



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrických pohonů**

Realizace dynamometru s pomocí systému dSpace

Realization of Dynamometer on dSpace System

Diplomová práce

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

Vedoucí práce: Ing. Jan Bauer, Ph.D.

Josef Bráza

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Josef Bráza**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Název tématu: **Realizace dynamometru na pomoci systému dSpace**

Pokyny pro vypracování:

- 1) V systému Matlab/Simulink vytvořte model DC motoru, tak aby se dal přeložit pro systém dSpace
- 2) Za pomoci dSpace realizujte navrhnete regulační smyčku pro DC motor, tak aby mohl simulovat různé typy zátěže
- 3) Vytvořte GUI pro ovládání dynamometru
- 4) Prozkoumejte možnosti využití vytvořeného elektronického dynamometru pro automatické měření pohonu

Seznam odborné literatury:

- [1] Lettl J., Čeřovský Z., Pavelka J. – Výkonová elektronika, skripta ČVUT FEL
- [2] Javůrek J. – Regulace moderních elektrických pohonů, Grada
- [3] Pavelka, J., Zděnek, J., - Elektrické pohony a jejich řízení. 1. vyd., Praha, ČVUT, 2010.
- [4] Datasheety dSpace, Matlab

Vedoucí: Ing. Jan Bauer, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

Ing. Jan Bauer, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2016



Prohlášení:

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

V Praze dne: 25. května 2016

Josef Bráza



Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Bauerovi, Ph.D. za cenné rady, náměty, připomínky, trpělivost, ochotu a čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky. Nesmím ovšem zapomenout poděkovat svým blízkým za psychickou a morální podporu. Při řešení mi velmi pomohly praktické zkušenosti nabyté u zaměstnavatele ABB, s. r. o. (divize pohony), a proto děkuji svým kolegům, kteří mi tyto zkušenosti předali.



Abstrakt

Práce je zaměřena na modelování řízení stejnosměrného dynamometru v prostředí *MATLAB Simulink*, ale i jeho praktického uvedení do provozu za pomoci prostředí *dSpace*, a nalezení neoptimálnějšího modelu pro realizaci automatizovaného měření elektrických strojů točivých. Dynamometr může být ovšem řízen i takovým algoritmem, aby jeho chování co nejlépe odpovídalo přednastavené mechanické charakteristice zátěže. Výsledkem je takové řízení stoje, které poskytuje možnosti měření a záznamu dynamických i statických charakteristik elektrických pohonů. Celý pohon dynamometru bude vybaven ovládáním prostřednictvím uživatelského rozhraní počítače. K praktickému ověření funkce pohonu dojde při jeho zkouškách, a jejíž výsledky budou v práci zhodnoceny.

Klíčová slova

dynamometr, MATLAB, Simulink, dSpace, stejnosměrný motor, měření, regulace, pohon, měnič

Abstract

The thesis is focused on creating and testing a model of *DC* dynamometer control in *MATLAB Simulink*, which will be practically tested on real machine with help of *dSpace* signal platform. Thesis is looking for the optimum control model (or algorithm) for automated measuring and testing of electrical machines. Dynamometer's behavior may be based on character of any working machine too. Final control program provides measuring and record of dynamic and static characteristics electric drives and machines. User control interface (*GUI*) of whole dynamometer drive will be implemented via *PC* program. Drive will be practically tested by series of trial tests which results will be evaluated at the end of the thesis.

Key words

dynamometer, MATLAB, Simulink, dSpace, DC machine, measuring, control, electric drive, converter



Obsah

1	Úvod	15
2	Teoretický popis	16
2.1	Matematický popis	17
2.2	Stejnoseměrný dynamometr	18
3	Řízení - regulace	19
3.1	Hysterezní řízení	20
3.2	Spojité řízení	20
4	Řízení výkonu stejnosměrných strojů	23
4.1	Výkonová část pohonů se stejnosměrným motorem	23
4.2	Ztrátová regulace výkonu	24
4.3	Regulace se sníženými ztrátami	25
4.4	Pulzní regulace	25
4.5	Měniče a jejich řízení užívané v pulsním řízení	27
4.5.1	Jednokvadrantní měnič	28
4.5.2	Dvoukvadrantní měnič	28
4.5.3	Čtyřkvadrantní měnič	29
4.6	Řízení spínání výkonových součástek měniče	29
4.7	Pulzní řízení velikosti odporu	29
5	Zatěžování hnacích strojů	31
5.1	Momentové charakteristiky pracovních strojů	31
5.2	Druhy zatížení pracovních strojů	32
6	Měření parametrů stejnosměrného stroje	34
6.1	Měření odporu vinutí	34
6.1.1	Měření odporu budícího vinutí	34
6.1.2	Měření odporu kotevního vinutí	34
6.2	Měření indukčnosti vinutí	35



6.2.1	Měření indukčnosti budícího vinutí	35
6.2.2	Měření indukčnosti kotevního vinutí	35
6.3	Měření konstanty motoru.....	35
6.4	Měřený motor	36
6.4.1	Naměřené údaje.....	36
6.5	Parametry stroje finálního dynamometru	37
7	Užitá topologie řízení dynamometru	40
7.1	Blokový popis užitého způsobu řízení.....	40
8	Sestavení modelu	43
8.1	Popis sestaveného modelu:	43
9	Simulace modelu.....	47
9.1	Ladění PI regulátorů	47
9.2	Simulace automatického měření motoru	49
9.3	Simulace elektrické zátěže.....	49
10	Realizace modelu systémem dSpace	51
10.1	Podoba modelu pro systém dSpace.....	51
10.2	Podrobný popis pracoviště	58
11	Uživatelské rozhraní a výsledky testování	61
11.1	Výsledky měření a testování	62
11.1.1	Dynamické chování pohonu.....	62
11.1.2	Výsledky testů elektrické zátěže	65
11.2	Výsledky automatického měření motoru	67
11.2.1	Výsledky z měření stejnosměrného motoru	67
11.2.2	Výsledky z měření asynchronního motoru.....	69
11.2.3	Výsledky z měření synchronního motoru	70
11.3	Výsledky periodického zatěžování typu S6	70
11.4	Výsledky spouštění motoru s přednastaveným mech. průběhem	71



12	Závěr	76
13	Seznam symbolů a zkratek.....	78
13.1	Zkratky	78
13.2	Veličiny	78
13.3	Indexy	78
14	Použitá literatura a zdroje	80
15	Přílohy.....	81
15.1	Protokoly měření	81
15.2	Seznam obrázků.....	86
15.3	Seznam grafů	87
15.4	Seznam tabulek.....	87



1 Úvod

Měření charakteristik elektrických strojů a pohonů je základním úkonem při jejich výrobě, vývoji a ladění. Výpočetně řízené dynamometry poskytují možnost měření a záznam charakteristik po určitém vzorkovacím kroku i při přechodných mechanických dějích, které nelze ze statické charakteristiky, získávané za ustáleného mechanického stavu, určit. Vytvořením simulačního modelu dynamometru v prostředí *MATLAB/Simulink* a jeho převodu do diskrétní podoby, je následně model upraven pro systém *dSpace*. Tím dojde k ověření funkce počítačového modelu na reálném stroji. Reálný stroj bude do programu implementován v podobě náhradního schématu, jehož veličiny budou zjištěny měřením.

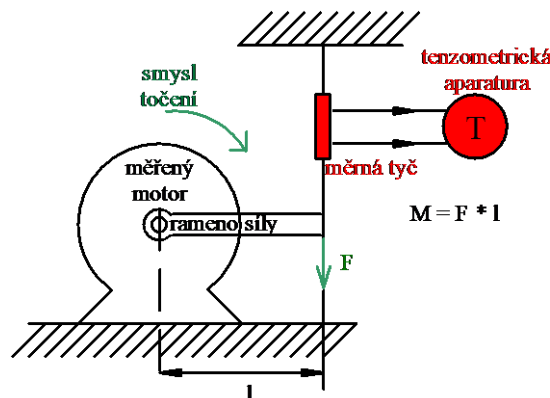
Řízení je následně prakticky aplikováno, s využitím programovatelné řídicí platformy *dSpace* (jednotka s programovatelným signálovým procesorem a vstupně-výstupním digitálním a analogovým rozhraním), na řízení elektrického stejnosměrného dynamometru na stávajícím pracovišti. Při realizaci bylo také využito stávajícího univerzálního napěťového střídače a měřicího rozhraní napětí a proudu. Celý systém je doplněn o podrobnou vizualizaci a záznam provedených měření s možností exportu dat a vytvoření jednoduchého protokolu měření.

Podobných typů měřících pracovišť je ve výzkumné a zkušební oblasti celá řada. Přínosem této práce však bude vytvořit takovéto pracoviště ze stávajícího vybavení laboratoře elektrických strojů FEL ČVUT v Praze a tedy s minimálními pořizovacími náklady, neboť jsou podobné sestavy dodávané na klíč poměrně nákladné.

2 Teoretický popis

Dynamometr je určen k měření mechanického výkonu na hřídeli zkoušeného stroje a k vyvozování poháněcího a brzdného momentu – umožňuje tedy pohánět a brzdit zkoušené zařízení (el. stroj, spalovací motor, převodovku aj.). Stroj, který vyvozuje moment, může být elektrický anebo mechanický. Elektrický stroj, pokud je motorem, může pracovat ve dvoukvadrantním režimu jako motor hnací, nebo jako motor brzdný, v obou případech při tom spotřebovává elektrickou energii. Ve čtyřkvadrantním režimu pracuje jako hnací motor, nebo jako brzdící generátor. Vířivá brzda je další typ el. stroje, který je možné pro dynamometr využít. Dynamometr však vyvíjí pouze brzdný moment (nikoliv hnací) závislý na energii dodané do brzdy. Je-li stroj mechanický, vyvíjí brzdný moment síla působící na třecí mechanismus – kotoučovou brzdu, brzdné špalíky.

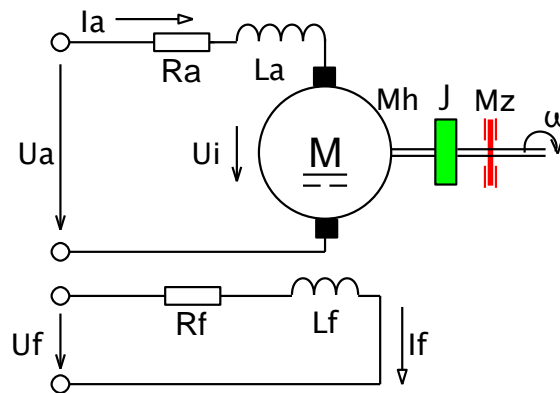
Elektrické dynamometry jsou nejčastěji tvořeny právě elektrickým strojem, jedná se hlavně o stejnosměrné a asynchronní dynamometry. Asynchronní dynamometr je vybaven asynchronním třífázovým motorem s kotvou kroužkovou, nebo s kotvou nakrátko v kombinaci s měničem frekvence. Stejnosměrné dynamometry jsou vybaveny stejnosměrným, cize buzeným, komutátorovým strojem. Důvody jsou jednoznačné: jednoduchá říditelnost, výborný tvar momentové a mechanické charakteristiky a také menší velikost oproti asynchronním dynamometrům. Historicky byly používány dynamometry ve spolupráci s *Ward-Leonardovou* skupinou, která je řídila, a to zejména díky možnosti rekuperace energie do sítě. V současné době jsou tyto elektro-mechanické měniče a budiče nahrazeny statickými polovodičovými měniči. Konstrukčně jsou dynamometry uspořádány buď jako váhové s výkyvným rotorem nebo jako torzní s momentovou hřídelí. Základem dynamometrů s výkyvným rotorem je motor uložený na ložiskových štítech, od jehož osy působí rameno na váhu, jejíž stupnice je cejchována v hodnotě momentu.



Obrázek 2-1: Tenzometrické měření momentu [5]

2.1 Matematický popis

K vytvoření modelu je nezbytné znát soustavu základních rovnic stejnosměrného stroje. Tato soustava rovnic vyplývá z jeho elektrického schématu:



Obrázek 2-2: Náhradní schéma cize buzeného motoru

Stejnoseměrný cize buzený motor je popsán těmito rovnicemi:

Rovnice obvodu kotvy:

$$u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + u_i \quad (2-1)$$

Rovnice budicího obvodu:

$$u_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (2-2)$$

Pohybová rovnice rotujícího tělesa (v tomto případě rotoru):

$$m = m_h - m_z = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2-3)$$

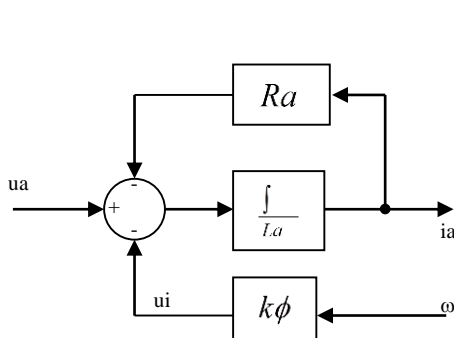
Pro indukované napětí v kotvě motoru platí:

$$u_i = k\phi\omega \quad (2-4)$$

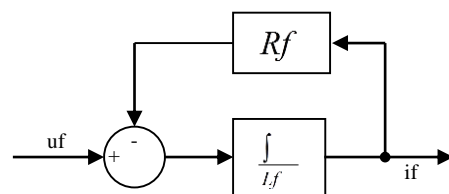
Pro elektrický moment platí:

$$m_h = k\phi i_a \quad (2-5)$$

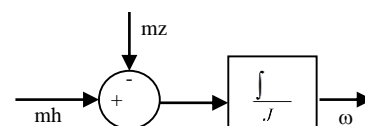
Pokud rovnice znázorníme blokově, dostáváme:



Obrázek 2-4: Blokové schéma kotvy [6]



Obrázek 2-3: Blokové schéma buzení [6]



Obrázek 2-5: Mechanika blokově [6]



2.2 Stejnoseměrný dynamometr

Točivý moment souvisí s výkonem na hřídeli a úhlovou rychlostí vztahem:

$$M = \frac{P}{\omega} \quad (2-6)$$

Vlastní měření momentů je možné několika způsoby a zařízeními. Nejjednodušší jsou páky známé délky namontované na hřídeli měřeného motoru a vyvažované závažím nebo protitlakem automatické váhy. Metody lze použít i u velkých strojů řádově megawattů při plném napětí. Místo váhy se měří tenzometricky změna tahu a síla F v měrné tyči. Tímto způsobem se měří při nulových otáčkách. Dynamometry jsou stavěny se statoru uloženými v ložiskách. Při zatížení je pak stator reakcí natáčen v generátorovém režimu ve smyslu točení rotoru, u motorového režimu opačně. Platí:

$$M_{skut} = M_{měř} \pm M_d \quad (2-7)$$

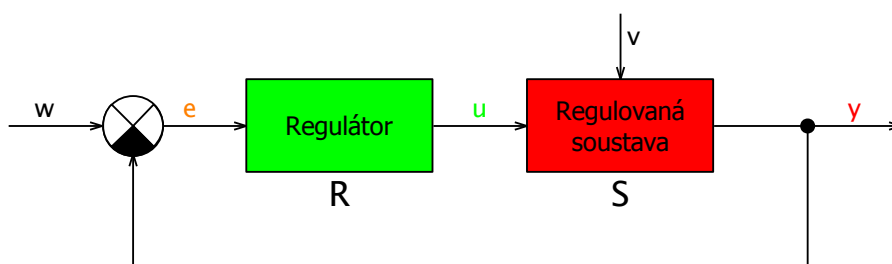
...se znaménkem plus pro motorový a mínus pro generátorový chod dynamometru, přičemž M_d je moment ventilačních a jiných ztrát dynamometru, měřitelný při jeho motorovém chodu naprázdno. Elektrické dynamometry se užívají až do výkonu několika set kilowatt s přesností měření momentu na 1 až 1,5 %. Moment lze také vyčíslit z výkonu stejnosměrného generátoru, kterým měřený stroj zatížíme. Generátor musí být předem pečlivě cejchován v oblasti měřených otáček. [5]

3 Řízení - regulace

Regulace nám umožňuje udržování požadovaných veličin na konstantních hodnotách. Velikost regulované veličiny se měří senzorem a porovnává se s hodnotou, které má dosahovat. Podle zjištěné odchylky se zasahuje do procesu regulace tak, aby byla odchylka udržena na minimu. Regulace obsahuje vždy zápornou zpětnou vazbu. Všechny tyto pochody se dějí v tzv. regulačním systému, ten je složen z řídicího a řízeného systému. Řídicí systém (regulátor) je zařízení uskutečňující regulaci (akční zásah). Systém, na který regulátor působí, se jmenuje regulovaný (regulovaná soustava).

V Regulačním systému se vyskytují následující veličiny, které se na regulaci nějakým způsobem podílejí:

- **Regulovaná veličina – (y):** je veličinou, jejíž hodnota má být udržována regulátorem
- **Žádaná hodnota – (w):** je taková hodnota, na které má být udržována regulovaná veličina
- **Regulační odchylka – (e):** je rozdílem regulované veličiny a žádané hodnoty regulované veličiny a vstupní veličinou regulátoru
- **Akční veličina – (u):** působí na regulační systém tak, aby byla regulační odchylka udržována na minimu
- **Poruchová veličina – (v):** je náhlá změna regulované veličiny vyvolaná např. odtokem vody v nádrži, ve které se reguluje hladina



Obrázek 3-1: Základní regulační smyčka [8]

Pochody v systému jsou tedy řízeny regulátorem, ten může být napájen přímo ze soustavy, nebo může být jeho napájení externí, hovoříme tedy o přímém a nepřímém regulátoru.

V regulované soustavě probíhá regulační pochod, při kterém se ovlivňuje regulovaná veličina akčním zásahem regulátoru. Předpokládáme, že regulovaná veličina je ve všech místech soustavy stejná.

Soustavy rozdělujeme dle jejich stability na statické a astatické. O tomto chování vypovídá tzv. činitel autoregulace. Pokud je činitel roven nule, je soustava astatická, v opačném případě je soustava statická. Ve **statické soustavě** vždy dojde při vychýlení vstupní veličiny k ustálení soustavy v novém rovnovážném stavu bez nutnosti použití regulace. V **astatické soustavě** se po změně vstupní veličiny nedosáhne nového ustáleného stavu a soustava musí být „zaregulována“.

Soustavy typu motor-zátěž jsou ve většině případů statické, výjimku tvoří nezatížený sériový motor (momentově řízené pohony při náhlém odlehčení).

3.1 Hysterezní řízení

Základem hysterezního řízení je hysterezní regulátor, ten je možné si představit jako relé spínající a odpínající při různém napětí na kotevní cívce. Regulátoru se definuje tzv. hysterezní pásmo referenční hodnoty. Úkolem regulátoru je udržovat regulovanou veličinu v tolerančním pásmu kolem žádané hodnoty dvoustavovým akčním zásahem. Regulační odchylka tak kmitá kolem žádané hodnoty a tvoří spínací pochod výkonových prvků. Frekvence spínání je závislá na velikosti hysterezního pásma a mění se s velikostí regulační odchylky. Z hlediska regulovaných pohonů musí být toto pásmo dostatečně úzké, aby nedocházelo k velkým změnám regulační odchylky, ta by mohla způsobit např. velké mechanické rázy, které by mohly poškodit soustrojí.

Hysterezní řízení je v „*Simulinku*“ realizováno blokem „*Relay*“ ->



Tohoto řízení je v této práci později využito pro regulaci budícího proudu stroje.

3.2 Spojité řízení

Spojité řízení je takovým řízením, při kterém je akční zásah spojitě nastavován. Akční člen má tedy spojitý výstup, omezený pouze spodní a horní mezí. Pro spojitou regulaci tedy využíváme spojitý regulátor, který se nazývá proporčně-integračně-derivační, zkráceně „*PID*“. Jednotlivé členy jsou popsány svými rovnicemi. Přenos regulátoru je poměrem regulační odchylky $e(t)$ a akční veličiny $u(t)$:

$$f_R(t) = \frac{u(t)}{e(t)} \quad \text{neboli v Laplaceově obraze:} \quad G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} \quad (3-1)$$

Proporcionální složka neboli regulátor typu *P* má chování zesilovače a regulační odchylka je přímo úměrná akční veličině dle konstanty zesílení, tedy:

$$u(t) = r_0 e(t) \quad (3-2)$$



Konstanta r_0 vyjadřuje zesilovací činitel, který se také uvádí jako konstanta zesílení K_R . Pokud aplikujeme *Laplaceovu transformaci*, dostáváme přenos regulátoru:

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_0 = K_R \quad (3-3)$$

Tento typ se používá u jednoduchých regulačních soustav, neboť nedokáže kompenzovat regulační odchylku na nulovou hodnotu. Neúměrné zvyšování zesilovacího činitele vede k nestabilitě (rozkmitání systému).

Integrační složka je regulátor typu I , kde je akční veličina úměrná integrálu regulační odchylky, kdy r_i je zesílení integračního regulátoru:

$$u(t) = r_i \int_0^t e(t) dt + u(0) \quad (3-4)$$

Velikost akčního zásahu se samozřejmě integruje od počátečního stavu akčního zásahu. *Laplaceův* přenos pro tento typ regulátoru je:

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{r_i}{s} = \frac{1}{T_i s} \quad (3-5)$$

Namísto zesílení regulátoru se často používá časová konstanta integrace T_i . Tento typ dokáže eliminovat regulační odchylku, ačkoliv je regulační pochod pomalejší a může zhoršovat stabilitu soustavy. Vlivem integrace může dojít k překmitu regulované hodnoty.

Derivační složka je regulátor typu D , kde je akční veličina úměrná derivaci regulační odchylky, kdy je r_d velikost derivačního zesílení:

$$u(t) = r_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3-6)$$

Přenos takového regulátoru potom je:

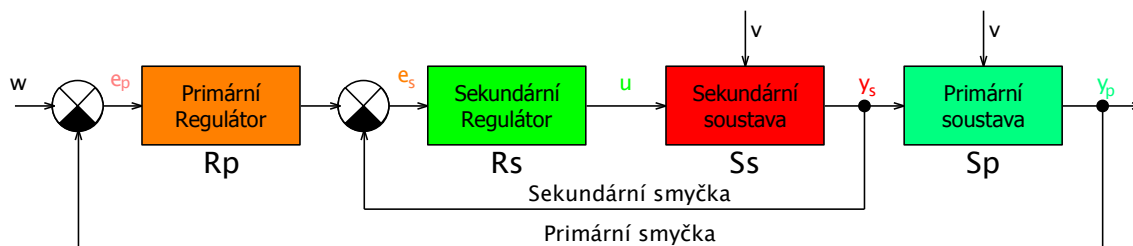
$$u(t) = r_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3-7)$$

Derivační regulátor urychluje regulační proces, samostatně se nikdy nepoužívá (jen jako složka *PID*). Tato složka zároveň zesiluje šum.

V oblasti elektrických pohonů se nejčastěji využívá kombinace proporcionální a integrační části – tedy *PI* regulátor. Regulátor musí být vybaven vnitřním omezovačem, aby byly meze akční veličiny jednoznačně stanoveny. Přenos *PI* regulátoru je: [10]

$$G_R = K_R + \frac{1}{T_i s} \quad (3-8)$$

V této práci bude také využito kaskádního zapojení *PI* regulátorů, a to pro regulaci proudu nebo momentu (sekundární smyčka) dynamometru a jeho otáček (primární smyčka). Vzniknou tak dvě regulační smyčky, jejichž regulátory musí splnit poměrně vysoké nároky na kvalitu regulačního procesu.

