starter-Generators and Associated Voltage Regulators, SAE International, 1980.
- [7] V. Electric, „Elektromotor MS 2 PÓL, Typ MS90-2,2kW - 2920 otáčok/min,“ [Online]. Available: <https://elektromotory-vybo.cz/wp-content/uploads/2016/02/datasheet-elektromotor-22kw-ms90-2.pdf>. [Přístup získán 16 04 2020].
- [8] P. doc. Ing. Petr Blaha, „Modelování a Identifikace - Neparametrické metody identifikace,“ 20 Září 2015. [Online]. Available: <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbmxtb2RlbG92YW5pYWlkZW50aWZpa2FjZXxneDo5YWEyZTY0ZjhmY2M1NTA>. [Přístup získán 10 Květen 2020].
- [9] Š. Ožana, „NAVRHOVÁNÍ A REALIZACE REGULÁTORŮ,“ 2012. [Online]. Available: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FEI/NRR/Navrhovani%20a%20realizace%20regulatoru.pdf>. [Přístup získán 12 05 2020].
- [10] C. Prof. Ing. Petr Pivoňka, „Čílicová řídicí technika,“ FEKT VUT v Brně, Brno, 2012.
- [11] F. S. Briefing, „Full Authority Digital Engine Control (FADEC),“ FAA, [Online]. Available:

[https://www.faa.gov/news/safety\\_briefing/2017/media/SE\\_Topic\\_17-12.pdf](https://www.faa.gov/news/safety_briefing/2017/media/SE_Topic_17-12.pdf). [Přístup získán 6 12 2019].

- [12] „Bright Hub Engineering,“ [Online]. Available: <https://www.brighthubengineering.com/commercial-electrical-applications/62223-what-is-a-carbon-pile-regulator/>. [Přístup získán 12 2019].
- [13] EASA, „Production Organisation Approvals,“ EASA, [Online]. Available: <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/aircraft-products/production-organisations-approvals>. [Přístup získán 12 05 2020].
- [14] EASA, „Design Organisation Approvals,“ EASA, [Online]. Available: <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/aircraft-products/design-organisations/design-organisations-approvals>. [Přístup získán 13 05 2020].



# Seznam symbolů, veličin a zkratek

V	-	Volt, jednotka elektrického napětí
A	-	Ampér, jednotka elektrického proudu
Ah	-	Ampér-hodina, jednotka kapacity akumulátoru
ICAO	-	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
EASA	-	Evropský úřad pro civilní letectví
CAA	-	Český úřad pro civilní letectví
IFR	-	Soubor pravidel pro vedení letadla s použitím navigačních přístrojů
LED	-	Světlo emitující dioda (světelný zdroj)
DPS	-	Deska plošných spojů
PWM	-	Pulzně šířková modulace

## Seznam Příloh

1. Instrukce pro kontrolu instalace zařízení a letový test
2. Původní řešení – připojení zátěže 50%
3. Původní řešení – připojení zátěže 100%
4. Původní řešení – odpojení zátěže 50%
5. Původní řešení – odpojení zátěže 100%
6. Nové řešení – připojení zátěže 50%
7. Nové řešení – připojení zátěže 100%
8. Nové řešení – odpojení zátěže 50%
9. Nové řešení – odpojení zátěže 100%
10. Nové řešení – Decelerace generátoru
11. Porovnání přechodových dějů jednotlivých regulátorů
12. Nový regulátor ustálený stav 0 % zátěže
13. Nový regulátor ustálený stav 25 % zátěže
14. Nový regulátor ustálený stav 50 % zátěže
15. Nový regulátor ustálený stav 100 % zátěže
16. Návrh obvodu řídicí desky
17. Návrh obvodové desky řídicí desky
18. Návrh obvodu výkonové desky
19. Návrh obvodové desky výkonové desky
20. Program mikrokontroleru