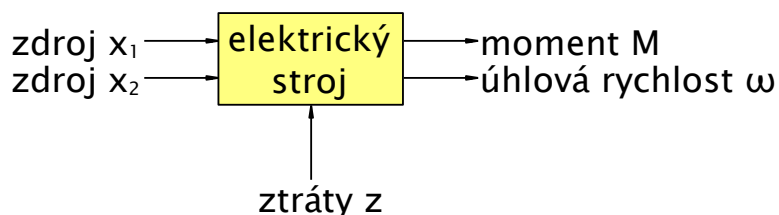


Obrázek 3-2: Kaskádní regulace [8]

Tato dvousmyčková regulace má řadu výhod, které jí tvoří robustnější. Za prvé, pokud působí porucha na sekundární proces, potlačí ji sekundární regulátor s minimálním vlivem na primární proces. Druhou výhodou je urychlení regulace sekundárního procesu a třetí výhodou je zvýšení robustnosti systému. Pro regulaci zmíněného dynamometru bude použit regulátor *PI* (s minimální integrační konstantou) v sekundární smyčce, kde nejsou příliš velké nároky na přesnost regulace, a regulátor typu *PI* v primární smyčce. [8]

4 Řízení výkonu stejnosměrných strojů

„Elektrický motor z hlediska pohonářského je systém, jehož výstupními veličinami jsou parametry mechanického pohybu, nejčastěji točivý moment a úhlová rychlost (M, ω) a jehož vstupními veličinami jsou dva parametry napájecího zdroje (x_1, x_2). Těmi můžeme řídit vlastnosti a mechanický pohyb stroje. Kromě toho můžeme vlastnosti ovlivňovat zásahem do vnitřní struktury stroje“. [5]



Obrázek 4-1: Blokové znázornění elektrického stroje [5]

Přirozená charakteristika elektrického stroje je závislost úhlové rychlosti na momentu, přičemž stroj je připojen ke zdrojům o jmenovitých napětích a do obvodu stroje nejsou připojeny žádné přídavné impedance. Buzením stroje modifikujeme jeho charakteristiky. Přehled základních možností je uveden v následující tabulce.

zdroj x_1	zdroj x_2	ztráty Z	Název druhu řízení
$U = \text{var.}$	$I_f = \text{konst.}$	-	řízený napětím
$U = \text{konst.}$	$I_f = \text{var.}$	-	řízený magnetickým tokem
$I_a = \text{konst.}$	$I_f = I_a$	-	řízený zdrojem proudu, řízený magnetickým tokem
$U = \text{konst.}$	$I_f = \text{konst.}$	R	řízený odporem

Tabulka 4-1: Přehled způsobů řízení stejnosměrného stroje [5]

Důvodem k úpravě charakteristik je:

- Ovlivnění parametrů pohonu – úhlové rychlosti a momentu, tedy i tvar jejich vzájemné závislosti.
- Zajistit rozběh pohonu a jeho zabrzdění do zastavení, reverzaci momentu a rychlosti, zajistit aktivní brždění pohonem.
- Zajistit hladký start a zabrzdění pohonu bez proudových nárazů. [5]

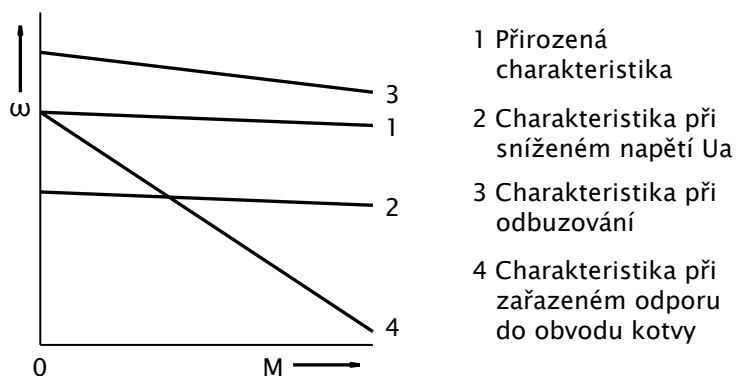
4.1 Výkonová část pohonů se stejnosměrným motorem

Cize buzený stroj (bez buzení permanentními magnety) vyžaduje dva zdroje, zdroj pro budící a kotevní vinutí. Výkonová rovnice stroje:

$$\begin{aligned}
 P_p &= \Delta P + P & \text{tedy: } U_i I_a &= R_a I_a^2 + \Delta P_e + \Delta P_{mech} + P \\
 P_p &= U I_a & \Delta P &= R_a I_a^2 + \Delta P_e + \Delta P_{mech} & (4-1) \\
 P_i &= U_i I_a & &= \Delta P_e + \Delta P_{mech} + P
 \end{aligned}$$

Odtud dostaneme napěťovou rovnici, kde indukované napětí je dáno vztahem (2-4). „*U cize buzených motorů je magnetický tok Φ u kompenzovaných strojů jednoznačně, u nekompensovaných přibližně, dán budicím proudem.*“ [5]

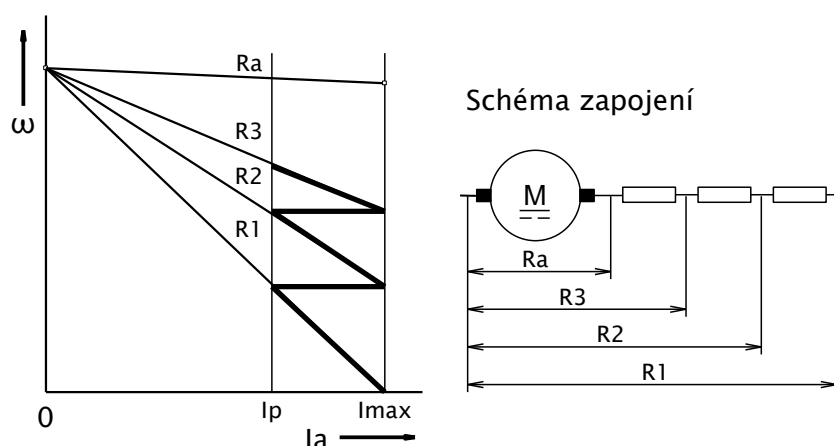
Pro hladký chod bez ať už proudových, momentových a mechanických rázů je třeba napájet stejnosměrný stroj z říditelného zdroje napětí. Takového napájecí zdroje bychom mohli souhrnně označit za měniče, které mohou podle směru toku energie pracovat ve dvou kvadrantech provozu (nerekuperační) a ve čtyřech kvadrantech provozu (rekuperační). Typickým příkladem nerekuperačního zdroje je diodový usměrňovač s odporovou regulací na jeho vstupu nebo výstupu. Zdroje, které umožňují plynulé řízení toku energie (rekuperační), jsou např.: *Ward-Leonardova* kaskáda, reverzační usměrňovač, plný *IGBT* můstek atd. Rozdělení dle kvadrantů práce bude popsáno dále v této kapitole.



Obrázek 4-2: Mechanické charakteristiky stejnosměrného cize buzeného motoru [3]

4.2 Ztrátová regulace výkonu

Regulace, kterou měnič využívá ke změně napětí pro stroj, může být v zásadě řešena jako ztrátová, nebo „bezeztrátová“. Typickým příkladem ztrátové regulace výkonu je zařazení regulačního odporníku k neřiditelnému zdroji, který vytváří při daném proudu žádoucí úbytek napětí. Vzniklý výkon na tomto prvku je odveden ve formě tepla. Rozběh a výkon stroje je ovládán zařazováním jednotlivých odporových stupňů v obvodu kotvy. Výsledkem je použití velkého množství spínacích prvků, závislé na plynulosti rozběhu a tedy i kolísání spouštěcího proudu a urychlovacího momentu. [3]



Obrázek 4-3: Odporové spouštění stejnosměrného stroje [3]

Brzdění stroje může probíhat tedy i nerecuperačním způsobem, a to vyřazováním odporu z obvodu kotvy. Energie je mařena v odporu – přeměněna na teplo. Použití této regulace v oblastech měření momentu je především využíváno u jednoduchých měření, kde se od dynamometru neočekává motorický chod. Odporník je buď realizován jako pevný – protimoment dynamometru roste s otáčkami, nebo jako proměnlivý výkonový reostat (případně pulzní odpor, bude popsáno v následující kapitole). Změnou hodnoty odporu lze při daných otáčkách zvýšit proud kotvou a tím i zatěžovací moment. Zatěžování do odporu se často využívá při měření motorů se sériovým buzením.

4.3 Regulace se sníženými ztrátami

Pro snížení regulačních ztrát se využívá především tlumivek, přesytek, transduktorů, případně kombinace regulovaného střídavého zdroje s neřízeným usměrňovačem např. indukčního regulátoru, transformátoru s přepínáním odboček na straně VN nebo autotransformátoru s neřízeným diodovým usměrňovačem na sekundární straně střídavého zdroje. Tato zařízení začínají být po platné době a jedná se zejména o stávající pohony, nebo laboratorní zařízení, a proto se jimi nebudeme v této práci dále zabývat.

4.4 Pulzní regulace

Pulzní regulace typem řízení stejnosměrného stroje, které bylo použito v této práci. V první řadě je důležité uvést pojem „bezeztrátová“ na pravou míru: Ztráty, které vznikají při požadavku na změnu stavu, ve kterém se pohon nacházel, jsou minimalizovány na minimum, neboť je stroj připojen k plně říditelnému zdroji, který dodává (odebírá) pouze takovou energii, která je potřebná na změnu stavu. Ztráty, které pohon vykazuje, jsou ztráty generované ve zdroji energie, v samotném stroji a v přívodech.

Statické měniče pro stejnosměrné stroje jsou nejčastěji řízené usměrňovače, nebo pulzní měniče. Ztráty v měniči jsou tvořeny především úbytkem výkonu na spínacích prvcích a jsou složeny ze ztrát:

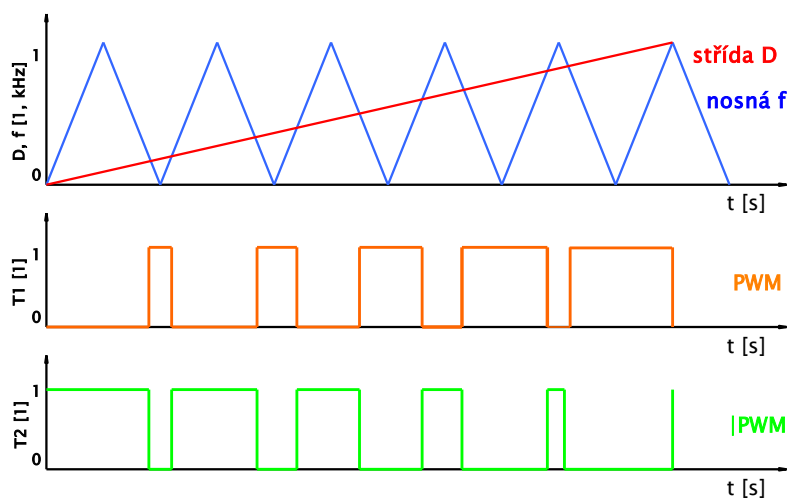
- **Spínacích:** ztráty generované přechodem součástky z vypnutého do sepnutého stavu závislé na frekvenci (zapínacím čase).
- **V sepnutém stavu:** ztráty vyvolané odporem součástky v sepnutém stavu, také lze vyjádřit jako součin napětí na součástce a proudu součástkou.
- **Vypínacích:** ztráty generované přechodem ze zapnutého do vypnutého stavu závislé především na frekvenci spínání (vypínacím čase).
- **Ve vypnutém stavu:** ztráty dané součinem velikostí závěrného napětí na součástce a závěrným proudem součástkou.

Ztrátový výkon generuje ve spínacím prvku teplo, které z něj musí být odvedeno chlazením. [1]

Dnes výhradně používaným typem takového řízení je regulace pulzní (nejčastěji pulzně šířková – *PWM*). Základem pulzně šířkové modulace je modulační kmitočet, který udává základní periodu pulzů. Při konstantní modulační frekvenci (bez rozmítání) zůstává perioda konstantní a dochází pouze ke změně střídavy na základě požadavku na střední hodnotu napětí (proudu). Výstupní napětí lze vypočítat dle vztahu:

$$U_{dAV} = U_{DC} * D \quad \text{kdy: } D = \frac{t_{on}}{T} \quad (4-2)$$

Generování výsledného sledu pulzů se provádí porovnáváním nosného signálu s hodnotou střídavy. V momentě rovnosti se generuje buď vzestupná, nebo sestupná hrana pulzu: [12]



Obrázek 4-4: Tvorba modulovaného signálu [2]

Tuto funkci obstarává komparátor. „Na jeden vstup komparátoru se přivede nízkofrekvenční, případně stejnosměrný pomalu se měnící modulační signál a na druhý vstup vysokofrekvenční nosný trojúhelníkový signál o kmitočtu f .“ [12] Pro kvalitní modulaci by měla být splněna podmínka co největšího odstupe mezi frekvencí modulovaného NF signálu a frekvencí nosného VF signálu. Výstupem komparátoru je signál pro zapnutí výkonového prvku (tranzistoru). PWM modulátor můžeme tedy označit za lineární převodník napětí/střída. [12]

4.5 Měniče a jejich řízení užívané v pulsním řízení

Pro pulzní napájení stejnosměrných strojů se užívají DC/DC měniče nejčastěji napájené ze zdroje konstantního napětí U_{DC} .

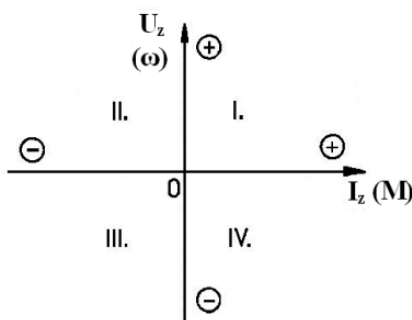
Pulsní měniče můžeme dělit dle způsobu změny výstupního napětí na:

- **Snižovací** – výstupní napětí měniče je nižší než vstupní (*step-down* měnič).
- **Zvyšovací** – výstupní napětí je vyšší než vstupní (*step-up* měnič).

Tyto měniče můžeme kvantifikovat za základě pracovního rozsahu do čtyř kvadrantů $V-A$ charakteristiky dle směru výstupního pracovního napětí a proudu vůči směru napětí a proudu od zdroje. Oblast práce měniče určuje jeho topologie, tedy i počet spínacích prvků a jejich zapojení. Měniče rozdělujeme dle šířky pracovní oblasti na:

- **Jednokvadrantní**
- **Dvoukvadrantní**
- **Čtyřkvadrantní**

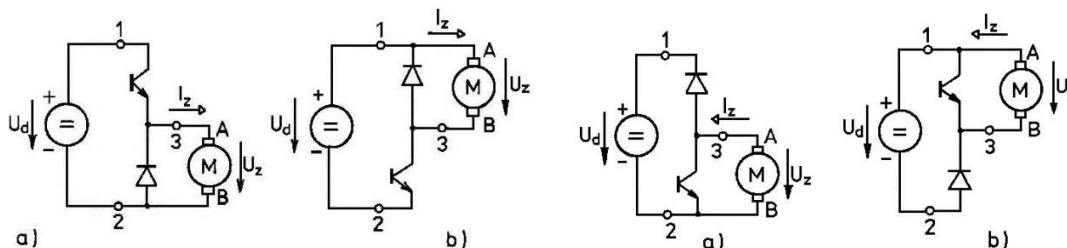
„Za předpokladu, že úhlová rychlost hřídele ω je úměrná indukovanému napětí U_i strojů (tedy přibližně napětí U_z), je zatěžovací moment M úměrný proudu I_z . Za těchto předpokladů můžeme rovině $U_z - I_z$ na obrázku (4-5) přiřadit analogicky rovinu $\omega - M$. Chování pohonu můžeme sledovat z hlediska mechanických veličin na hřídeli stroje.“ [12]



Obrázek 4-5: Znázornění pracovního diagramu [12]

4.5.1 Jednokvadrantní měnič

Umožňuje práci pohonu pouze v jednom kvadrantu $M-\omega$ charakteristiky. Připojený motor tedy funguje buď jako motor, nebo jako brzda. Toto zapojení neumožňuje rekuperaci. Motor může být připojen na vstup, nebo výstup výkonového spínacího prvku a musí být doplněn o nulovou diodu, která potlačuje vznik přepětí na indukčnosti motoru při zániku proudu di/dt .



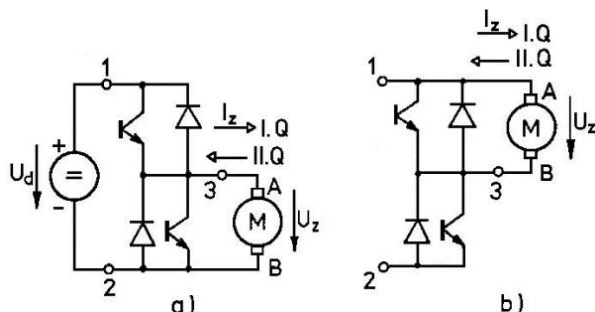
Obrázek 4-6: Měnič prac. v kvadrantu I [12] Obrázek 4-7: Měnič prac. v kvadrantu II [12]

U zapojení "brzda" je motor připojen k výkonovému prvku paralelně. Při rozepnutí výkonového prvku teče proud ze stroje do zdroje přes diodu. Při sepnutí prvku dochází k uzavření proudu přes spínací prvek a tedy k brždění motoru.

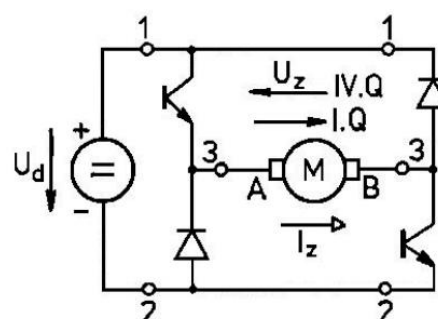
U jednokvadrantního měniče tedy nelze změnit směr přiloženého napětí, nebo toku proudu zátěží. Z těchto základních obvodů můžeme sestavit všechny typy následujících měničů. [12]

4.5.2 Dvoukvadrantní měnič

U tohoto typu lze vždy změnit směr pouze jedné veličiny, buď je tedy zachován pouze směr napětí a lze měnit proud – práce I. a II. kvadrant (obrázek 4-8), nebo lze měnit pouze směr napětí při zachování směru proudu – práce v I. a IV. kvadrantu (obrázek 4-9). Pohon tedy nelze reverzovat, lze pouze změnit režim motor-brzda.



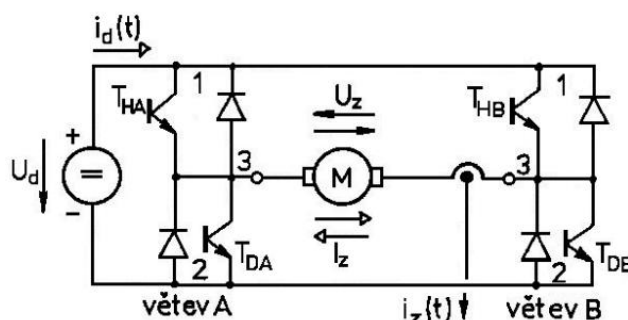
Obrázek 4-8: Měnič pracující v kvadrantu I. a II. [12]



Obrázek 4-9: Měnič pracující v kvadrantu I. a IV. [12]

4.5.3 Čtyřkvadrantní měnič

Čtyřkvadrantní měnič dovoluje měnit směry napětí i proudu. Můžeme tedy pohon libovolně reverzovat – generovat kladný moment a rychlost, nebo záporný moment a rychlost, nebo brzdít tedy generovat záporný moment při kladném směru točení a naopak.



Obrázek 4-10: Měnič čtyřkvadrantním [12]

Pro napájení dynamometru je toto nezbytné, a proto bylo i použito čtyřkvadrantního měniče.

4.6 Řízení spínání výkonových součástek měniče

- **Bipolární řízení:** Tranzistory jsou spínány v jedné nebo druhé úhlopříčce. Střída se pohybuje v intervalu $(-I; I)$. Je patrné, že výstupní napětí je bipolární a nabývá hodnot $-U_d$ nebo $+U_d$. Výstupní napětí nabývá celkem dvou hladin.
- **Unipolární řízení:** Tranzistory nejsou spínány současně v úhlopříčce, ale jsou spínány jednotlivě. Střída je rozdělena do dvou intervalů $(-I; 0)$ a $(0; I)$, interval je přiřazen k dané dvojici tranzistorů, která moduluje napětí a druhý pár je ve výchozím sepnutí (trvale jeden tranzistor). Výstupní napětí nabývá hodnot 0 nebo $+U_d$, v I. a II. kvadrantu – interval $(0; I)$, zatím co v III. a IV. kvadrantu – interval $(-I; 0)$ nabývá hodnot 0 nebo $-U_d$. Výstupní napětí nabývá celkem tří hladin. Tento způsob řízení je použit u realizovaného pohonu dynamometru. [12]

4.7 Pulzní řízení velikosti odporu

Pulzní řízení odporu se využívá především u pohonů s nerekuperačními pulzními měniči, kdy je třeba užít aktivního brzdění pohonu a přitom se zbavit brzděné energie. Takový měnič se nazývá brzdný *chopper* (nebo brzdný střídač) a užívá se ve spojení s brzdným výkonovým odporníkem, ve kterém je brzděná energie pohonu mařena v teplo. Sestava se poté chová jako proměnný odpor, závislý na zatěžiteli, neboli má

ekvivalentní odpor, říditelný v rozsahu ∞ až R pro napět'ový střídač a R až 0 pro proudový střídač. [1]

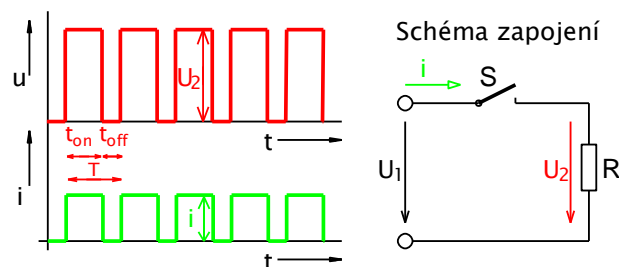
V případě, že je k dispozici zdroj napětí (napět'ový střídač se stejnosměrným meziobvodem – náš případ), je spínač S (tranzistor) zařazen do série s odporníkem R . Spínač S je obvykle řízen komparátorem (s hysterezí) napětí v meziobvodu měniče. Ve chvíli, kdy hodnota napětí v meziobvodu naroste na komparační mez, spínač spíná a odporem protéká proud: [1]

$$I_R = \frac{U_{DC}}{R} \quad (4-3)$$

Napětí klesá a po poklesu napětí pod spodní mez hystereze (typicky několik voltů) spínač vypíná. Komparátor tedy generuje logický signál o hodnotách 0 a 1 a napětí na odporu se mění v rozmezí 0 až U_{DC} . Pro ekvivalentní odpor R_e platí:

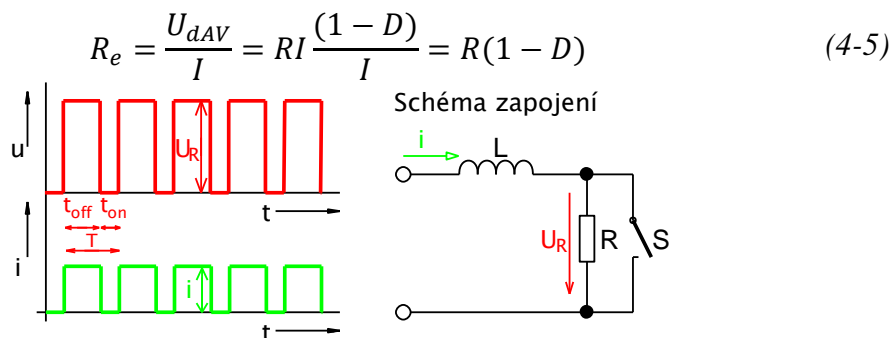
$$R_e = \frac{R}{D} \quad (4-4)$$

Kdy D je střída (zatěžovatel) definovaný poměrem doby zapnutí k periodě taktu dle vztahu (4-2). [1]



Obrázek 4-11: Pulzní řízení odporu se sériovým spínačem [1]

Při napájení ze zdroje proudu je situace opačná – odpor je ke spínači S připojen paralelně a ekvivalentní odpor je možné řídit v rozsahu 0 až R . Při sepnutém spínači teče obvodem konstantní proud daný proudovým zdrojem a napětí na odporu R je nulový. Ve chvíli rozepnutí spínače se proud obvodem nemění a na odporu vznikne úbytek napětí. Ekvivalentní odpor je dán vztahem: [1]



Obrázek 4-12: Pulzní řízení odporu s paralelním spínačem [1]

5 Zatěžování hnacích strojů

Hnací stroj připojen k pracovnímu stroji, je zatížen způsobem, který je pro danou aplikaci charakteristický. Jde především o mechanickou (momentovou) charakteristiku stroje a také druh zatížení hnacího stroje daný počtem startů v čase a proměnlivostí zatížení.

5.1 Momentové charakteristiky pracovních strojů

Každý pracovní, neboli hnaný stroj, je popsán svou mechanickou charakteristikou. Ta popisuje, jak se mění zátěžný moment pro hnací stroj v závislosti na otáčkách poháněného stroje. Charakteristika, která popisuje změnu výkonu v závislosti na otáčkách, je charakteristika výkonová. [3]

K popisu charakteristik:

$$\omega = f(M) \text{ a } \omega = f(P) \quad (5-1)$$

Mechanický výkon stroje:

$$P = \omega M \quad (5-2)$$

Rozeznáváme základní typy charakteristik:

- **Kalandrová** – Moment je na otáčkách závislý lineárně

$$M = b_1 \omega = konst. \text{ a } P = b_1 * \omega^2 \quad (5-3)$$

- **Ventilátorová** – Moment je na otáčkách závislý kvadraticky

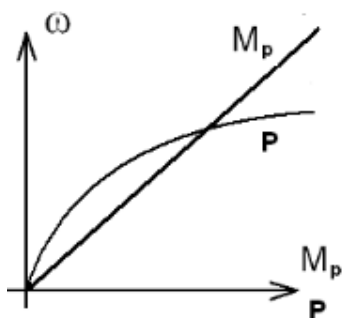
$$M = b_2 \omega^2 = konst. \text{ a } P = b_2 * \omega^3 \quad (5-4)$$

- **Navíječková** – Moment je nepřímo úměrný otáčkám

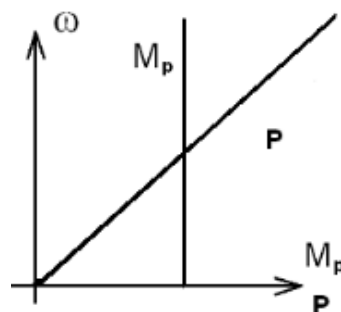
$$M = b_{-1} / \omega = konst. \text{ a } P = b_{0-1} \quad (5-5)$$

- **Jeřábová** – Moment je v celém rozsahu konstantní

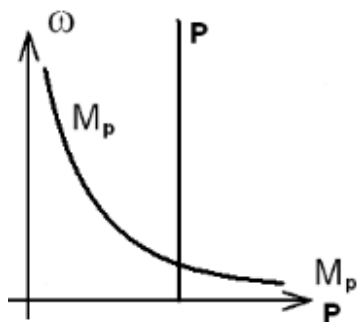
$$M = b_0 = konst. \text{ a } P = b_0 * \omega \quad (5-6)$$



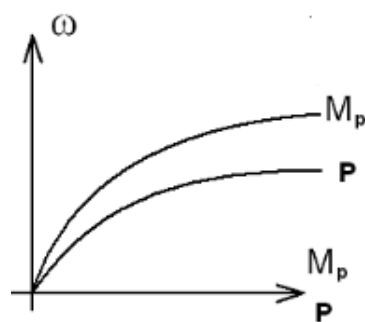
Obrázek 5-1: Kalandrová char. [3]



Obrázek 5-2: Jeřábová char. [3]



Obrázek 5-3: Navíječková char. [3]



Obrázek 5-4: Ventilátorová char. [3]

5.2 Druhy zatížení pracovních strojů

Druh zatížení pohonu má zásadní význam pro jeho dimenzování a je tedy i jednou z funkcí dynamometru, díky které bude možné otestovat správnost dimenzování pohonu při daném typu zatížení.

Typ zatížení stroje má zásadní podíl na oteplení stroje. Velikost ztrát způsobujících toto oteplení ovlivňuje zejména počet startů za hodinu, ale také počet brzdění a reverzací. Dle kritéria počtu sepnutí můžeme provoz zařízení rozdělit na následující druhy:

- **Lehký provoz:** 5 sepnutí za hodinu
- **Obyčejný provoz:** 6-15 sepnutí za hodinu
- **Těžký provoz:** 16-30 sepnutí za hodinu
- **Velmi těžký provoz:** nad 30 sepnutí za hodinu

Pokud je běžným provozem také častá reverzace, lze toto kritérium upravit na počet reverzací za hodinu. Většinu zatížení lze charakterizovat jako opakující se cyklus, tyto cykly se dle ČSN EN 60034-1 kvantifikují do devíti tříd: [3]

- **S1:** Kontinuální provoz
- **S2:** Krátkodobý provoz, kdy motor během dané doby dosáhne povolené tepelné hranice. Následující přestávka provozu musí být tak dlouhá, aby motor znovu nabyl okolní teplotu.
- **S3:** Provoz s přestávkami, sekvence stejných pracovních period, kde každá perioda se skládá z dílu s konstantním výkonem a dílu s přestávkou.
- **S4:** Provoz s rovnoměrně rozloženými starty, zátěžemi a přestávkami.
- **S5:** Provoz s rovnoměrně rozloženými starty, zátěžemi, brzděním nebo reverzním chodem a přestávkami.
- **S6:** Kontinuální pohon s periodickým zatěžováním a chodem naprázdno.
- **S7:** Provoz s rovnoměrně rozloženými starty, zátěžemi, brzděním nebo reverzním chodem bez přestávek.



- **S8:** Kontinuální pohon s občasným zatěžováním změnou otáček.
- **S9:** Kontinuální pohon s neperiodickým zatěžováním a změnami otáček. (typický provoz s frekvenčním měničem). [11]

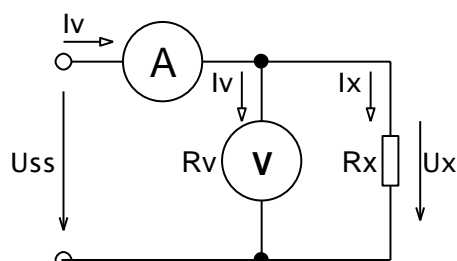
V algoritmu řízení dynamometru, který bude představen v následujících kapitolách, bude zařazena simulace provozu **S6** a **S8**.

6 Měření parametrů stejnosměrného stroje

Pro sestavení náhradního schématu stejnosměrného stroje bylo nutné změřit parametry reálného motoru. Poté je možné sestavit simulační model motoru, který se bude svým chováním přibližovat reálnému motoru. Tím můžeme simulační a reálné výsledky řízení porovnat. Odlišnosti výsledků mohou být způsobeny především zjednodušením modelu celé soustavy pohonu oproti reálné, zanedbáním některých jevů (např. oteplení motoru a střídače, reakce kotvy, odpor vodičů, přechodové odpory apod.) a také právě chybou měření parametrů motoru. Ta při měření nebyla uvažována, byly pouze provedeny určité korekce a ověření, které jsou popsány dále.

6.1 Měření odporu vinutí

Měření odporu vinutí bylo provedeno klasickou *Ohmovou metodou* pro měření malých odporů. Měřicí obvod tedy sestává ze stejnosměrného napájecího zdroje, ampérmetru a voltmetru, který je připojen přímo na svorky vinutí. Toto zapojení eliminuje chybu měření napětí vnesenou vnitřním odporem ampérmetru. Hodnotu odporu vypočteme z *Ohmova zákona* za předpokladu, že proud procházející vinutím je jmenovitým proudem I_N .



Obrázek 6-1: Schéma zapojení metody měření [9]

6.1.1 Měření odporu budícího vinutí

Odbor budícího vinutí většinou dosahuje hodnoty v řádu desítek až několika set ohmů. Výběr měřicí metody pro měření malých odporů je tedy správný. Napětí na vinutí měříme při protékajícím jmenovitým, ustáleném proudem a velikost odporu určíme z *Ohmova zákona*.

6.1.2 Měření odporu kotevního vinutí

Měření odporu kotevního vinutí R_a probíhá stejným způsobem jako měření budícího. Velikost proudu by měla, jako v předchozím případě, odpovídat jmenovité hodnotě kotevního proudu. Hodnota odporu kotevního vinutí (dále jen odpor kotvy) je



ovšem mnohánásobně nižší než odpor buzení, a to např. až stonásobně. Na tento fakt je důležité měření přizpůsobit vhodnou volbou měřících přístrojů.

6.2 Měření indukčnosti vinutí

Při měření indukčnosti vinutí využíváme elektromagnetického přechodového děje, tedy časové konstanty tohoto děje. Při skokové změně svorkového napětí (stejnosměrného), kterému odpovídá ustálený jmenovitý proud, se zaznamená průběh proudu osciloskopem. Z tohoto průběhu lze určit „časovou konstantu vinutí“ τ_v . Za předpokladu, že:

$$\tau_v = \frac{L_v}{R_v} \quad \text{Lze vyjádřit } L_v \text{ jako:} \quad L_v = \tau_v * R_v \quad (6-1)$$

Časovou konstantu určíme z průběhu jako dobu, za kterou proud dosáhne 63 % své ustálené hodnoty.

6.2.1 Měření indukčnosti budícího vinutí

Indukčnost budícího vinutí (dále jen indukčnost buzení) může dosahovat velikosti až jednotek *Henry*, a proto jsou i časové konstanty elektromagnetického přechodového děje nabuzení poměrně vysoké – řádově až stovky milisekund. Po zaznamenání průběhu přechodového děje proudu určíme časovou konstantu a velikost indukčnosti vinutí dle postupu popsaného v kap. (6.2).

6.2.2 Měření indukčnosti kotevního vinutí

Indukčnost vinutí kotvy zjišťujeme stejným postupem jako indukčnost budícího vinutí. Při měření je důležité dbát na velikost kotevního proudu, který má daleko vyšší hodnotu, u větších strojů i stovky ampér. Měření tedy předchází výběr vhodných měřících přístrojů a napájecího zdroje.

6.3 Měření konstanty motoru

Konstanta stroje $k\Phi$, která definuje vztah mezi statorem a rotorem stroje a od níž se odvíjejí možnosti výpočtu elektrického momentu a indukovaného napětí, je zjišťována měřením indukovaného napětí na kotevních svorkách stroje, který je roztočen na jmenovité otáčky a nabuzen jmenovitým proudem I_{fN} . Ze vztahu (2-4) lze odvodit jmenovitou konstantu stroje $k\Phi_N$.

$$k\Phi = \frac{U_i}{\omega} \quad (6-2)$$



Za předpokladu proměnného budicího proudu je funkce $k\Phi = f(I_f)$ přibližně lineární, dokud budícím proudem nedojde k nasycení magnetického obvodu stroje.

6.4 Měřený motor

Použitý motor k testování, u něhož byly měřeny následující parametry, je cize buzený stejnosměrný motor s pomocnými póly. Tvar motoru je *IM201*, tedy patkopřírubový motor s litinovou kostrou, třída krytí je v provedení *IP23*. Izolace vinutí je v teplotní třídě *F*. Ventilace motoru je cizí typu *IC416*, axiálním ventilátorem s asynchronním motorem, umístěná na *NDE* (*non-drive end*), na stejném místě je umístěné také tachodynamo s převodem $80 \text{ V}/1000 \text{ ot./min}$. Podobu štítku motoru, a tedy jeho jmenovité hodnoty, znázorňuje následující tabulka:

MEZ Brno Typ: MFE 112L 4,35 kW			
Napětí kotvy	220 V	Napětí buzení	170 V
Proud kotvy	23,6 A	Proud buzení	1,4 A
Jm. otáčky	1630 ot/min	Tacho	80/1000
IM 201, IP 23	ISOL: F	S1, BUZ: C	79 kg

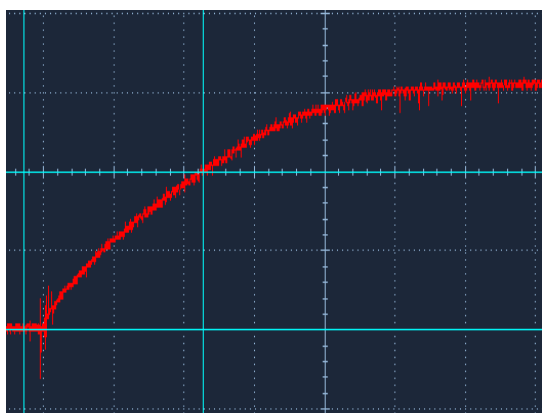
Tabulka 6-1: Štítek motoru

6.4.1 Naměřené údaje

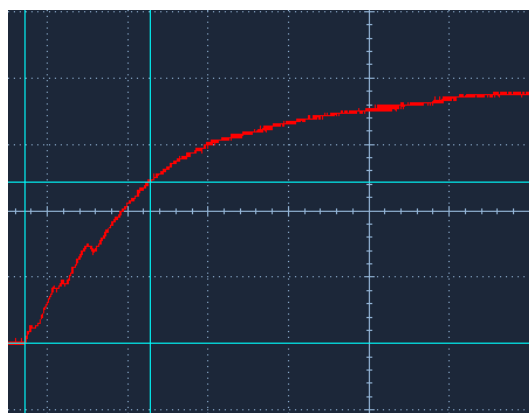
Popsanými postupy byly na motoru *MEZ* změřeny odpory obou vinutí, jejich indukčnosti a také průběh konstanty motoru $k\Phi$.

Budící vinutí:

- Odpor vinutí získaný měřením $R_f = 110,2 \Omega$ ($U_f = 162 \text{ V}$, $I_f = 1,47 \text{ A}$)
- Odpor vinutí vypoč. z údajů na štítku $R_{fN} = 121,4 \Omega$ ($U_{fN} = 170 \text{ V}$, $I_{fN} = 1,4 \text{ A}$)
- Indukčnost vinutí získaná měřením $L_f = 24,3 \text{ H}$ ($\tau_f = 0,2 \text{ s}$, $R_f = 121,4 \Omega$)



Obrázek 6-2: Průběh budicího proudu



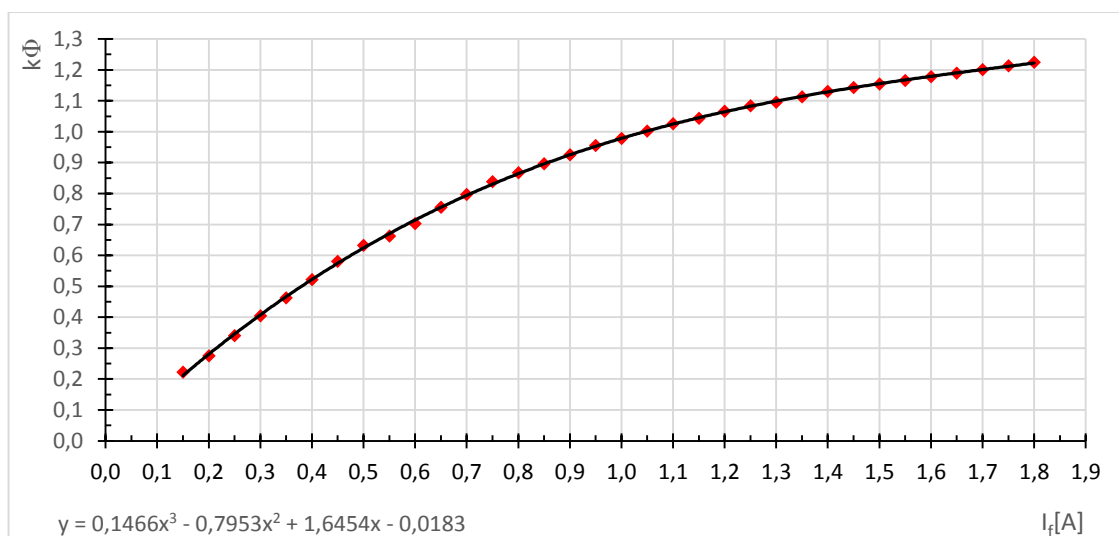
Obrázek 6-3: Průběh kotevního proudu

Kotevní vinutí:

- Odpor vinutí získaný měřením $R_a = 1,1 \Omega$ ($U_a = 20,6 \text{ V}$, $I_a = 20,6 \text{ A}$)
- Indukčnost vinutí získaná měřením $L_a = 0,11 \text{ H}$ ($\tau_a = 0,1 \text{ s}$, $R_a = 1,1 \Omega$)

Naměřená charakteristika $k\Phi = f(I_f)$:

- Konstantní otáčky $n = 1630 \text{ ot. /min.}$ což odpovídá $\omega = 171 \text{ rad.}$
- Měření indukovaného napětí U_i pro budící proudy v intervalu $0,15\text{-}1,8 \text{ A}$ s krokem $\Delta I_f = 0,05 \text{ A}$.



Graf 6-1: $k\Phi = f(I_f)$:

Naměřené hodnoty byly proloženy polynomem třetího stupně, který definuje rovnice:

$$y = 0,1466x^3 - 0,7953x^2 + 1,6454x - 0,0183 \quad (6-3)$$

Ze štítku motoru můžeme také určit jmenovitý moment stroje ze vztahu (2-6) a dostáváme jmenovitý moment $M_N 25 \text{ Nm}$.

Nyní jsou určeny všechny potřebné údaje o motoru, z nichž lze sestavit matematický model v prostředí *Simulink*. Tento model tvořil základ pro porovnávání simulačních a reálných výsledků a bude sloužit k ladění celé aplikace. Zároveň sloužil k prvotnímu testování jako měřící prvek a připojený dynamometr byl použit jako pohon s možností porovnání správnosti výsledků vypočteného momentu s údaji na momentové váze. Po odladění byl použit samotný stroj dynamometru, jeho změřené parametry jsou uvedeny v následující kapitole.

6.5 Parametry stroje finálního dynamometru

Pro finální realizaci bylo využito stávajícího výkyvného dynamometru, uloženého v ložiskových štítech, s mechanickým přenosem momentu na váhu. Motor dynamometru



je cize buzený, stejnosměrný stroj s cizí ventilací, radiálním ventilátorem s asynchronním motorem. Motor má izolaci v teplotní třídě B a je vyrobený podnikem MEZ ŽIDENICE v šedesátých letech minulého století. Jmenovité hodnoty stroje uvádí následující tabulka:

MEZ ŽIDENICE Brno Typ: TMN 16C P0118			
Napětí kotvy	220 V	Napětí buzení	220 V
Proud kotvy	32,6 A	Proud buzení	1,2 A
Jm. otáčky	1500 ot/min	Výkon	6,7 kW
FG1 HO	IC 416	S1, BUZ: C	r.v.1960

Tabulka 6-2: Štítek dynamometru

Stejně jako v případě předchozího motoru bylo provedeno měření vnitřních parametrů motoru s následujícími výsledky:

Budící vinutí:

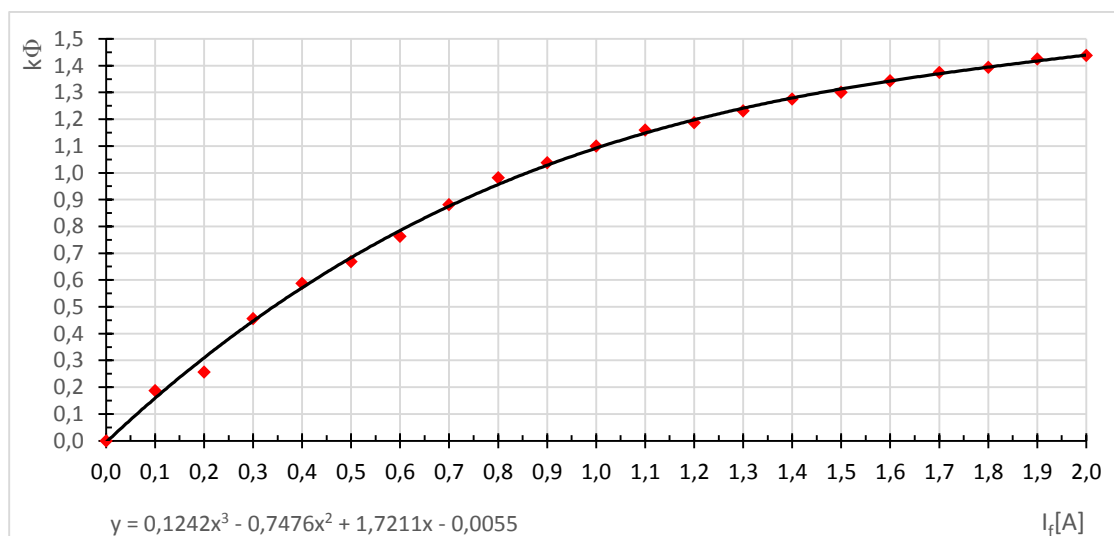
- Odpor vinutí vypoč. z údajů na štítku $R_{fN} = 183,3 \Omega$ ($U_{fN} = 220 \text{ V}$, $I_{fN} = 1,2 \text{ A}$)

Kotevní vinutí:

- Odpor vinutí získaný měřením $R_a = 0,679 \Omega$ ($U_a = 16,3 \text{ V}$, $I_a = 24 \text{ A}$)
- Indukčnost vinutí (s kotevní tlumivkou) získaná měřením $L_a = 0,038 \text{ H}$
($\tau_a = 0,056 \text{ s}$, $R_a = 0,679 \Omega$)

Naměřená charakteristika $k\Phi = f(I_f)$:

- Konstantní otáčky $n = 1500 \text{ ot./min.}$ což odpovídá $\omega = 157 \text{ rad.}$
- Měření indukovaného napětí U_i pro budící proudy v intervalu $0-2 \text{ A}$ s krokem $\Delta I_f = 0,1 \text{ A}$.



Graf 6-2: $k\Phi = f(I_f)$:

Naměřené hodnoty byly opět proloženy polynomem třetího stupně, který definuje rovnice:



$$y = 0,1242x^3 - 0,7476x^2 + 1,7211x - 0,0055 \quad (6-4)$$

Ze štítku motoru můžeme také určit jmenovitý moment stroje ze vztahu (5-2) a dostáváme jmenovitý moment $M_N = 42,7 \text{ Nm}$.

Pozn.: při měření indukčnosti kotevního vinutí byla do obvodu kotvy zařazena tlumivka potlačující zvlnění kotevního proudu v důsledku pulzního napájení, na které není takto starý stroj konstruován.



7 Užitá topologie řízení dynamometru

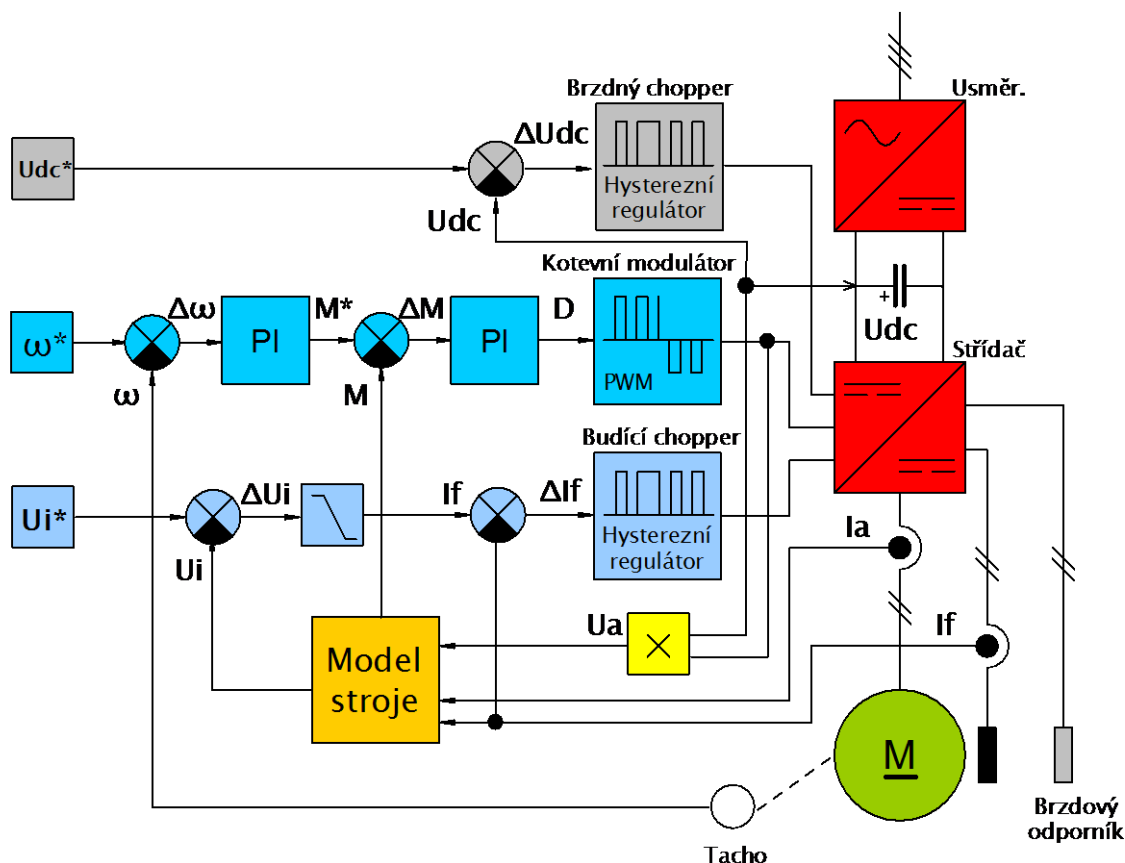
V této práci pracujeme s předpokladem, že použitý dynamometr, který bude číslicově řízen, je stejnosměrný, cize buzený motor s kompenzačním vinutím. Z vlastností stroje vyplývá, že jeho výkon resp. jeho otáčivá rychlost a moment může být řízen velikostí kotevního napětí (při konstantním buzení), tokem (změnou buzení při zachování konstantního kotevního napětí po spuštění stroje), nebo kombinací obojího, kdy je rychlost a moment plně nabuzeného stroje nejprve řízena velikostí kotevního napětí a poté při požadavku na vyšší otáčivou rychlost se přechází k odbuzování stroje. Odbuzování může řídit obsluha ručně, nebo je regulováno v závislosti na matematicky rekonstruovaném indukovaném napětí stroje. V tomto případě bylo využito kombinovaného řízení s možností manuálního i automatického odbuzování.

Chování dynamometru vysvětluje následující blokové schéma pohonu, které je složeno z dílčích bloků, které zabezpečují rychlostní a momentovou regulaci, funkci aktivní zátěže, funkci periodického zatěžování dle tříd *S6* a *S8* a automatické měření připojeného stroje. Zároveň zabezpečují bezpečné spuštění a odstavení dynamometru, uživatelsky přívětivé ovládání a funkce havarijních ochran.

7.1 Blokový popis užitého způsobu řízení

Na obrázku níže je zjednodušené blokové schéma použitého řízení stejnosměrného dynamometru. Dílčí části schématu jsou od sebe barevně odlišeny. Silová část (usměrňovač a střídač) – měnič je zvýrazněna červenou barvou. Samotný stroj je zvýrazněn zeleně.

Šedá linie zvýrazňuje řízení brzdného odporu, to funguje na principu regulace napětí v meziobvodu měniče U_{dc} hysterezním regulátorem na maximální dovolenou hodnotou U_{dc}^* . Regulátor generuje pulzy pro brzdny chopper. Pokud je odchylka ΔU_{dc} vyšší, než šířka hysterezního pásma (5 V), tranzistor spíná, pokud nižší, vypíná.



Obrázek 7-1: Zjednodušené blokové schéma pohonu

Dvě modré linie znázorňují regulace veličin týkajících se motoru. Jedná se o otáčkovou (momentovou) kotelní regulaci (světle modrá) a regulaci buzení stroje s odbuzováním (tmavě modrá).

Regulace otáček je kaskádní regulací, zahrnující v sobě primární regulaci otáček PI regulátorem a sekundární smyčku regulace momentu. Otáčky jsou měřeny tachodynamem, ale lze využít i jiného typu čidla, např. inkrementálního snímače. Sekundární regulace momentu využívá k regulační odchylce rekonstruovaného momentu z modelu stroje a referenční hodnoty generované výstupem otáčkového regulátoru. Momentovou referenci lze též použít z jiného zdroje a řídit stroj momentově, nebo např. matematickou závislostí na otáčkách, což bude popsáno v následující kapitole.

Regulace budícího proudu je založena na dvoustavovém regulátoru s hysterezí, prakticky jde o komparátor s hysterezí, který porovnává měřenou hodnotu budícího proudu a referenční a přímo generuje sepnutí pro střídač, a tím udržuje budící proud I_f v nastaveném hysterezním pásmu $\pm \Delta I_f$. Referenční hodnota budícího proudu I_f^* závisí na velikosti odbuzení stroje. To pracuje na principu porovnávání aktuálního indukovaného napětí U_i vypočteného v modelu stroje a referenčního indukovaného napětí. Při určité



velikosti schodku mezi těmito hodnotami započne lineární odbuzování snižováním proudu z jeho jmenovité hodnoty až na minimální přípustnou úroveň. [2]

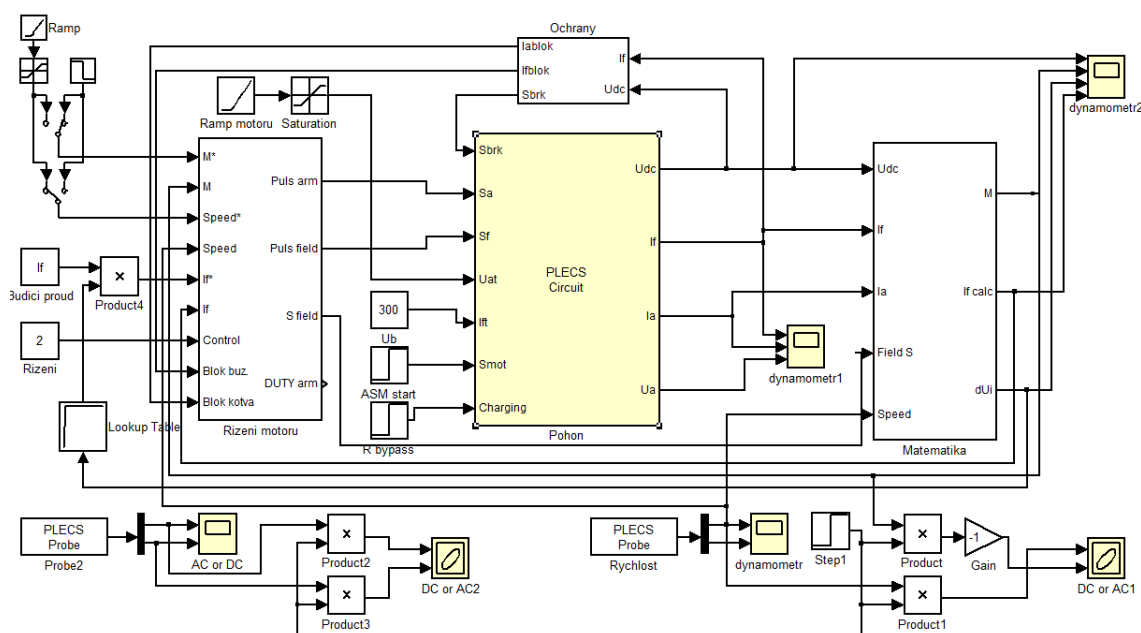
Poslední oranžový blok – model stroje je blokem založeným na matematickém popisu stroje z kap. (2). Z měřených veličin (napětí, proud a otáčky) dochází k výpočtu momentu, indukovaného napětí, ale později i dalších veličin, které jsou nutné k řízení stroje a jeho vizualizaci.

8 Sestavení modelu

Matematický model celého systému je vytvořen v prostředí *MATLAB Simulink*, konkrétně za pomoci *toolboxu PLECS*. Jedná se o nadstavbu obsahující vše potřebné k simulaci pohonných soustav, elektroniky a výkonové elektroniky. Součástí je rozsáhlá knihovna matematických funkcí, měřících přístrojů, funkčních bloků (střídače, usměrňovače...), motorů, generátorů funkcí, modulátorů, knihoven pro modelaci tepelných dějů, mechanických dějů a mnoho dalších.

8.1 Popis sestaveného modelu:

Základní model je sestaven v programu *MATLAB Simulink* s využitím knihovny od firmy *Plecs*. V *Simulinku* je vytvořen blok (*PLECS Circuit*), který obsahuje diskretní model střídače a motoru. Samotný diskretní model řízení je realizován přímo v *Simulinku*. Veškeré konstanty, se kterými model pracuje, jsou definovány v inicializačním souboru pro hlavní soubor *Simulinku*.



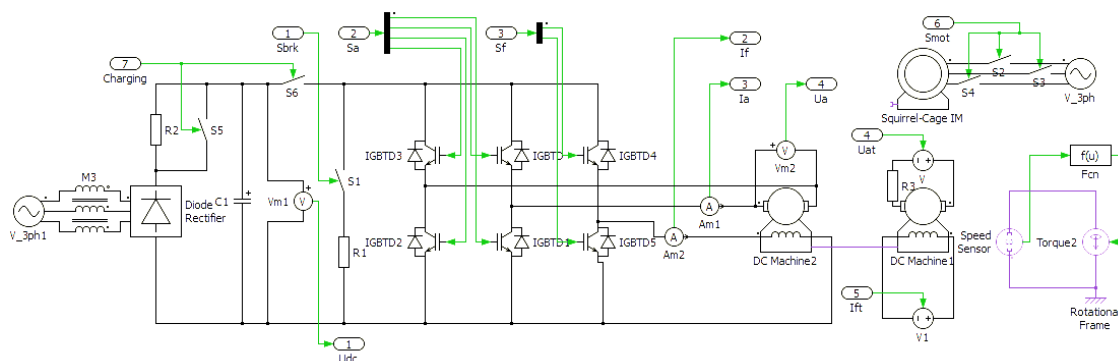
Obrázek 8-1: Celá soustava v prostředí Simulink

Hlavní model sestává z těchto hlavních částí:

- Model střídače a stejnosměrného motoru na spol. hřídeli s asynchronním motorem
- Model stejnosměrného motoru
- Blok regulátorů momentu a magnetického toku
- Blok mechanické charakteristiky
- Blok ochran
- Prostředky měření a odbuzování

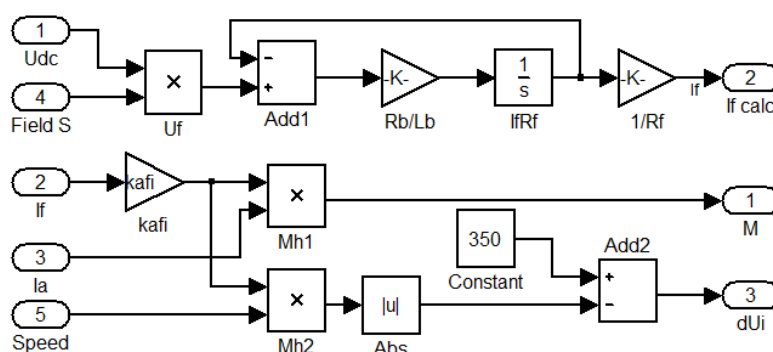
Model střídače a stejnosměrného motoru spojeného s asynchronním motorem je modelován výhradně v prostředí *PLECS* i s měřením veličin potřebných pro výpočet v matematickém modelu stroje a později v signálovém procesoru. Jedná se o kotevní H-můstek (kap. 4.5.3) a budící *chopper* (jednokvadrantní měnič pracující v prvním kvadrantu kap. 4.5.1) s napájením na společné sběrnici.

Stejnoseměrný motor je parametrizován tak, aby dle kapitoly 6 mohla být provedena srovnávací analýza simulace s reálným řízením. Ostatní stroje mají nastavené výchozí parametry dle knihovny *PLECS* a slouží k testování řízení (tj. zatěžování a pohánění dynamometru podle nastaveného módu řízení).



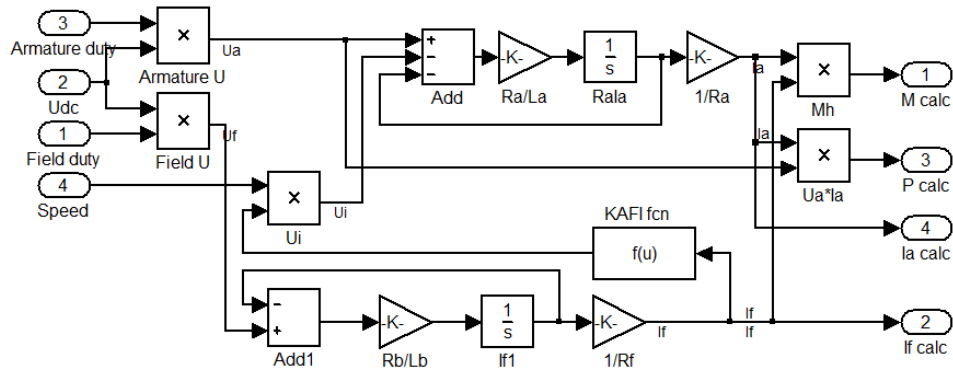
Obrázek 8-2: Výkonová a mechanická soustava v prostředí PLECS

Model stejnosměrného motoru je proudového typu s odhadem momentu výpočtem dle konstanty $k\Phi$. Statorový magnetický tok není počítán, neboť je budící proud udržován regulátorem na předepsané hodnotě. Výpočet momentu probíhá dle vztahu (2-5).



Obrázek 8-3: Proudový model stejnosměrného motoru

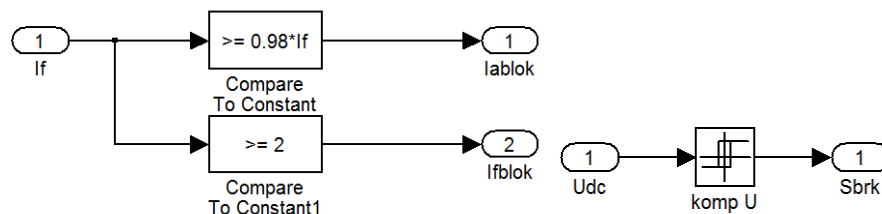
Proudový model se ukázal jako nejefektivnější a nejjednodušší cesta ke zjištění elektrického momentu oproti napěťovému modelu, který dle parametrů náhradního schématu stroje proud a moment vypočítává.



Obrázek 8-4: Napěťový model stejnosměrného motoru s cizím buzením

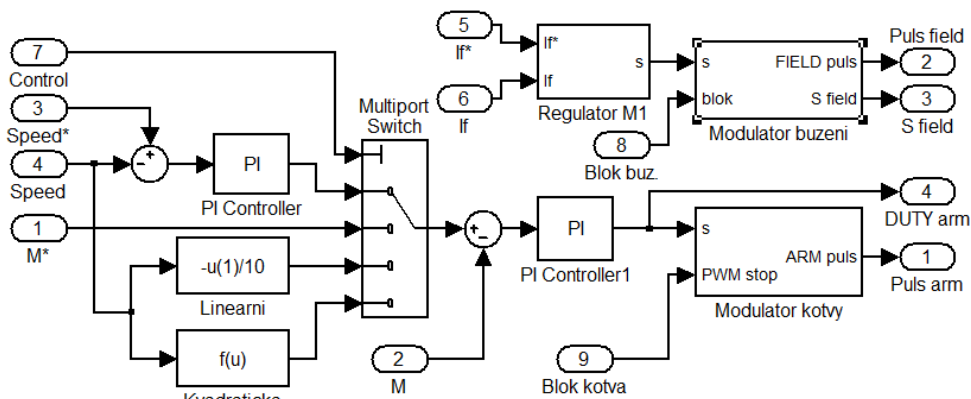
Tento model by byl vhodný spíše pro nenáročné aplikace, protože vstupy jsou pouze napětí v meziobvodu a pulzy střídačů, tím lze vypočítat kotevní a budící napětí a určit kotevní a budící proud. Algoritmus je ale velmi náchylný na přesnost měření a výpočet napětí a zároveň také velmi závislý na určených parametrech motoru. Ochrany lze zaimplementovat jen velmi obtížně, protože měření proudu neprobíhá a celé řízení se může stát značně nespolehlivé a nebezpečné.

Blok regulátorů sestává ze dvou *PI* regulátorů, které regulují kotevní proud změnou střídavy *PWM* modulace. Budící proud je regulován hysterezním regulátorem v nastaveném pásmu.



Obrázek 8-5: Náhled ochrany kotvy a buzení (vlevo) a ovládání brzdného chopperu (vpravo)

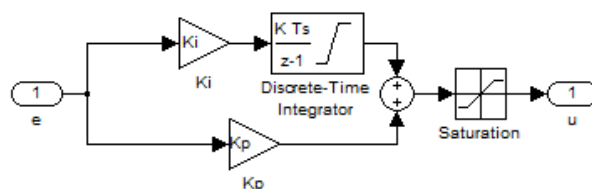
Kotevní obvod je vybaven ochranou proti spuštění, pokud není stroj nabuzen, aby nedošlo rozeběhnutí stroje na vysoké otáčky vlivem zbytkové remanence statoru. Zároveň je blokována regulace kotvy i v případě ztráty buzení.



Obrázek 8-6: Blok regulátorů momentu a toku

Aby měl zatěžovací moment dynamometru předepsanou charakteristiku, je referenční moment regulátoru získáván jako funkce otáček společné hřídele soustrojí. Setrvačný moment je definován přímo ve vlastnostech stejnosměrného stroje. Maximální hodnota referenčního momentu je omezena blokem saturace, aby nedošlo k přetížení motoru.

PI regulátory jsou jednoduchého typu, vycházející z definice. Integrační člen pracuje s diskrétním integrátorem bez resetu. Výstup celého bloku je saturován blokem „saturace“ omezujícího maximální a minimální hodnotu akční veličiny. Konstanty K_i a K_p definují integrační a proporcionální zesílení. Blok regulátoru je maskován uživatelskou maskou s přímým nastavením jeho parametrů.



Obrázek 8-7: Detail *PI* regulátoru

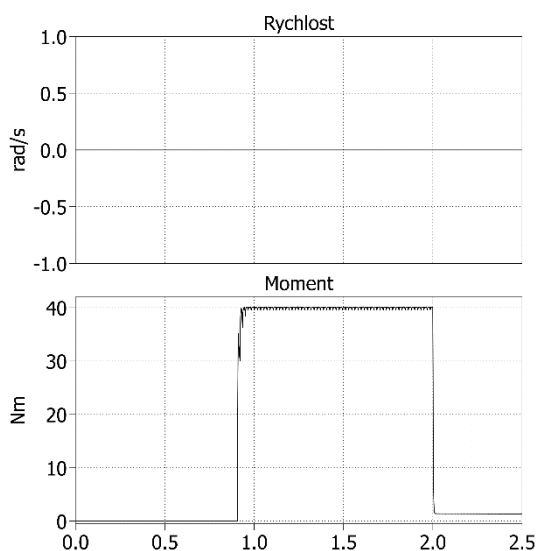
Model tedy umožňuje řízení stejnosměrného dynamometru v otáčkovém i momentovém režimu s různými druhy vstupních referencí, které jsou mezi sebou vzájemně přepínatelné, stejně jako samotný způsob řízení.

9 Simulace modelu

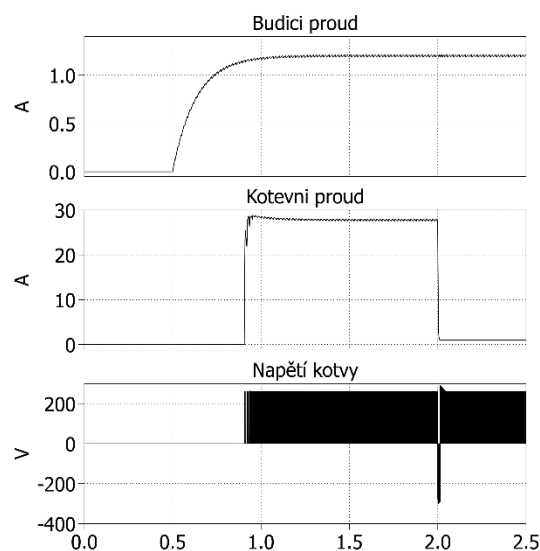
Simulace se prováděla ve spojitě oblasti v prostředí *Simulink* s rozšířením *PLECS*. Jako *solver* byl použit *ode45(Dormand-Prince)* a vzorkovací perioda byla omezena v intervalu $5e-4 - 1e-3$ při přesnosti $1e-3$. Model byl sestaven tak, aby bylo dosaženo co možná nejpřesnějšího dosažení žádaných veličin s dobrou časovou odezvou. To je úlohou především *PI* regulátorů kotevního střídače, které byly laděny dle odezvy na jednotkový skok, a to jak primární regulátor otáček, tak i sekundární regulátor momentu. Tato reakce se vždy sledovala v motorickém režimu.

9.1 Ladění *PI* regulátorů

Sekundární *PI* regulátor byl laděn za předpokladu, že maximální moment, který může stroj poskytnout je 40 Nm . To odpovídá maximální regulační odchylce a v takovém případě se požaduje střída *PWM* modulace rovna jedné. Proporcionální konstantu K_{pM} momentového regulátoru lze tedy získat podílem těchto hodnot, čemuž odpovídá hodnota $K_{pM} = 0,02$. Integrovaná konstanta K_{iM} je po nastavení proporcionální zvyšována tak dlouho, dokud nedojde ke kompenzaci regulační odchylky na nulovou hodnotu, v tomto případě je $K_{iM} = 0,2$. Při naladěném regulátoru vypadá momentový skok při zabrzděném rotoru následovně:



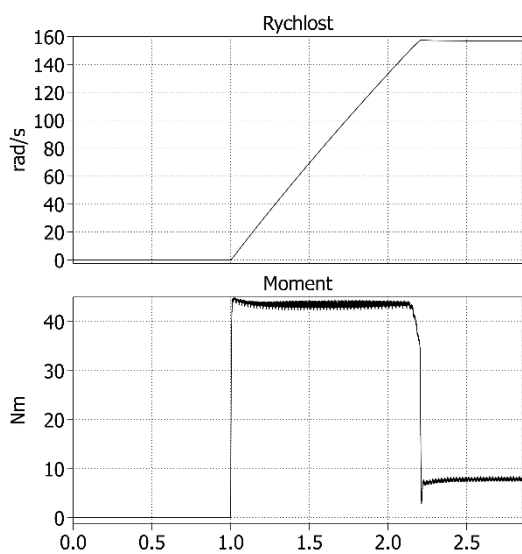
Obrázek 9-1: *M* skok: rychlost a moment



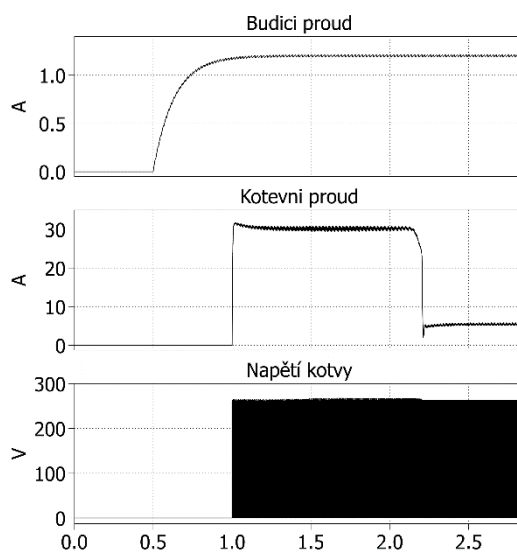
Obrázek 9-2: *M* skok: průběhy *U* a *I*

Regulace probíhá s minimálním překmitem žádaného momentu, zvlnění momentu je způsobeno zvlněním kotevního proudu vzhledem k pulznímu napájení. Povšimněme si, že kotevní střídač není v provozu, dokud není stroj plně nabuzen.

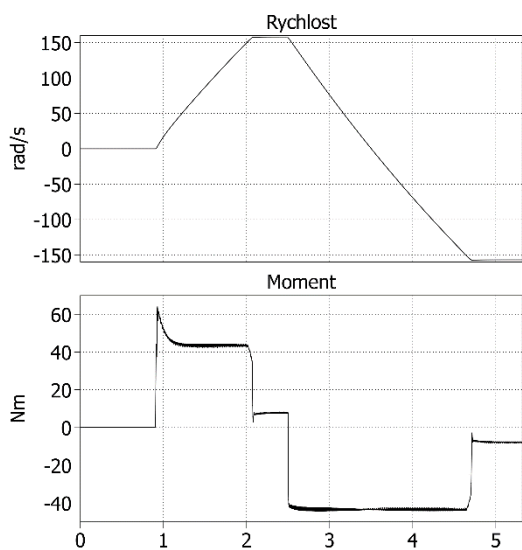
Primární *PI* regulátor rychlosti byl laděn za předpokladu, že při maximální možné odchylce regulace rychlosti, která je rovna jmenovité rychlosti 1500 ot/min (157 rad/s), musí odpovídat maximálnímu požadavku pro momentový regulátor, a to 40 Nm . Proporcionální konstanta by tedy měla mít hodnotu $K_{pN} = 0,26$, ale vzhledem k velikosti setrvačného momentu soustrojí se ukázalo jako nejvhodnější zvolit $K_{pN} = 2$, což je hraniční hodnota oscilace regulace. Ta je kompenzována integrační konstantou $K_{iN} = 0,02$. Při naladěném regulátoru vypadá otáčkový skok na 170 rad/s při chodu naprázdno následovně:



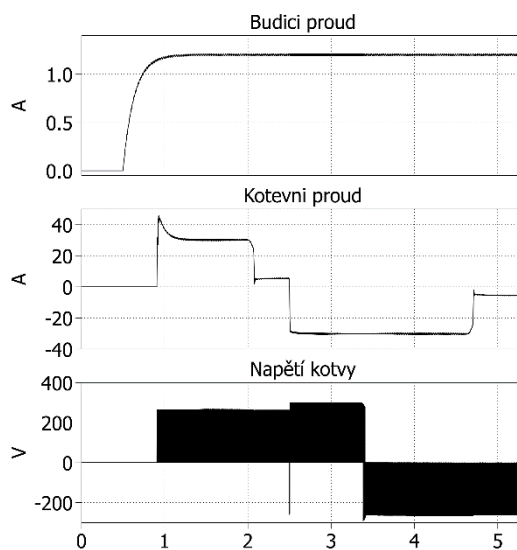
Obrázek 9-3: N skok: rychlost a moment

Obrázek 9-4: N skok: průběhy U a I

Doba rozběhu na žádané otáčky je přibližně $2,5 \text{ s}$ při momentu setrvačnosti $J = 0,3 \text{ kgm}^2$ s 1% překmitem. Rozběh na rychlost 157 rad/s skokem a průběh skokové reverzace pohonu vypadá takto:

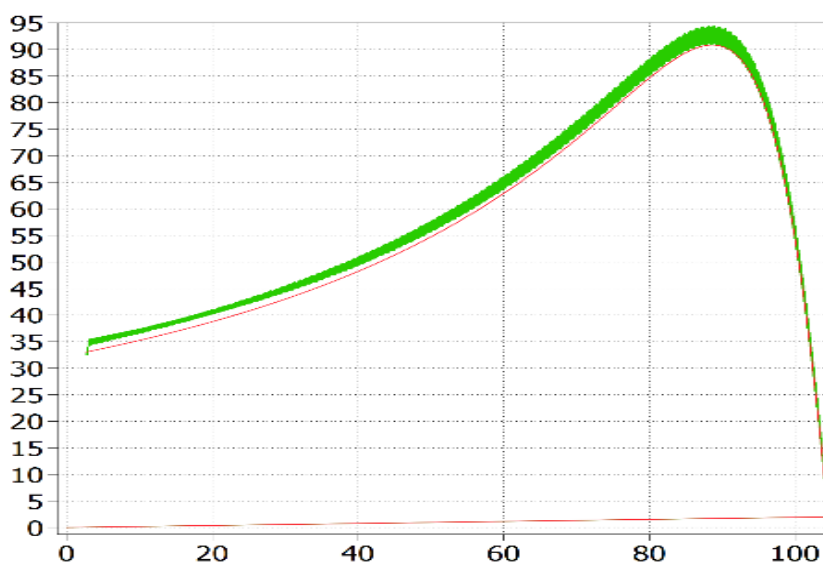


Obrázek 9-5: N reverzace: rychlost a moment

Obrázek 9-6: N reverzace: průběhy U a I

9.2 Simulace automatického měření motoru

Prvotní pokusy o zprovoznění automatického měření motoru probíhaly také na simulační rovině. V tomto případě je nutné vycházet z předpokladu, že měření by mělo započít z ustáleného stavu, kdy je moment nulový a nedojde tedy k prudkému mechanickému a proudovému rázu. Aby byla proměřena požadovaná část charakteristiky stroje, je zapotřebí nejlépe lineární změny definičního oboru funkce charakteristiky.



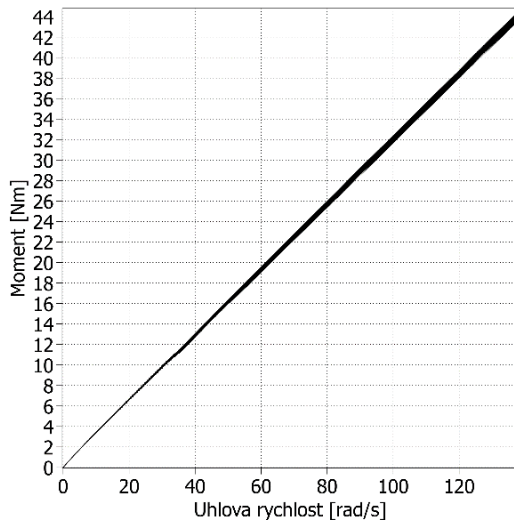
Obrázek 9-7: Výsledek simulace měřené momentové charakteristiky ASM s kotvou nakrátko (osa x: úhlová rychlost [rad/s], osa y: moment [Nm])

Výsledek simulace je patrný z obrázku (9-7) kde zeleným průběhem je vypočtený elektromechanický moment dynamometru a červeným elektromechanický moment ASM. Z průběhu můžeme určit, že se jedná o šestipólový stroj s momentem zvratu 90 Nm při rychlosti 90 rad/s. Odchylka mezi průběhy je způsobena ztrátami, které nejsou započteny (třecí momenty obou strojů).

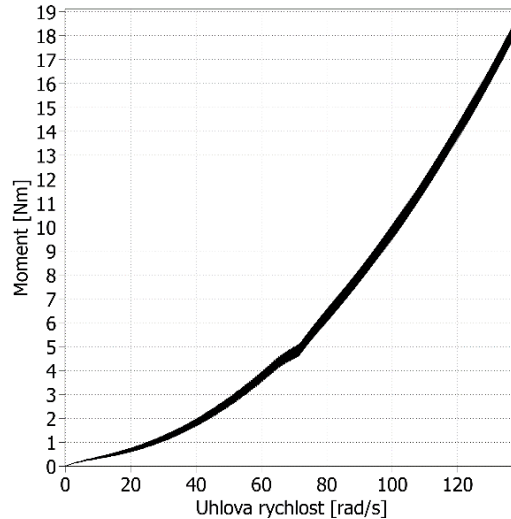
9.3 Simulace elektrické zátěže

V modelu byla testována vlečná regulace momentu závislá na otáčkách dle matematické funkce nebo tabulce hodnot. V tomto případě (jak již bylo zmíněno) se dynamometr chová jako pracovní stroj. Simulací bylo testováno řízení momentu tak, aby výsledná mechanická charakteristika odpovídala lineárnímu a kvadratickému typu. Tento algoritmus byl dále rozvíjen v praktické části práce.

Na obrázcích níže je vyobrazena simulace zatížení stejnosměrného motoru dynamometrem. Motor je spouštěn nabuzený, lineárním zvyšováním kotevního napětí. Motor dosahuje maximální rychlosti 138 rad/s.



Obrázek 9-8: Lineární charakteristika



Obrázek 9-9: Kvadratická charakteristika

Lineární charakteristika je popsána rovnicí:

$$M = 9,55 \frac{\omega}{30} \quad (9-1)$$

Kvadratická charakteristika je popsána rovnicí:

$$M = 9,55 \frac{\omega^2}{10^4} \quad (9-2)$$

V ustáleném stavu je moment 44 Nm při lineární zátěži, 19 Nm při kvadratické zátěži. Zvlnění momentu je přibližně 1 Nm a závisí na několika faktorech, který mi jsou: nastavení PI regulátoru, moment setrvačnosti a nastavená hystereze regulace budícího proudu.

Simulace dalších typů zátěže, tříd zatížení apod. již nebyly prováděny, neboť byly vyvíjeny až po implementaci modelu na reálný pohon. Některé části praktického modelu se tedy v tomto simulačním nevyskytují, protože byly přidávány postupně při jeho testování spolu s dalšími funkcemi. Tento model tedy poskytuje pouze základ pro budoucí řízení, které je podrobněji popsáno v následujících kapitolách.

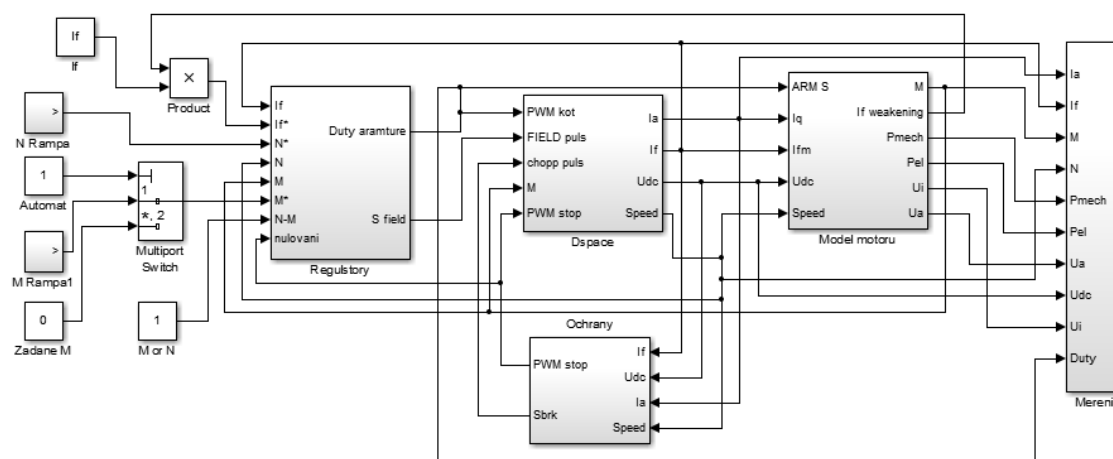
10 Realizace modelu systémem dSpace

Systém *dSpace* je stěžejním komponentem při testování sestaveného modelu v praxi, jelikož disponuje řadou vstupních a výstupních zařízení od průmyslových sběrnic až po analogové vstupy a výstupy. Je tedy ideálním nástrojem pro ladění a testování v laboratorních podmínkách i díky možnosti vizualizace pochodů, které v připojeném zařízení probíhají.

Program je uložen v řídicí jednotce, ta je *UTP* kabelem propojena s počítačem, ze kterého je nahrán řídicí program. Měření a komunikace s připojeným zařízením obstarává rozhraní připojené k řídicí jednotce. Model v *Simulinku* je přeložen do programu pro řídicí jednotku podobnému jazyku *C*. Jednotlivé proměnné je možné implementovat do vizualizačního nástroje *ControlDesk*, kde je možné vytvořit vizualizaci a řízení připojeného zařízení (sledování důležitých parametrů, ovládání apod.).

10.1 Podoba modelu pro systém dSpace

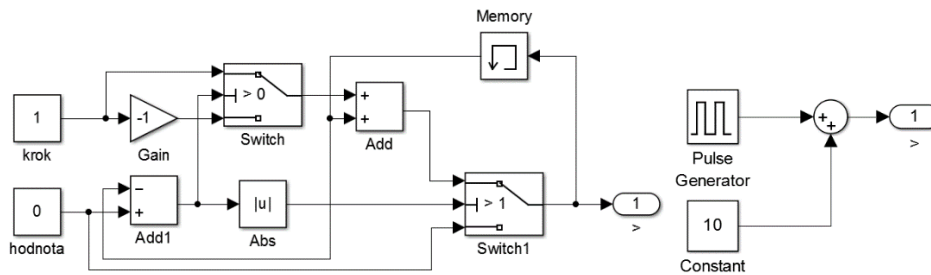
V modelu zůstaly zachovány všechny řídicí části, pouze model motor-měnič byl nahrazen blokem *dSpace*, ve kterém se nacházejí bloky měřící potřebné veličiny z měřicího rozhraní a ovládající střídač. Pro měření veličin je použito čtyř analogových napěťových vstupů (*AD* převodníků, rozsah $-10\text{ V} - +10\text{ V}$), které se obsluhují pomocí bloku v *Simulinku*, každé čtyři kanály jsou multiplexovány.



Obrázek 10-1: Hlavní model

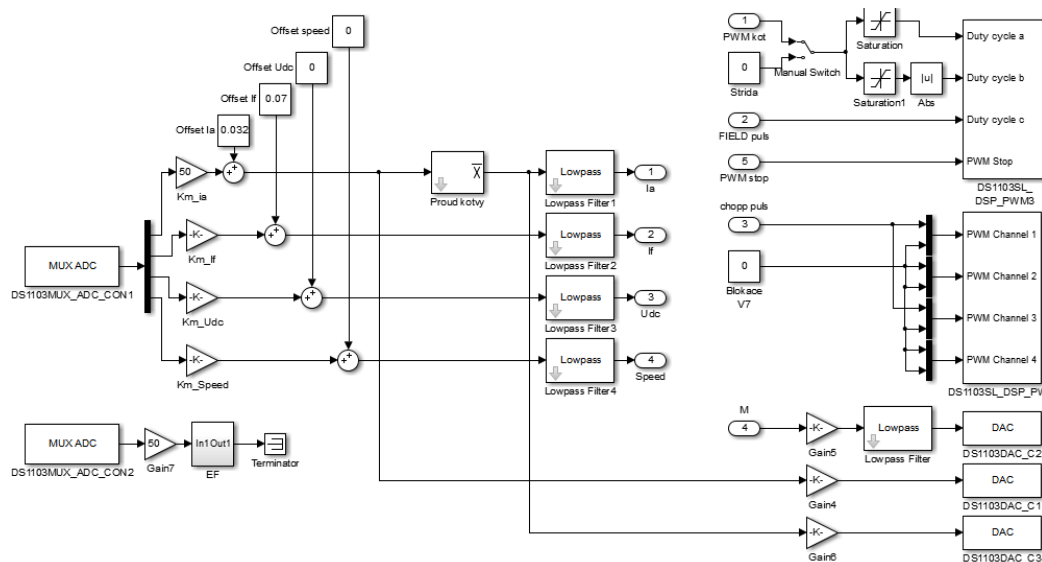
Jako vstup referenční hodnoty lze využít rampy a generátoru periodického zatížení. Rampa pracuje na porovnávání velikosti kroku a koncové hodnoty s aktuální, podle toho přepínače vyhodnotí, zda bude hodnota propsána na výstup přímo, nebo zda projde rampou a bude se zvyšovat definovaným krokem. Generátor periodického zatížení

je založen na pulsním generátoru a s regulovatelným *offsetem*, který určuje rozptyl zatěžovacího momentu.



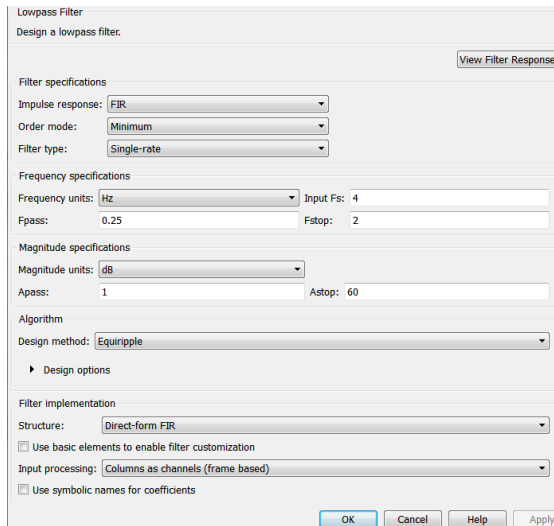
Obrázek 10-2: Generátor rampy a periodického zatížení

Hlavní model vychází ze simulačního, s výjimkou bloku *dSpace*, jehož útroby odhaluje další obrázek:

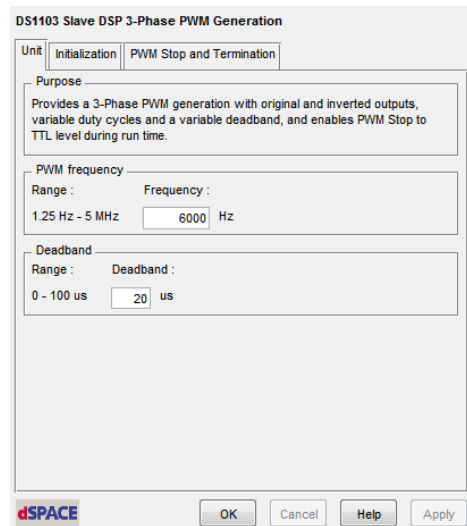


Obrázek 10-3: Blok *dSpace* (měření a řízení PWM)

V bloku *dSpace* probíhá obsluha a zpracování měřených signálů z bloku *MUX_ADC* za použití převodních konstant z měřícího rozhraní, kompenzace *offsetu* měření a filtrace *LP* filtry s šířkou pásma od 0,25-2 Hz. Filtr byl vložen jako hotový blok z knihovny *Simulink* a jeho uživatelská maska je na obrázku (10-4). Zavedené jsou i *DA* převodníky (blok *DAC*) pro možnost sledování dějů v modelu na osciloskopu připojenému k platformě. Hlavními výstupy jsou modulátory *PWM* řízené z nadřazených bloků regulace změnou velikosti střídy. Nosná frekvence, *dead-time* a *offset* jsou nastaveny pevně přímo v bloku *PWM* knihovny *dSpace*. Nosná modulační frekvence je konkrétně 6 kHz. Možnosti nastavení znázorňuje obrázek (10-5).

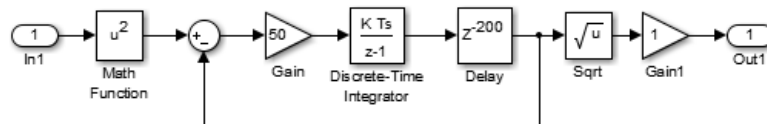


Obrázek 10-4: Nastavení LP filtru

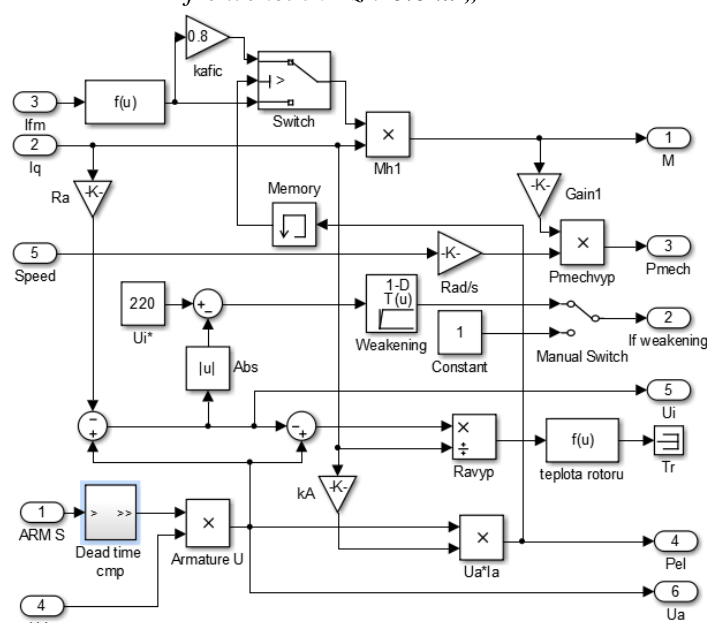


Obrázek 10-5: Nastavení PWM modulátoru

Při měření připojeného stroje dynamometrem je často důležitým parametrem průběh napájecího proudu. Při měření střídavého stroje, který je napájen harmonickým průběhem proudu je, nutné tento průběh matematicky transformovat na efektivní hodnotu, tu zajišťuje blok „EF“. Využitý výpočet vychází z definice efektivní hodnoty, avšak je nutné jej upravit pro výpočet vzorkovaného signálu o vzorkovací periodě 10^{-5} s. Výpočet je tedy doplněn o zásobník, tvořený integrátorem a zpožďovacím obvodem o násobek frekvence periody měřeného signálu – v tomto případě 200 vzorků.

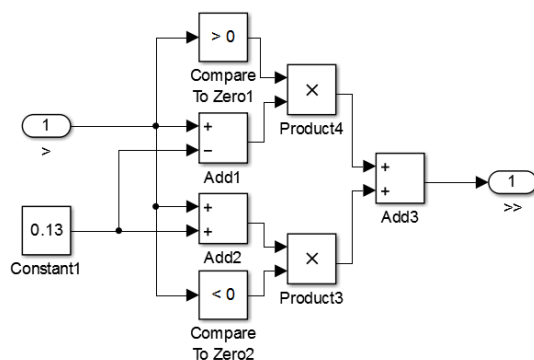


Obrázek 10-6: Výpočet efektivní hodnoty harmonického průběhu vzorkovaného signálu pro frekvenci 50Hz v bloku „EF“



Obrázek 10-7: Blok modelu motoru

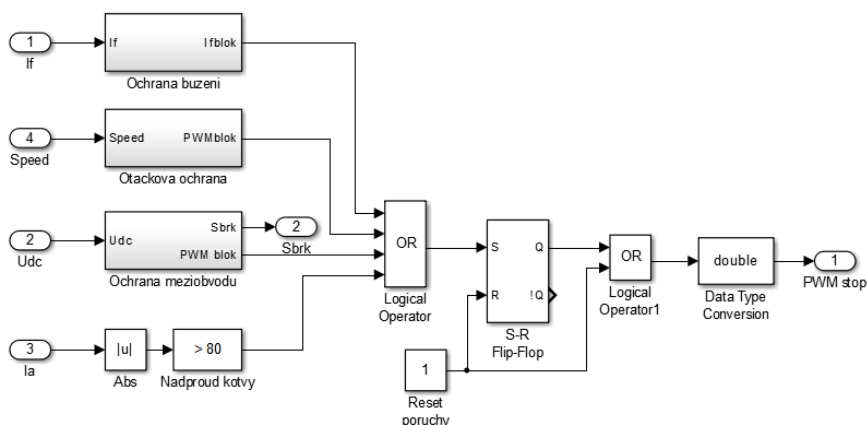
Model motoru je upraveným simulačním modelem rozšířeným o výpočet elektrického a mechanického výkonu stroje, budicího proudu a teploty rotorového vinutí (ve vývojové fázi) a indukovaného napětí. Protože je poměrné otevření H-můstku posunuto o nutnou mrtvou dobu, byl navržen také stavový automat, který při výpočtu kotevního a indukovaného napětí kompenzuje tento *offset*. Protože je řízení střídače bipolární, komparátory porovnávají, zda je zatěžovatel větší, nebo menší nule a poté dojde k přičtení kompenzační konstanty.



Graf 10-1: Automat kompenzující mrtvou dobu

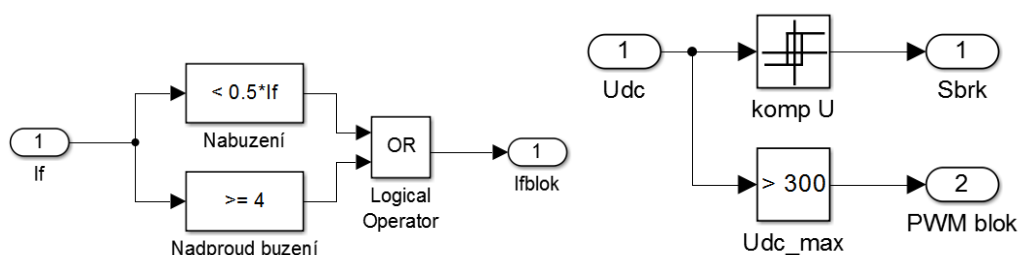
Další kompenzační funkce je implementována do části výpočtu toku stroje. U reálného dynamometru se totiž v motorickém režimu objevuje reakce kotvy, která jej odbuzuje a hodnota vypočteného momentu tedy nekoresponduje se skutečnou. Rozhodovací funkce určí, podle směru toku el. výkonu, zda má výpočet kompenzovat vynásobením konstantou *kafic* či nikoliv.

Důležitou součástí pohonu jsou ochrany, které zabraňují havárii stroje, tepelným účinkům nadproudu a zkratu. Chrání obsluhu před zasažením účinkům havárie. U stejnosměrného motoru je to především kontrola nabuzení stroje před přivedením napětí na kotvu, náhlé odbuzení, nadproud buzení a nadproud v obvodu kotvy. Zavedena je samozřejmě i otáčková ochrana. Ochrany jsou porovnávacího typu.



Obrázek 10-8: Ochrany

Navržený pohon disponuje kontrolou nabuzení stroje, nadproudem buzení, kotvy a ztrátou budícího proudu. Všechny tyto události blokují spuštění kotevní *PWM*. Pokud k poruše dojde, je zaznamenána *R-S* klopným obvodem, a uživatel musí provést ruční reset pohonu do stavu připravenosti. Ochranu samotného střídače tvoří hysterezní regulátor *komp_U* brzdného *chopperu*, který v případě generátorického chodu stroje nedovolí zvýšení napětí v meziobvodu nad hodnotu, která by ohrozila kondenzátory, izolaci stroje a spínací součástky. Pokud by došlo k havárii na brzdném odporu a hodnota napětí v meziobvodu by dále stoupala, dojde k blokaci H-můstku od nadřazené ochrany *Udc_max*, která při dosažení maximální přípustné hodnoty vypíná měnič.



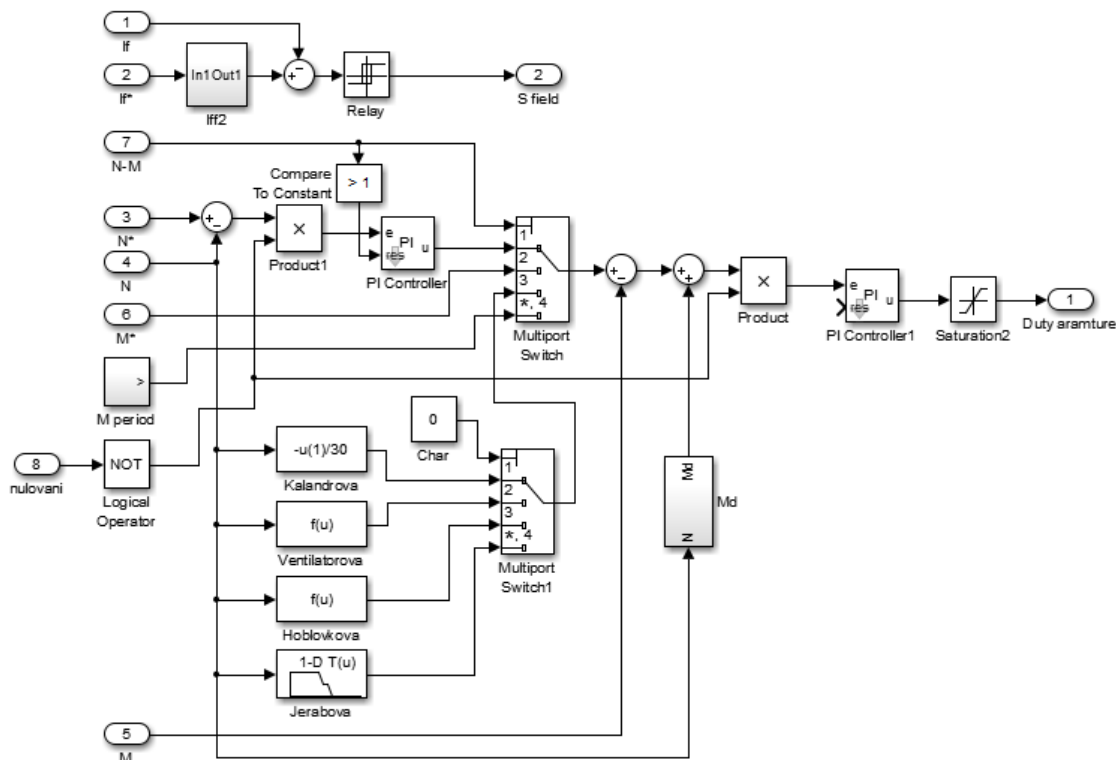
Obrázek 10-9: Detail ochrany kotvy

Obrázek 10-10: Regulátor napětí v meziobvodu



Obrázek 10-11: Otáčková ochrana

Blok regulátorů a řízení provádí obsluhu kotevního a budícího střídače a je upraveným blokem, který byl použit v simulaci. První dva vstupy jsou měřenou a žádanou hodnotou hysterezního regulátoru budícího proudu, tvořeného blokem „Relay“ Žádaná hodnota I_f^* je zavedena do bloku *Iff2*, který je filtrem a zásobníkem, aby nedocházelo k velkému kolísání požadavku na budící proud v režimu odbuzování stroje, kdy je reference vypočítávána z modelu stroje v reálném čase, porovnáváním indukovaného napětí.



Obrázek 10-12: Blok regulátorů a výběru typu řízení

Vstupem „M-N“ se provádí výběr způsobu regulace, ta má čtyři módy:

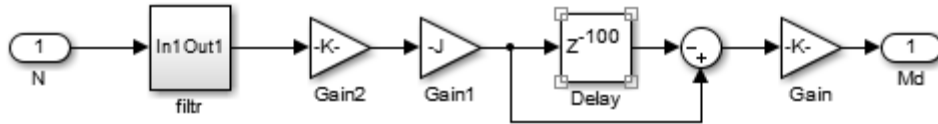
- **Mód 1** - otáčková regulace: udržuje otáčky dynamometru na předepsané hodnotě (řízení otáček kaskádním zapojením)
- **Mód 2** - Momentová regulace – udržuje moment dynamometru na předepsané hodnotě (řízení momentovým regulátorem)
- **Mód 3** – Vlečná elektrická zátěž: dynamometr vyvozuje protimoment v závislosti na otáčkách výpočtem dle nastavené mechanické charakteristiky
- **Mód 4** – Periodické zatěžování: dynamometr vyvozuje protimoment dle požadavku od generátoru periodického zatížení typu S6 a S7.

Konstanta „Char“ řídí polohu přepínače „Multiport Switch1“ a dochází k přepínání použité charakteristiky při vlečné momentové regulaci v Módu 3. Navolit lze takto následující průběhy protimomentu:

- **1. Kalandrová charakteristika:** lineární závislost momentu na otáčkách, dynamometr pracuje jako kalandr
- **2. Ventilátorová charakteristika:** kvadratická závislost momentu na otáčkách, dynamometr pracuje jako ventilátor (pumpa)
- **3. Hoblovková charakteristika:** moment je nepřímě úměrný otáčkám

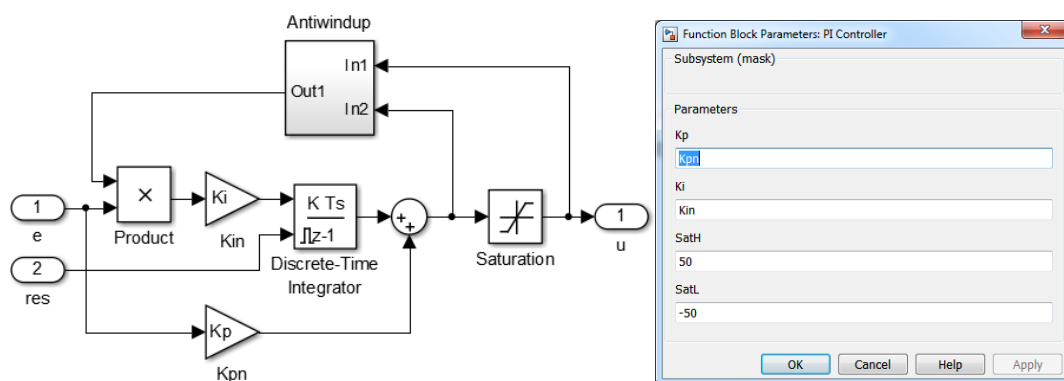
Tento blok tedy definuje, jak bude chování dynamometru vypadat.

Dynamometr ovšem může vyvíjet i přídavný setrvačný moment, a tím věrněji napodobit chování reálného pracovního stroje. Dynamický moment vyvinutý momentem setrvačnosti vytvářený blokem „Md“ je přičítán k žádanému momentu blokem „Suma“ vstupujícího do momentového regulátoru.



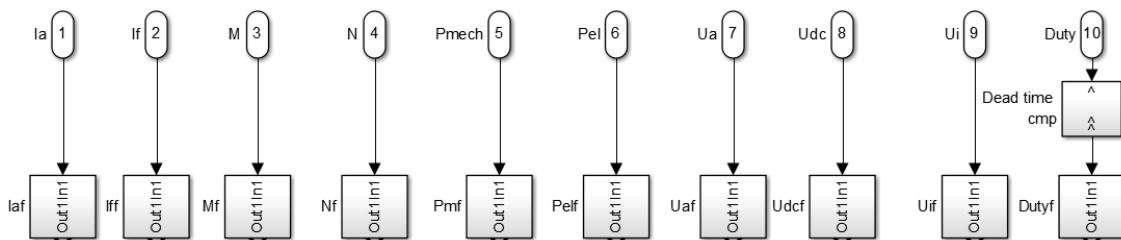
Obrázek 10-13: Blok dynamického momentu

Dynamický moment je závislý na velikosti setrvačného momentu a velikosti změny otáček v čase, tedy jejich derivaci. Derivace je v tomto případě nahrazena zpožďovacím členem „Delay“, která dle vztahu (2-3) tvoří čítenel z podílu $d\omega$. Jmenovatel dt , tedy časový úsek, tvoří násobek vzorkovací frekvence modelu, jenž je stejný jako převrácená hodnota délky zpoždění. Před výpočet je zařazen filtr, který omezí velikost změny tak, aby hodnota Md daná derivací rychlosti nenabývala příliš vysokých hodnot, které by ovlivnily stabilitu pohonu.



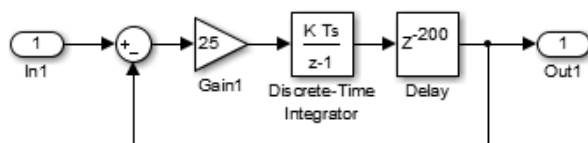
Obrázek 10-14: Detail PI regulátoru a jeho masky

Primární a sekundární regulátor regulační smyčky obvodu kotvy jsou diskretními PI regulátory s kompenzací překmitu akční veličiny a její definovanou saturací. Integrovanou složku tvoří diskretní blok integrátoru a konstanta integračního zesílení. Zapojení a funkce vyplývají z definice. Použité zapojení je v modelu maskováno uživatelskou maskou, ve které se nastavují jednotlivé parametry regulátoru.



Obrázek 10-15: Filtry veličin zobrazených v uživatelském rozhraní

Aby v uživatelské nadstavbě nedocházelo k přílišnému kolísání hodnot, jsou jednotlivé signály nejprve filtrovány. Filtrace probíhá převzorkováním a průměrováním na základě nasbíraného počtu hodnot signálu do zásobníku (*bufferu*).

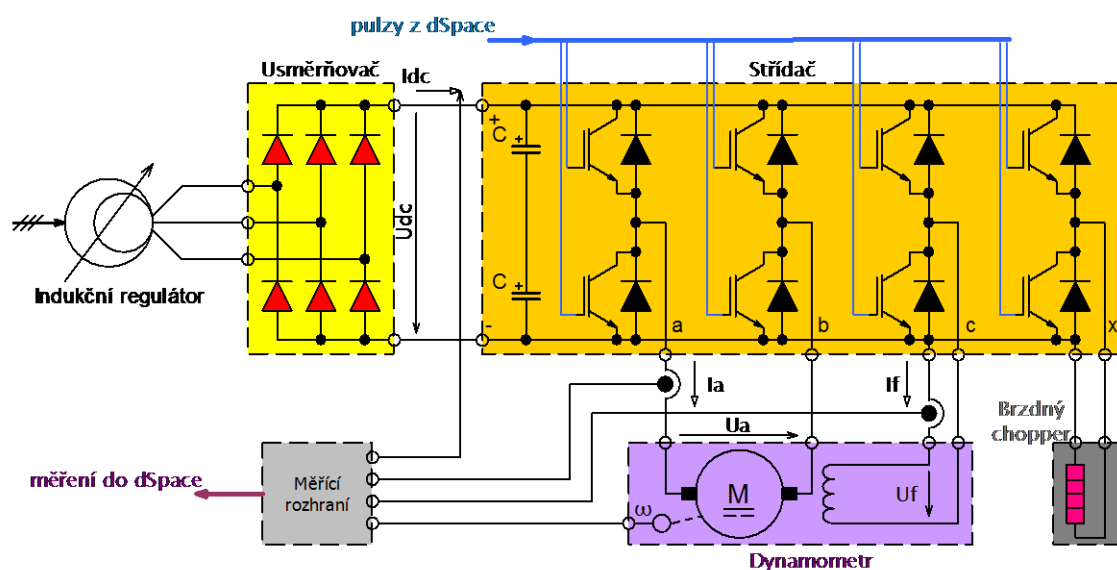


Obrázek 10-16: Detail zásobníku (filtru)

Měřené hodnoty jsou poté vyobrazeny a zaznamenávány bez zbytečného kolísání, způsobeného především šumem vstupujícím z měřicího rozhraní.

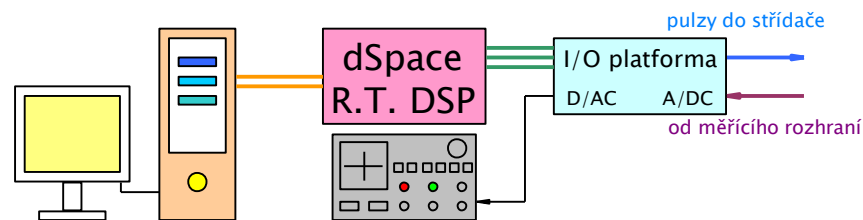
10.2 Podrobný popis pracoviště

Celé pracoviště se skládá z mechanické, silové a řídicí části. Mechanickou část tvoří soustrojí výkyvného stejnosměrného dynamometru s cizím buzením a měřeného stroje (stejnosměrný, asynchronní). Soustrojí je opatřeno senzorem otáček (tachodynamem). Silová část je tvořena napájecím zdrojem – indukčním regulátorem s trojfázovým můstkovým neřízeným, diodovým usměrňovačem, v některých případech bylo použito i *Ward-Leonardova* soustrojí. Zdroj napájí IGBT univerzální měnič „Looser“, zkonstruovaný skupinou studentů v minulých letech. Měnič je vybaven čtveřicí IGBT modulů, resp. osmicí tranzistorů, které lze využít jako dva plné můstky, čtyři *choppery*, nebo plný můstek a dva *choppery* (použitá kombinace). Plný můstek je připojen ke kotvě dynamometru, první *chopper* je zdrojem buzení a druhý složí jako brzdový ve spojení s výkonovým odporníkem. Silovou část doplňuje měření napětí v meziobvodu, proudu kotvou a buzením. Proudová i napěťová čidla jsou od firmy LEM.



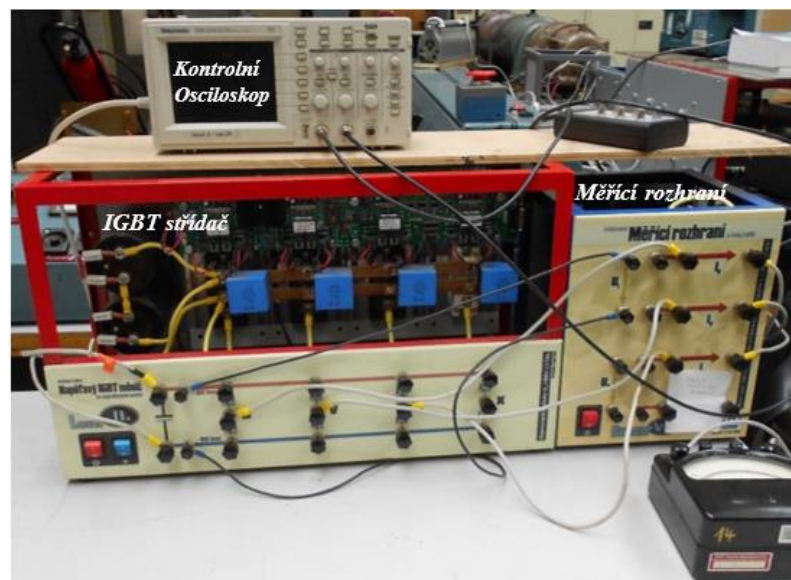
Obrázek 10-17: Zjednodušené schéma silové části pracoviště

Řídicí část je složena z více prvků – univ. měnič má své vlastní řízení budičů tak, aby nemohlo dojít ke zkratu vlivem špatného sepnutí, kontrolu teploty, kvitaci poruch, vstupy pro otickou a metalickou komunikaci a výstup poruch. Měřicí rozhraní je vybaveno přímým výstupem signálů $\pm 10V$ nebo precizním výstupem přes operační zesilovače. Měřicí konstanty se upravují přímo na měřicí kartě rozhraní, volbou vhodného odporového děliče signálu nebo volbou počtu závitů procházejících přes měřicí čidlo proudu. Platforma *dSpace* se signálovým procesorem zajišťuje komunikaci s univ. měničem a vyhodnocení signálů z měřicího rozhraní. Samotný řídicí systém je tvořen algoritmem ze systému *MATLAB*, přeloženým pro platformou *dSpace*. Daný algoritmus komunikuje přes platformu s nadřazeným uživatelským rozhraním a monitorem (*GUI*).



Obrázek 10-18: Zjednodušené schéma měřicí a ovládací části

Praktická podoba výsledného řídicího algoritmu byla vyvíjena právě na tomto pracovišti:

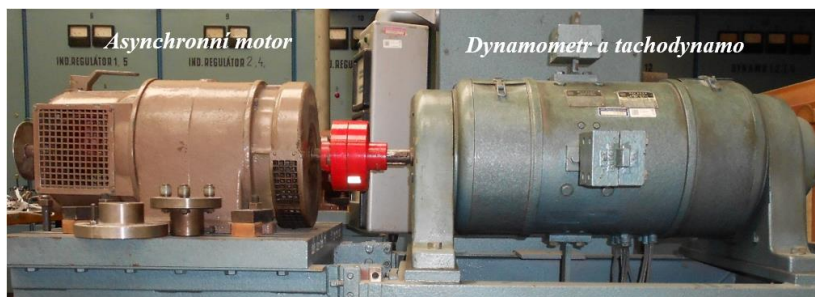


Obrázek 10-19: Náhled pracoviště

Silová část pohonu je napájena z konstantního napěťového rotačního zdroje 250 V (*dynamo 1*) nebo usměrňovače. K napájecímu zdroji je připojena dvojice kondenzátorů *C1*, *C2*. Součástí výkonového polovodičového přípravku jsou 2 sběrný, které jsou připojeny ke zdroji U_{DC} . Mezi nimi se nachází 8 polovodičových spínačů *T1* až *T8*. Tyto spínače jsou zapojeny po dvou ve čtyřech větvích a jsou tvořeny tranzistory *IGBT*



s antiparalelními diodami. Soustrojí asynchronního motoru a dynamometru, který zatěžuje motor je vidět na spodním obrázku:

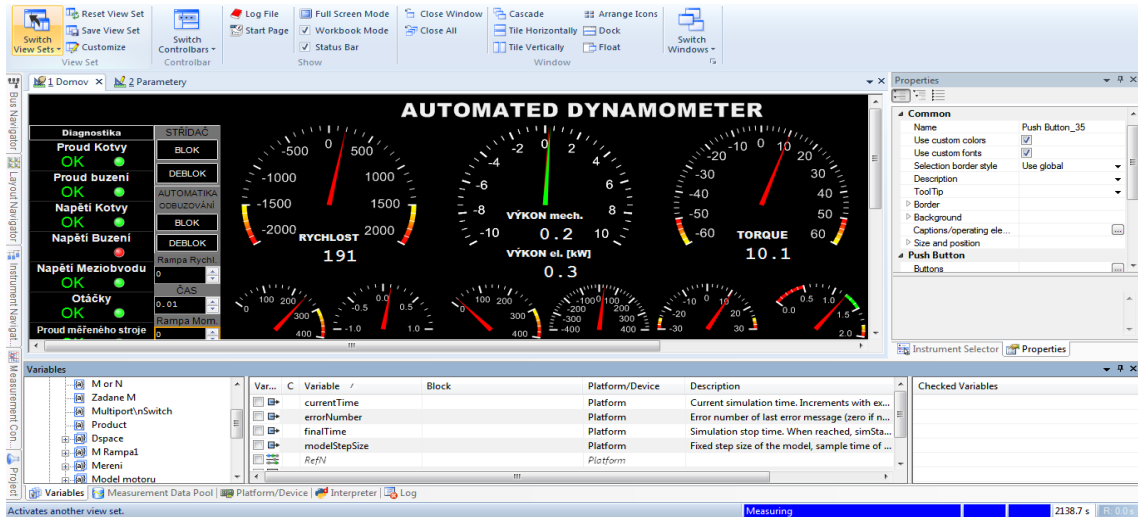


Obrázek 10-20: Detail soustrojí

Kompletací silové a mechanické části byl pohon připraven k testování. Bylo co nejvíce využito dostupného vybavení tak, aby mohl být měřen např. i proud testovaného stroje.

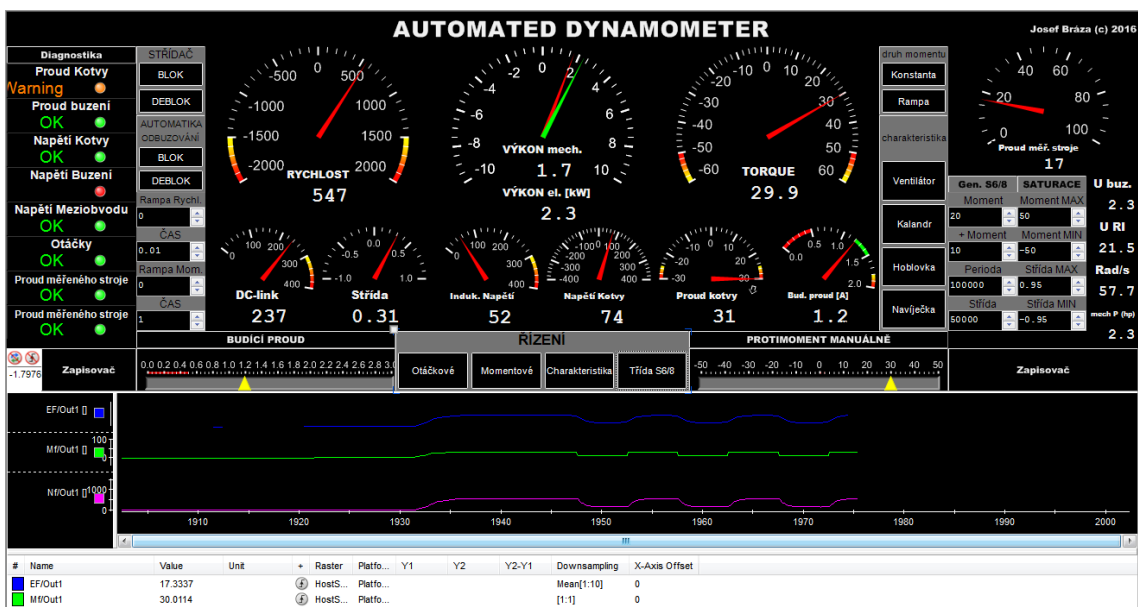
11 Uživatelské rozhraní a výsledky testování

V prostředí *ControlDesk* lze vytvořit vizualizaci řízeného celku, tj. monitoring a ovládání. K dispozici je celá knihovna přístrojů a ovládacích prvků, s intuitivním výběrem a možností nastavení v postranních „vyskakovacích“ panelech. Program s mapovacím souborem platformy, pro přiřazení proměnných k ovládacím prvkům, získáme po přeložení modelu. Následuje založení nového projektu, import programu a koncová tvorba grafické podoby vizualizace.



Obrázek 11-1: Náhled do vývojového prostředí

Pro řízení dynamometru byla sestavena aplikace s monitoringem klíčových parametrů, např.: rychlost, moment, proudy apod. Rozhraní obsahuje základní diagnostiku pohonu umístěnou vpravo, nastavení proudu buzení, ovládání odbuzování, ručního protimomentu, referenčních ramp a režimu řízení. Uživ. rozhraní vypadá následovně:



Obrázek 11-2: Uživatelské rozhraní

V další záložce je jednoduché tabulkové prostředí, kde lze editovat většinu parametrů modelu, např. konstanty PI regulátorů, měřících konstant apod. Přepínačem „STRÍDA-REGULACE“ se lze přepnout do režimu přímého řízení střidy PWM kotevního obvodu a provádět tedy i ladění konstant a dalších parametrů modelu.

AUTOMATED DYNAMOMETER

STŘIDA REGULACE

REGULACE

STŘIDA

Strida/Value[]

kafo/Gain[]

Value

PARAMETRY MODELU

PI REGULATORY: Km/Gain

Variable	Variable	Value
P Gain	Km/Gain	0.2
P Gain	Kpn/Gain	0.1
P Gain	Kim/Gain	0.6
P Gain	Kpm/Gain	0.01
P LowerLimit	Saturation/LowerLimit	-0.95
P UpperLimit	Saturation/UpperLimit	0.95
P LowerLimit	Saturation/LowerLimit	-50
P UpperLimit	Saturation/UpperLimit	50

OCHRANY:

Variable	Variable	Value
P Value	Constant/Value	80
P OffOutputValue	comp U/OffOutputValue	0
P OffSwitchValue	comp U/OffSwitchValue	269
P OnOutputValue	comp U/OnOutputValue	1
P OnSwitchValue	comp U/OnSwitchValue	270
P Value	Constant/Value	300
P Value	Constant/Value	1750

MOTOR:

Variable	Variable	Value
P Gain	Ra/Gain	0.679
P Gain	Rad/s/Gain	0.1047120418846
P Gain	kafo/Gain	0.8

MĚŘÍCÍ KONSTANTY: Km_Speed/Gain

Variable	Variable	Value
P Value	Offset Ia/Value	0.032
P Value	Offset If/Value	0.07
P Value	Offset Udc/Value	0
P Value	Offset speed/Value	0
P Gain	Km_I/Gain	3.25
P Gain	Km_Speed/Gain	7200
P Gain	Km_Udc/Gain	1483.476
P Gain	Km_Ia/Gain	50

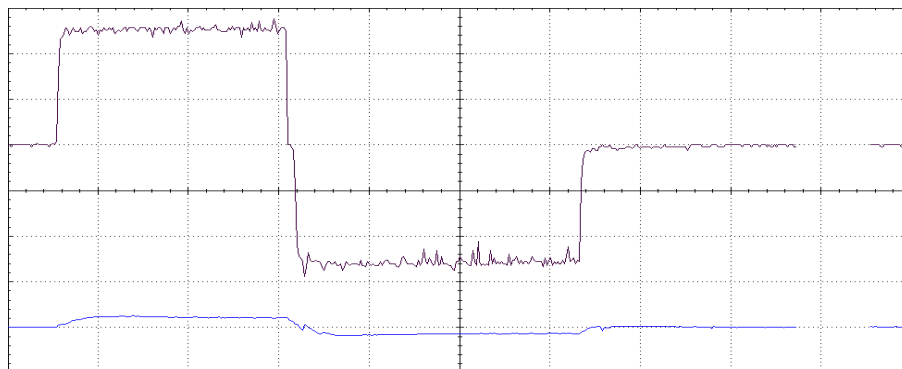
Obrázek 11-3: Záložka nastavení a parametrizace

11.1 Výsledky měření a testování

Zde jsou prezentovány výsledky testování modelu na reálném zařízení. Model byl testován na momentový skok $\pm 10 \text{ Nm}$ se zablokovanou hřídelí na rozběh naprázdno – reakce na skok žádaných otáček na 100 rad/s . A také byl otestován mód elektronické zátěže s lineárním a kvadratickým průběhem protimomentu pro pohánějíci motor.

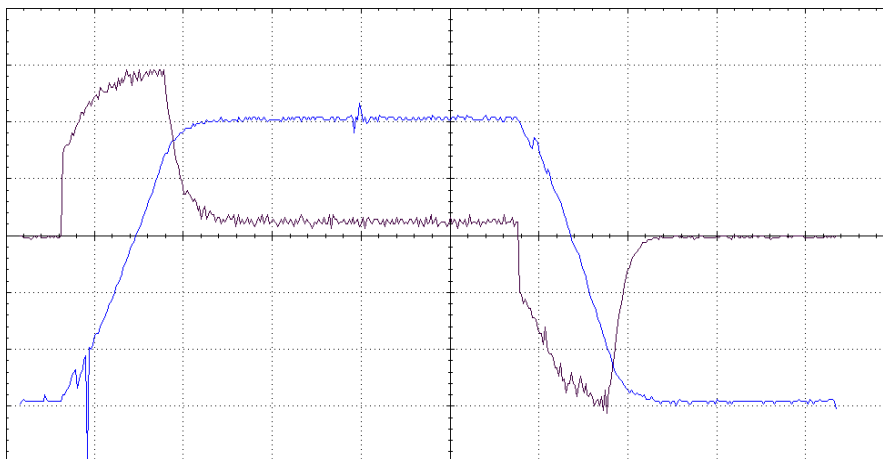
11.1.1 Dynamické chování pohonu

Momentový skok na obrázku níže ukazuje reakci pohonu při skokové změně žádaného momentu na 10 Nm a následnou skokovou změnu na -10 Nm při zablokováném rotoru. Je patrná rychlá odezva (fialový průběh) na jednotkový skok, prakticky minimální překmit momentu a jeho minimální zvlnění. Průběh ilustruje test řízení v módu 2.



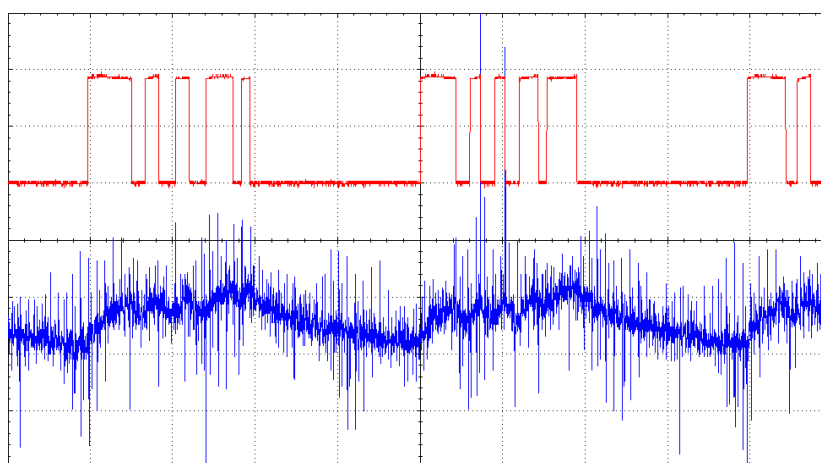
Obrázek 11-4: Momentový skok $\pm 10 \text{ Nm}$ ($T: 1 \text{ s/div}$; $M: 4 \text{ Nm/div}$; $N: 20 \text{ rads}^{-1}/\text{div}$; fialová: moment; modrá: rychlost)

Reakce na jednotkový skok žádané rychlosti z nuly na 100 rad/s bez zatížení zobrazuje následující průběh. Rychlost (modrá) lineárně stoupá při rozběhovém momentu (fialová), který dosahuje maxima 23 Nm . Doba rozběhu je přibližně 3 vteřiny. Po ustálení rychlosti následuje generátorické brždění do brzdného *chopperu* na nulovou rychlost, jehož doba trvá opět 3 vteřiny. Regulace probíhá bez znatelného překmitu a s ohledem na vysoký setrvačný moment i s velkou dynamikou. Průběhy se velmi podobají simulačním, i doba rozběhu je téměř stejná.



Obrázek 11-5: Otáčkový skok 100 rad/s ($T: 2,5 \text{ s/div}$; $M: 4 \text{ Nm/div}$; $N: 20 \text{ rads}^{-1}/\text{div}$; fialová: moment; modrá: rychlost)

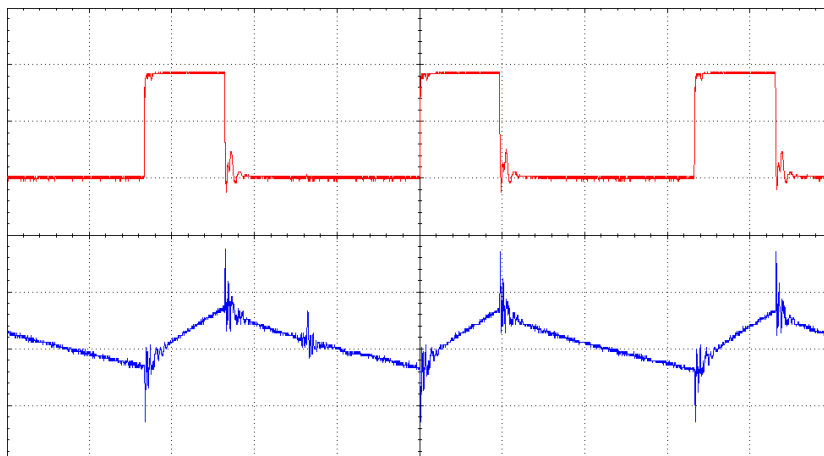
Detail průběhu napětí buzení (červený průběh) a zvlnění budícího proudu (modrý průběh) ukazuje následující obrázek. Hysterezní regulace budícího proudu udržuje jeho hodnotu na $1,2 \text{ A}$ se zvlněním 100 mA . Maximální hodnota přiloženého budícího napětí je 245 V .



Obrázek 11-6: Budící napětí a proud ($T: 625 \mu\text{s/div}$; $U_f: 125 \text{ V/div}$; $I_f: 100 \text{ mA/div}$)

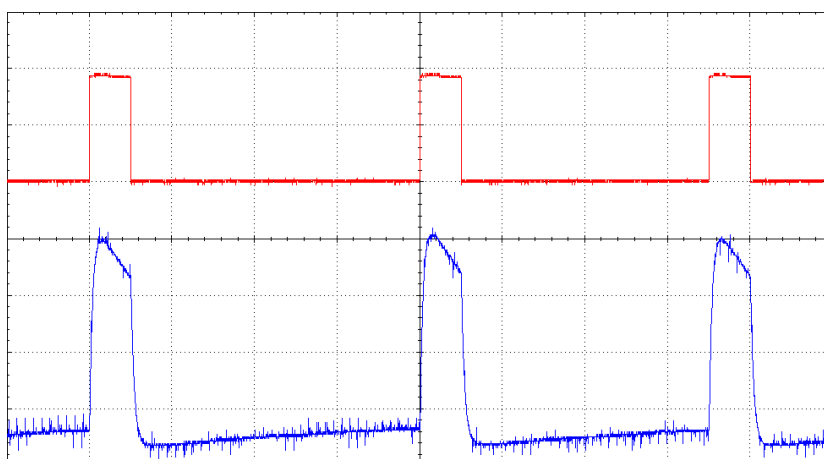
Detail průběhu napětí kotvy (červený průběh) a zvlnění kotevního proudu (modrý průběh) při ustáleném běhu se zatížením 20 Nm ukazuje následující obrázek. Regulace

kotevního proudu (momentu) udržuje jeho hodnotu na 16 A se zvlněním 1 A . Maximální hodnota přiloženého napětí je 245 V . Střída je přibližně $0,3$ a kotevní napětí tedy $73,5\text{ V}$.



Obrázek 11-7: Kotevní napětí a proud ($T: 50\text{ }\mu\text{s} / \text{div}$; $U_a: 125\text{ V/div}$; $I_a: 1\text{ A/div}$)

Pokud je měnič napájen z nerecuperačního zdroje a dynamometr pracuje v generátorické oblasti, je spuštěn brzdňý *chopper*, který maří výkon stroje v připojeném reostatu s odporem $3,6\text{ }\Omega$. Jedná se, jak již bylo zmíněno několikrát, o hysterezní regulaci napětí. V tomto případě vyvíjel dynamometr zátěžný moment -20 Nm . Energie putovala z dynamometru do kondenzátorů meziobvodu a po překročení hraniční hodnoty napětí 250 V sepnul spínač reostatu. Po poklesu napětí spínač vypíná a napětí opět roste. Při neměnné vstupní energii dochází k ustálení brzdňého děje a frekvence spínání reostatu je dána konstantou časovou konstantou RC , kterou tvoří ekvivalentní odpor reostatu a kapacita kondenzátorů v meziobvodu. Maximální proud (modrý) je přibližně 65 A , při 250 V_{max} , což odpovídá hodnotě odporu reostatu $3,6\text{ }\Omega$. Ustálená frekvence je 52 Hz se střídou $0,14$. Střední hodnota napětí a proudu reostatem je 9 A a 34 V .



Obrázek 11-8: Napětí a proud na reostatu ($T: 5\text{ ms} / \text{div}$; $U_a: 125\text{ V/div}$; $I_a: 20\text{ A/div}$)

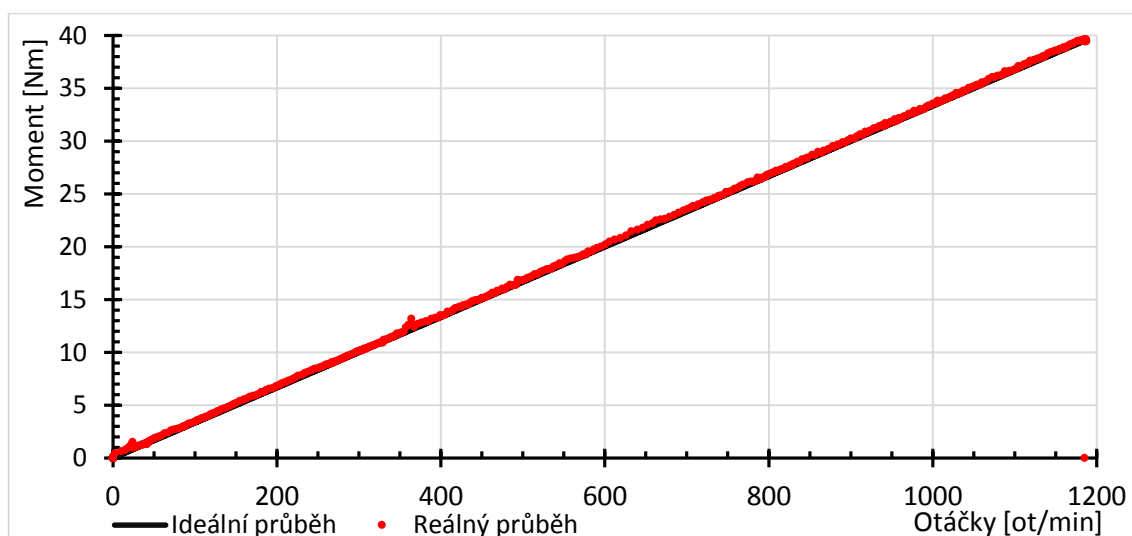
11.1.2 Výsledky testů elektrické zátěže

Třetí a čtvrtý mód se vyznačuje řízením dynamometru jako elektrickou zátěží dle předem definované závislosti momentu na otáčkách. Hnací stroj je tedy zatěžován v závislosti na jeho rychlosti. Průběh zatížení může být definován matematickou funkcí nebo tabulkou hodnot. Cílem takového řízení je napodobení reálného poháněného zařízení (např. ventilátor, extrudér, mlýn) v laboratorních (zkušebních) podmínkách. Chování pohonu může být ověřeno ještě před instalací na místo trvalého provozu z hlediska např. rozběhu, jeho doby, zatížení a dynamiky (u pohonů s měničem).

Chování dynamometru jako elektrické zátěže je vyobrazeno v grafu (11-1). Závislost je popsána rovnicí:

$$M = 30^{-1}N \quad (11-1)$$

Rychlost 1500 *ot/min* tedy odpovídá momentu 50 *Nm*.

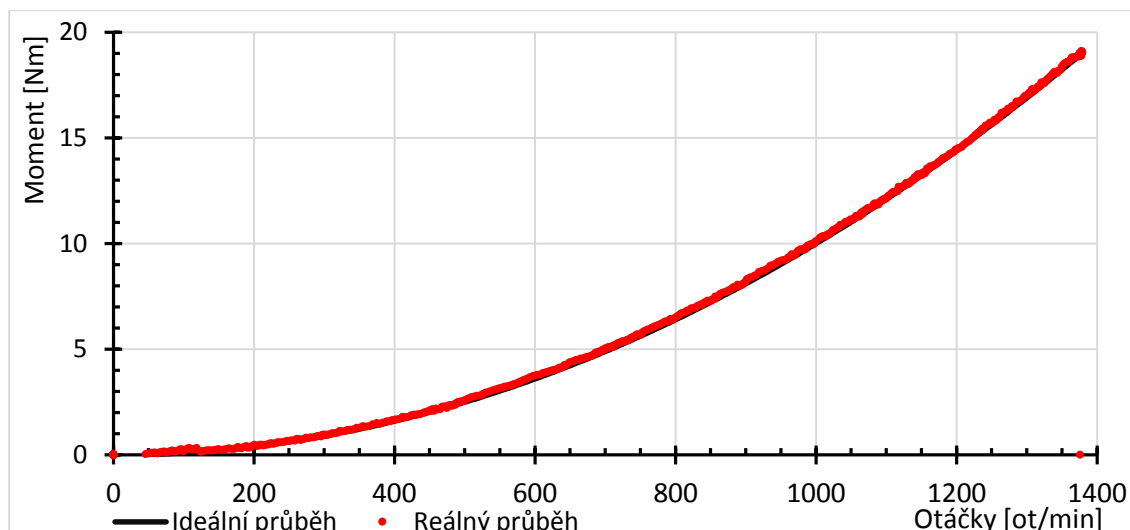


Graf 11-1: Momentová charakteristika lineární elektrické zátěže - kalandr

Průběh v grafu níže znázorňuje rozdíly mezi teoretickým a reálným průběhem zatížení kvadratického typu (ventilátor, pumpa) dle rovnice:

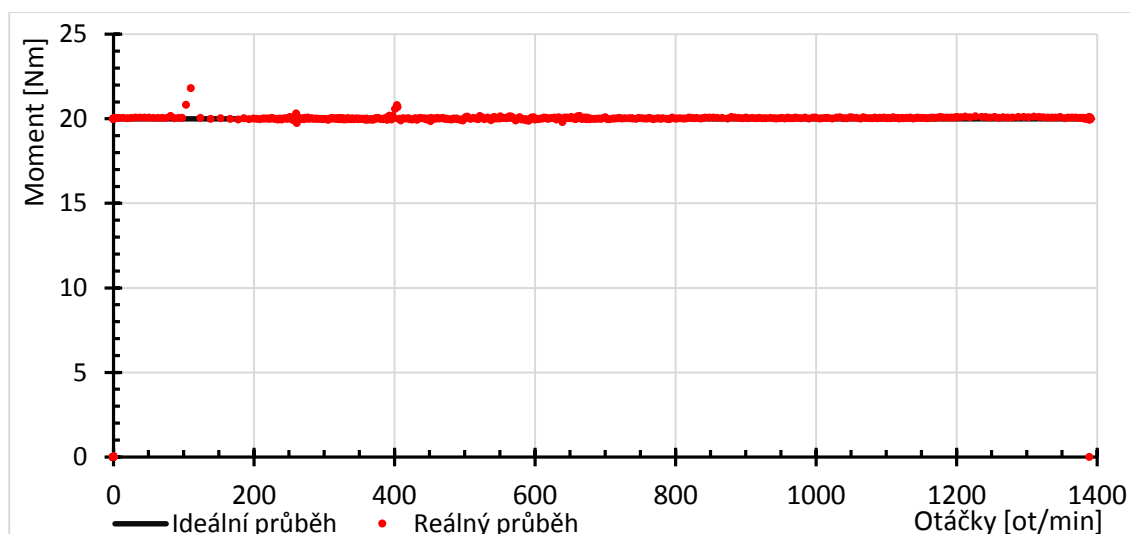
$$M = 10^{-5}N^2 \quad (11-2)$$

Minimální rozdíly patrné z grafu jsou způsobeny, opět jako v předchozím případě, šumem měření, nebo ne zcela vhodně naladěným *PI* regulátorem momentu.



Graf 11-2: Momentová charakteristika kvadratické elektrické zátěže - ventilátor

Zatížení konstantním momentem je záležitostí u aplikací typu extruder, mlýn, drtič apod. V tomto konkrétním případě se dynamometr snaží (v celém rozsahu otáček) vyvinout nastavený konstantní moment 20 Nm . Z porovnání reálného a nastaveného průběhu lze považovat odezvu dynamometru za velmi přesnou, pouze v několika případech překračuje odchylka 5 % od ideálního předpokladu. To může být způsobeno náhodným rušením v obvodu měření proudu.



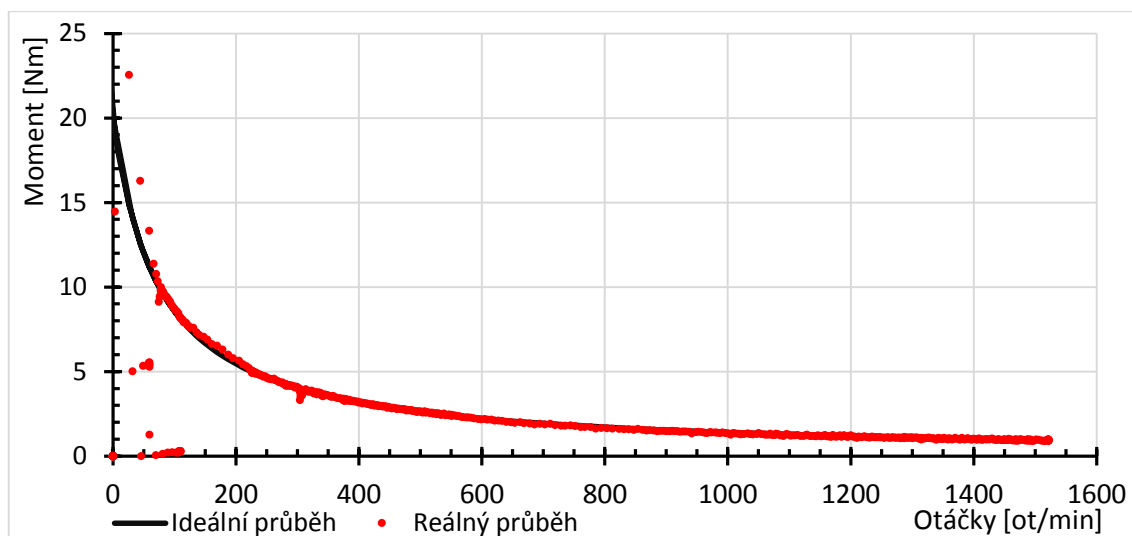
Graf 11-3: Momentová charakteristika konstantní elektrické zátěže - navíječka

Při nastavení chování dynamometru tak, aby jím vyvíjený moment byl nepřímo úměrný hnacím otáčkám, se jeho chování blíží hoblovce. V následujícím grafu je uveden případ, kdy se závislost momentu na otáčkách odvíjí ze vztahu:

$$M = (N + 30)^{-1} \quad (11-3)$$

Maximální dosažitelný protimoment je při nulových otáčkách a je roven 30 Nm . Do otáček 100 ot/min odpovídá reálný průběh ideálnímu. Poté moment prudce stoupá nad

rámec ideální hodnoty a následně je zachycen nadproudovou ochranou pohonu. Důvodem bude nejspíše nevhodný způsob výpočtu protimomentu.



Graf 11-4: Momentová charakteristika nepřímo úměrné zátěže - hoblovka

Tato kapitola měla za úkol ilustrovat chování dynamometru jako virtuálního pracovního stroje. Výsledky měření ukazují, že řídicí program udržuje přednastavené charakteristiky pracovních strojů ve velmi úzkém pásmu od jejich ideální podoby, až na některé nahodilé případy.

11.2 Výsledky automatického měření motoru

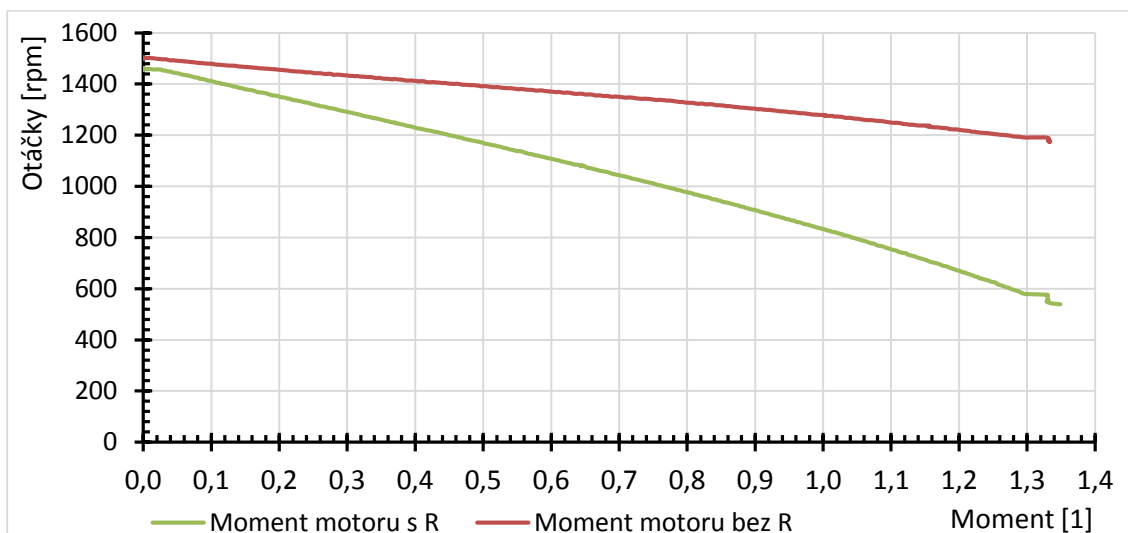
Výsledky automatického měření charakteristik motorů ukazují, jak lze bez větších problémů proměřit jednotlivé závislosti bez nutnosti složitého a zdoluhavého ručního měření, spojeného se zápisem hodnot. Automatické měření bylo provedeno v režimech momentové a otáčkové rampy. Po zahájení sběru dat stačí potvrdit koncovou hodnotu veličiny z ustáleného stavu, který před tím obsluha navolila (nejčastěji ustálený stav: odlehčený stroj, nebo nulové otáčky). Měření probíhá tak rychle, jak je nastaven krok rampy. Velkou výhodou tohoto měření je, že nedochází ke zdržení v důsledku manuálního nastavování a zápisu hodnot, zároveň lze definovat měřicí krok, tím se zvyšuje počet naměřených vzorků a tedy i přesnost měření.

11.2.1 Výsledky z měření stejnosměrného motoru

Předmětem měření je stejnosměrný motor s možností cizího i sériového buzení ($P_N = 4,4 \text{ kW}$; $U_{aN} = 230 \text{ V}$; $U_{bN} = 230 \text{ V}$; $I_{aN} = 19,2 \text{ A}$; $I_{bN} = 0,85 \text{ A}$; $n_N = 1400 \text{ ot/min}$) napájený z říditelného zdroje napětí $-250 \text{ V} - +250 \text{ V}$. Výsledná mechanická charakteristika zobrazuje průběh momentu v závislosti na otáčkách stroje. Motor byl

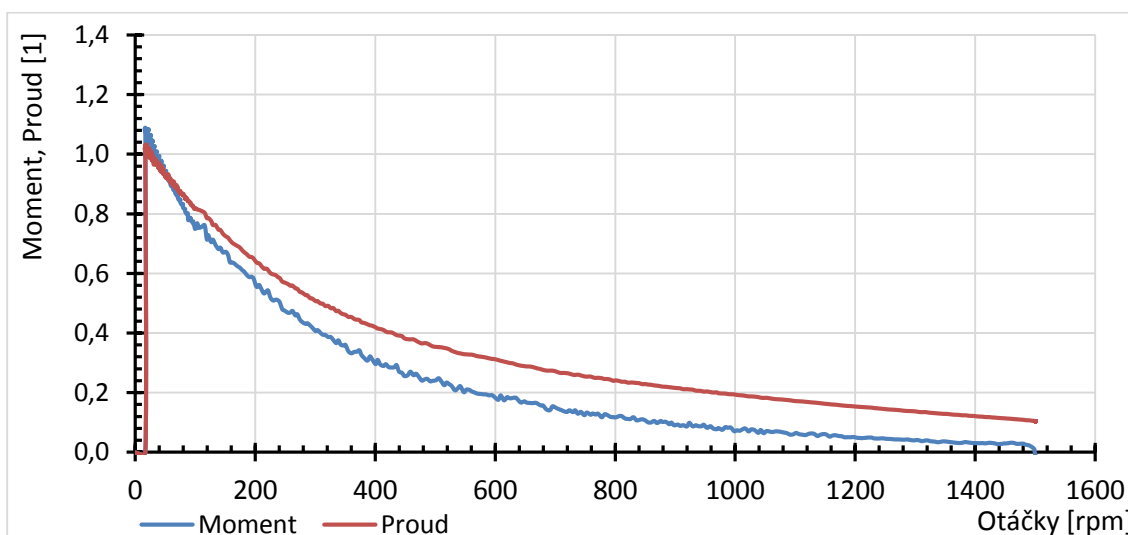


spuštěn na plné napětí 250 V bez zatížení a následně zatěžován až do protimomentu 40 Nm. Protimoment vzrůstal po lineární rampě při odečítání aktuálních hodnot otáček a momentu s časovým krokem 1 ms. Měření probíhalo automaticky a po dosažení maximálního momentu bylo ukončeno obsluhou. Průběhy vyobrazené v grafu ukazují mechanickou charakteristiku motoru, který je přímo připojen na napájecí zdroj a také s předřazeným kotevním odporem 3,6 Ω. Moment je vynesena v poměrných jednotkách k nominálnímu momentu motoru 30 Nm. (celý protokol měření v příloze)



Graf 11-5: Mechanická charakteristika cize buzeného DC motoru s odporem a bez odporu v kotvě

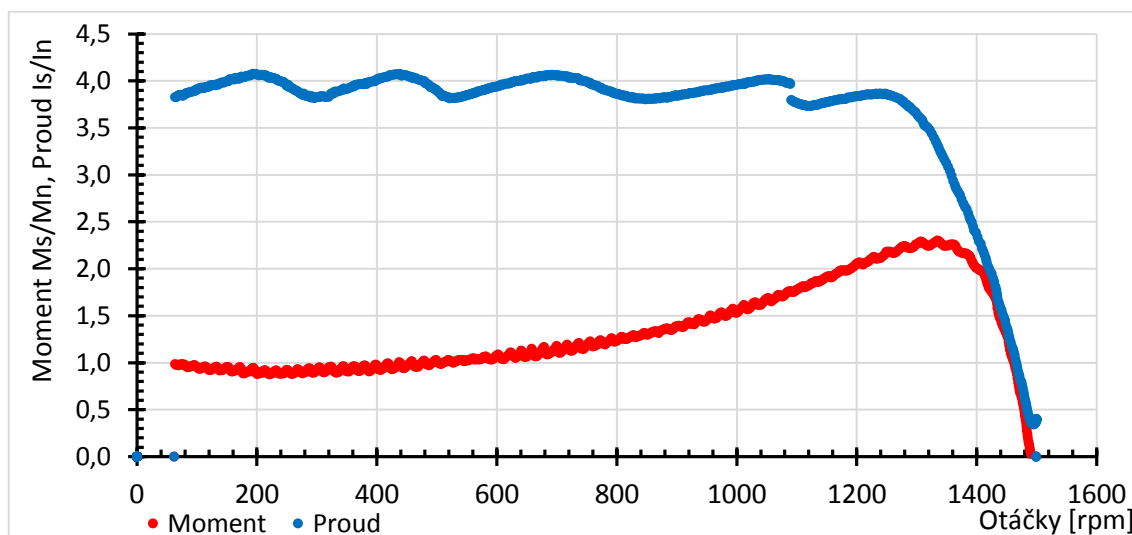
Po přepojení způsobu buzení z cizího na sériové byla změřena následující mechanická charakteristika: (celý protokol měření v příloze)



Graf 11-6: Momentová charakteristika DC motoru se sériovým buzením

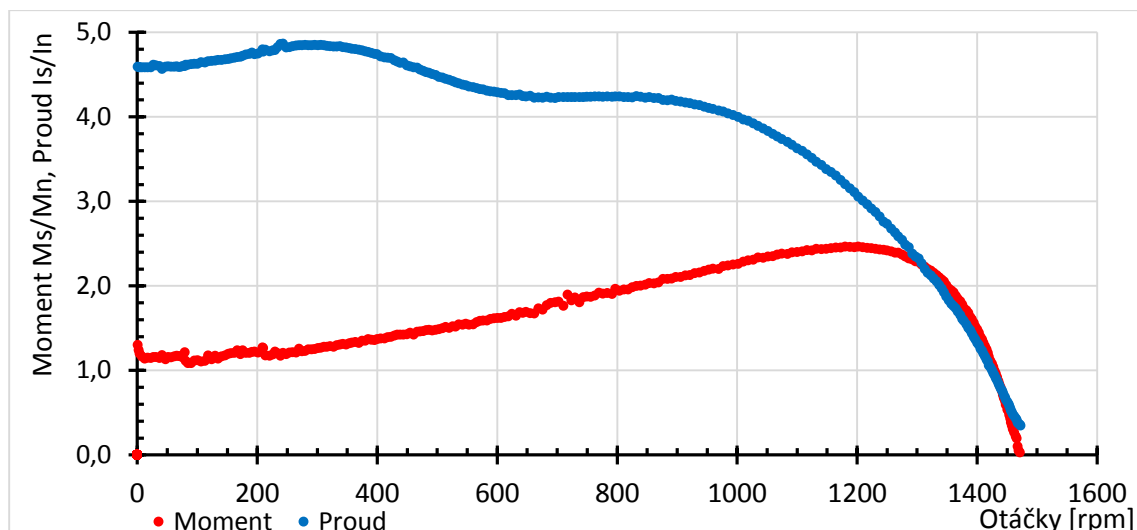
11.2.2 Výsledky z měření asynchronního motoru

Předmětem měření je asynchronní motor ($P_N = 12 \text{ kW}$; $U_N = 380 \text{ V}$; $I_N = 22 \text{ A}$; $n_N = 1440 \text{ ot/min}$; $\cos\varphi = 0,8$) s kotvou nakrátko napájený z indukčního regulátoru napětím 220 V . Výsledná mechanická charakteristika zobrazuje průběh momentu v závislosti na otáčkách stroje. Motor byl dynamometrem roztočen na synchronní otáčky 1500 ot/min a následně mu jím byly vnučovány snižující se otáčky až do zastavení po lineární rampě. Odečítání aktuálních hodnot otáček, momentu a proudu ASM probíhalo s časovým krokem 1 ms . Měření probíhalo automaticky a po dosažení nulových otáček bylo ukončeno obsluhou. Průběhy vyobrazené v grafu ukazují mechanickou charakteristiku motoru a průběh proudu, který je přímo připojen na napájecí zdroj. Moment a proud jsou vyneseny v poměrných jednotkách ke štítkovým údajům. Jmenovitý moment motoru je určen dle vztahu (5-2) $M_N = 80 \text{ Nm}$ (celý protokol měření v příloze).



Graf 11-7: Automaticky změřená momentová charakteristika ASM 12 kW s průběhem proudu

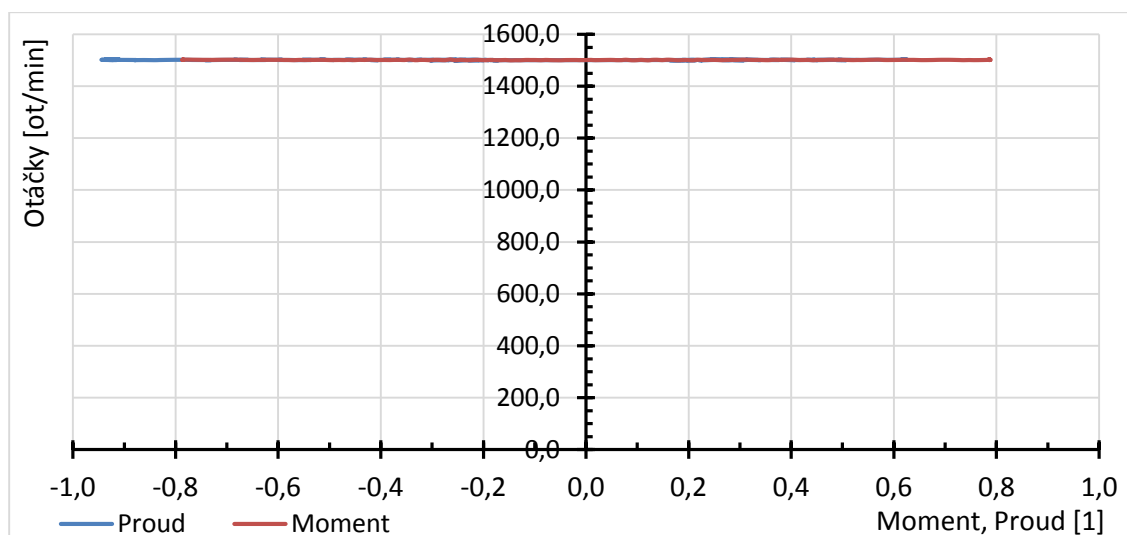
Dalším měřením je asynchronní motor ($P_N = 5,5 \text{ kW}$; $U_N = 380 \text{ V}$; $I_N = 11,8 \text{ A}$; $n_N = 1430 \text{ ot/min}$) s kotvou nakrátko napájený z indukčního regulátoru napětím 220 V . Výsledná mechanická charakteristika zobrazuje průběh momentu v závislosti na otáčkách stroje. Měření probíhalo obdobným způsobem jako v předchozím případě. Průběhy vyobrazené v grafu ukazují mechanickou charakteristiku motoru a průběh proudu, který je přímo připojen na napájecí zdroj. Moment a proud jsou vyneseny v poměrných jednotkách ke štítkovým údajům. Jmenovitý moment motoru je určen dle vztahu (5-2) $M_N = 37 \text{ Nm}$. Záběrný moment je přibližně 1,2 násobku jmenovitého momentu, moment zvratu odpovídá jeho 2,5 násobku. Startovací proud je 4,5 násobkem jmenovitého proudu (celý protokol měření v příloze).



Graf 11-8: Automaticky změřená momentová charakteristika ASM 5,5 kW s průběhem proudu

11.2.3 Výsledky z měření synchronního motoru

Měření synchronního motoru „MEZ“ s vyniklými póly probíhalo na stroji se jmenovitými parametry: ($P_N = 8 \text{ kW}$; $U_{aN} = 400 \text{ V}$; $U_{bN} = 32 \text{ V}$; $I_{aN} = 14,5 \text{ A}$; $I_{bN} = 7,6 \text{ A}$; $n_N = 1500 \text{ ot/min}$). Měření bylo provedeno změnou zatěžovacího momentu po lineární rampě od zatěžovacího momentu -40 Nm až do urychlovacího momentu 40 Nm . V naměřených hodnotách nejsou žádné markantní momentové ani rychlostní výchyly a výsledná charakteristika zcela odpovídá předpokladu (*celý protokol měření v příloze*).

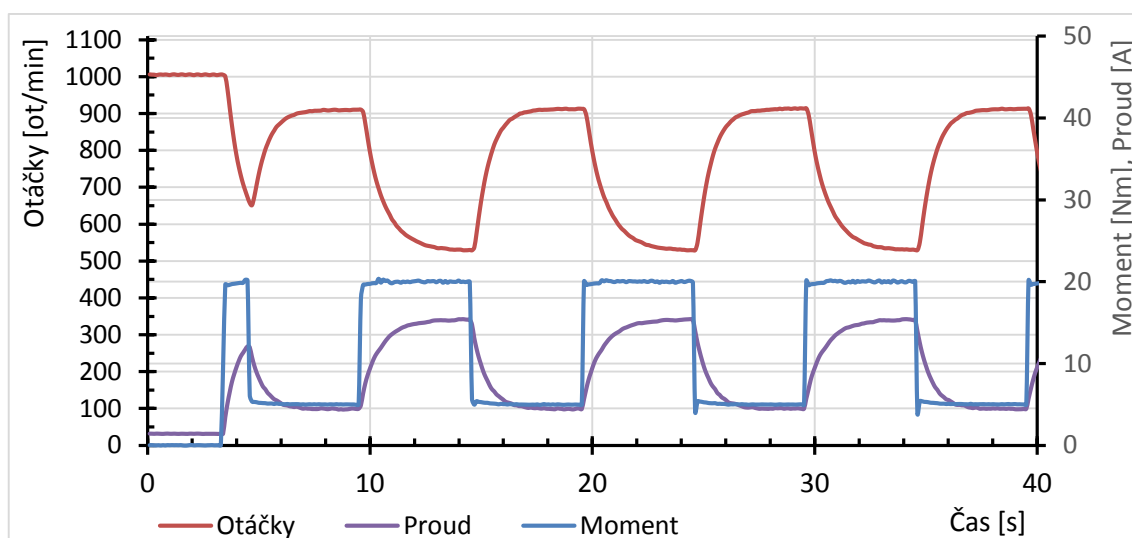


Graf 11-9: Mechanická charakteristiky asynchronního stroje

11.3 Výsledky periodického zatěžování typu S6

Proměnné zatížení je častou záležitostí při dimenzování elektrických pohonů, a to především z hlediska dovoleného oteplení izolace elektrického stroje. Řízený dynamometr tuto funkci poskytuje s nastavením rozsahu momentové změny a doby trvání jednotlivých stavů. Dynamometr se tedy pro pohon „tváří“ jako zařízení s proměnným

momentem spadajícím do třídy S6 nebo S8. Takovými stroji jsou například podavače, dávkovače, tlukadla a lisy se setrvačником. V tomto konkrétním případě vytvářel dynamometr pro připojený stejnosměrný motor s odporem v kotvě $3,6 \Omega$ ($P_N = 4,4 \text{ kW}$; $U_{aN} = 230 \text{ V}$; $U_{bN} = 230 \text{ V}$; $I_{aN} = 19,2 \text{ A}$; $I_{bN} = 0,85 \text{ A}$; $n_N = 1400 \text{ ot/min}$) provoz typu S6 (proměnná zátěž) – skokové změny momentu 5 Nm a 20 Nm každých 5 s (perioda 10 s , zatěžovatel 50%). Následující průběh ilustruje průběh otáček a proudu stroje při tomto zatěžování. Ustálený rozkmit otáček je přibližně 350 ot/min při rozkmitu proudu stroje 10 A .



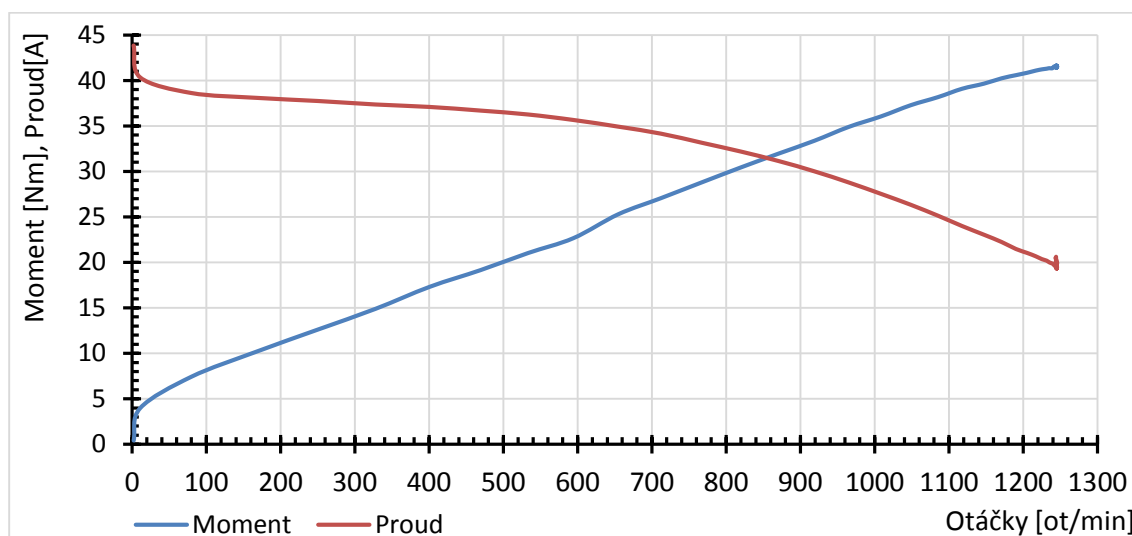
Graf 11-10: Zatěžování typu S6 stejnosměrného motoru s cizím buzením s odporem v kotvě

11.4 Výsledky spouštění motoru s přednastaveným mech. průběhem

Následující grafy ilustrují průběh spouštění asynchronního motoru přímým připojením k napájecí síti, připojeného k dynamometru, který se chová jako přednastavený pracovní stroj. Je vyneseno časový průběh měřených veličin (otáček, zátěžného momentu a proudu stroje) a závislost zátěžného momentu a proudu stroje na aktuálních otáčkách. V tomto režimu lze prakticky ověřit dobu rozběhu stroje, tedy jestli je motor správně dimenzován na rozběh. Matematická závislost generovaného protimomentu na otáčkách je stejná jako v kap. (11.1.2).

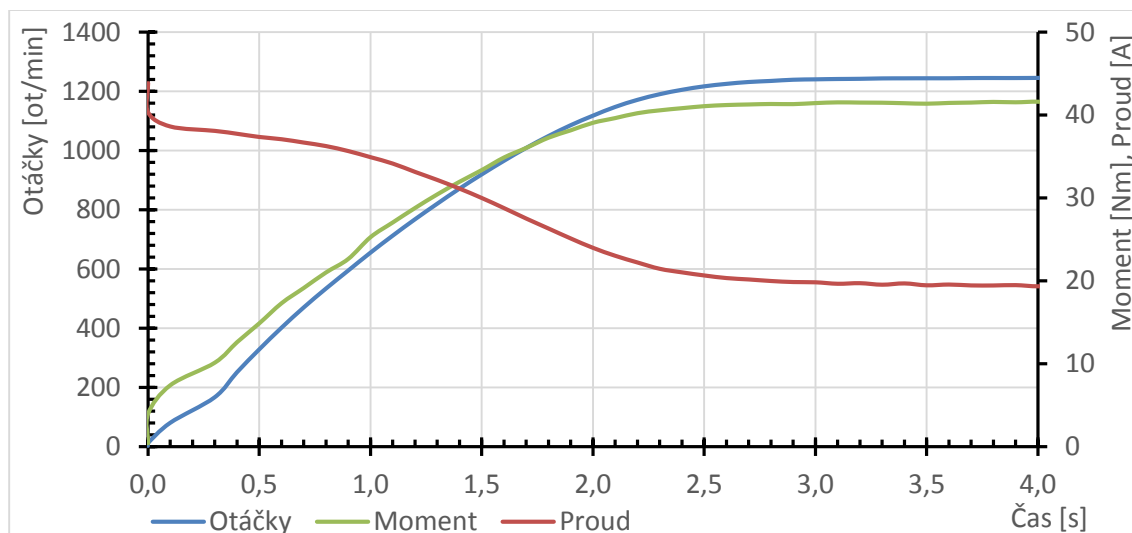
Měření probíhalo při použití asynchronního motoru se jmenovitými parametry: ($P_N = 5,5 \text{ kW}$; $U_N = 380 \text{ V}$; $I_N = 11,8 \text{ A}$; $n_N = 1430 \text{ ot/min}$), avšak napájecí napětí bylo sníženo na 250 V .

V následujícím grafu je patrné chování dynamometru, pracujícího jako kalandr, tedy s lineárním průběhem protimomentu pro hnací motor. Po připojení motoru je patrný záběrný proud ASM přes 40 A. Zátěžný moment vzrůstá s jednou třetinou otáček.



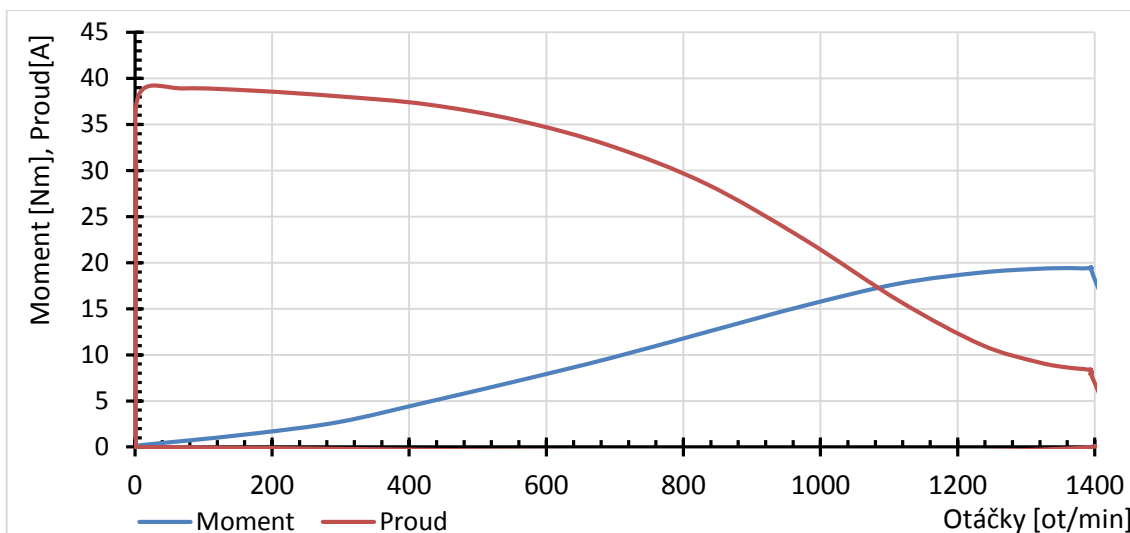
Graf 11-11: Spouštění simulovaného kalandru motorem – mechanický průběh

V časovém průběhu lze odečíst dobu rozběhu přibližně 3 s. Ustálené otáčky jsou 1400 ot/min., moment přes 40 Nm a ustálený proud ASM 20 A.



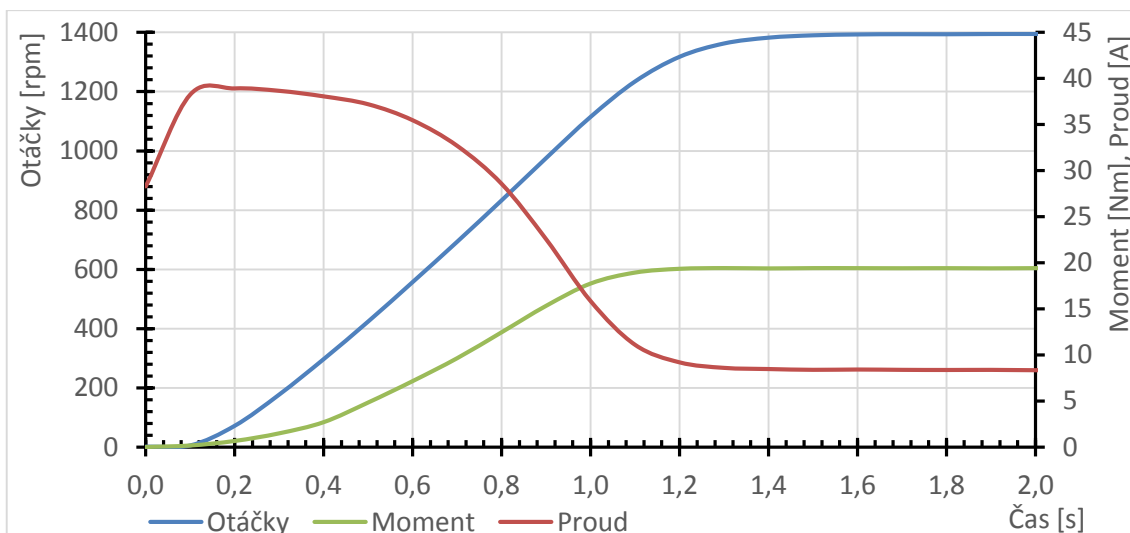
Graf 11-12: Spouštění simulovaného kalandru – časový průběh

Dalším typem byla simulace rozběhu ventilátoru, kdy protimoment roste se čtvercem otáček. Záběrný proud motoru zůstává zachován.



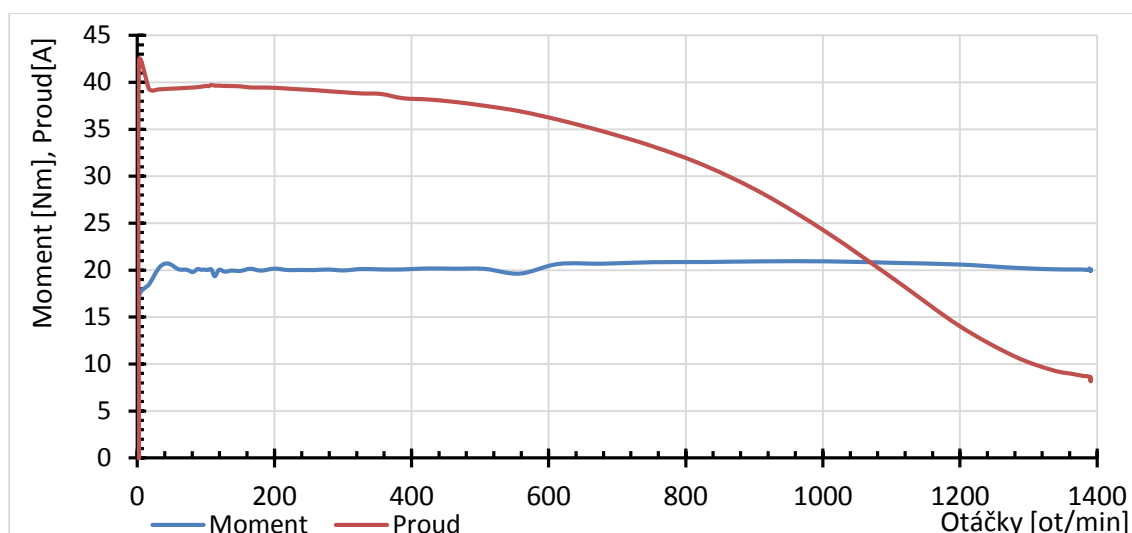
Graf 11-13: Spouštění simulovaného ventilátoru – mechanický průběh

Doba rozběhu je přibližně 1,6 s. Ustálený moment 20 Nm a proud motoru 8 A. Ustálené otáčky 1400 ot/min.



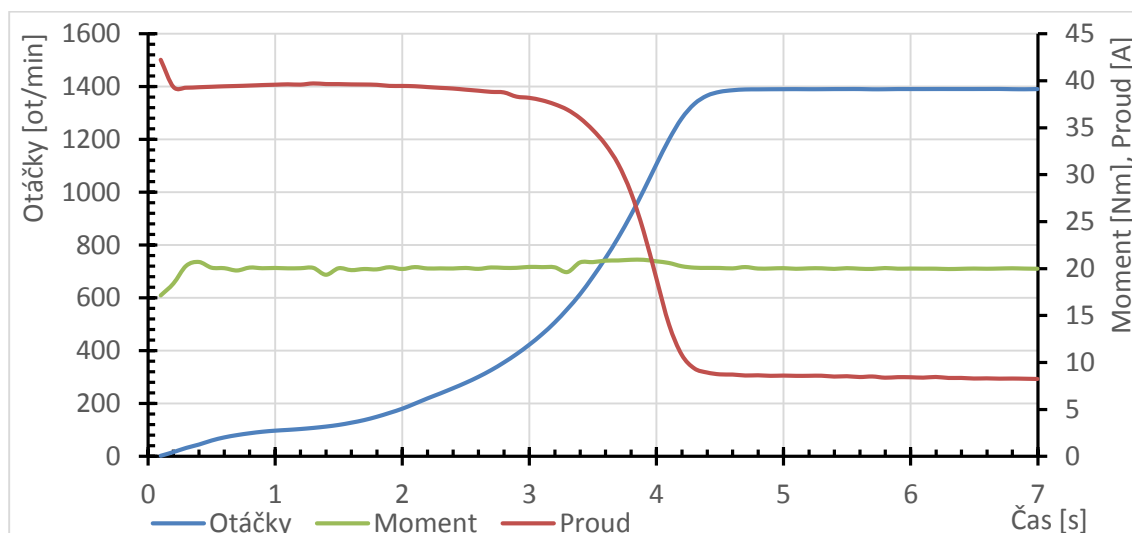
Graf 11-14: Spouštění simulovaného ventilátoru – časový průběh

Posledním zkoušeným typem simulované zátěže je zdvihací zařízení (navíječková charakteristika). Tento způsob se vyznačuje konstantním momentem v celém rozsahu otáček. Motor musí mít tedy záběrný moment větší, než vyvíjí přes naviják břemeno, aby k rozběhu vůbec došlo. Dynamometr v tomto případě působí na motor konstantním protimomentem 20 Nm.



Graf 11-15: Spouštění simulovaného jeřábu – mechanický průběh

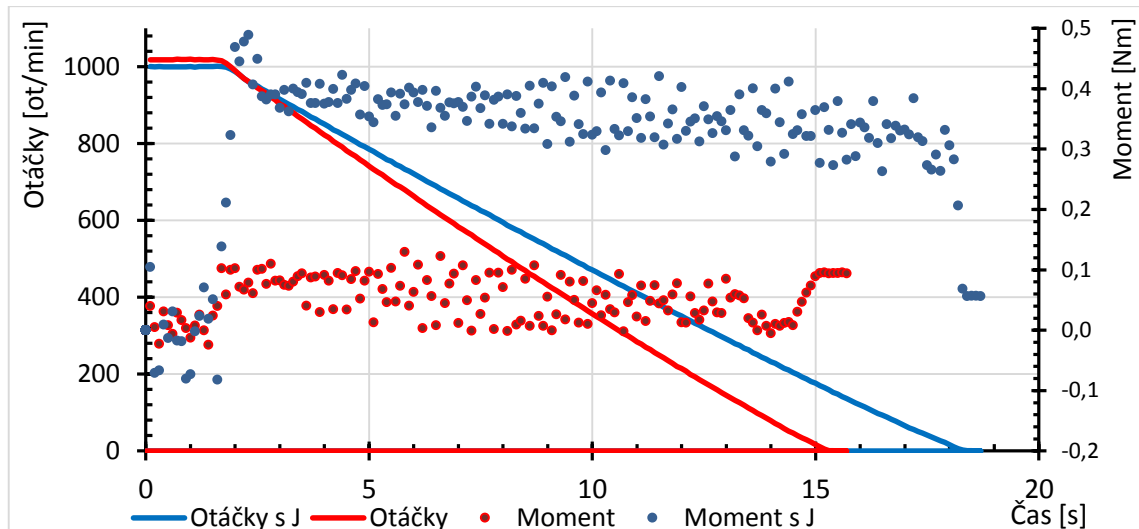
Doba rozběhu je celkem 5 s. Koncová rychlost nabývá 1400 ot/min. Proud se ustaluje na 8 A.



Graf 11-16: Spouštění simulovaného jeřábu – časový průběh

Tato měření ukazují schopnost řízení dynamometru věrohodně zastoupit reálný pracovní stroj a v laboratorních podmínkách ověřit správnou funkci navrženého pohonu.

Protože např. ventilátor je charakteristický svým momentem setrvačnosti, řídicí program poskytuje také nastavení tohoto dodatečného momentu, aby chování dynamometru co nejlépe kopírovalo reálné zařízení. Přídavný setrvačný moment byl testován na nezátíženém soustrojí za předpokladu, že pokud bude setrvačný moment kladný, dynamometr prodlouží dobu doběhu z ustálených otáček do zastavení. Tato zkouška byla provedena s vlastní setrvačností soustrojí, kdy doběh trvá 13 s a poté s přidaným momentem $J = 0,05 \text{ kgm}^2$, kdy došlo k prodloužení doběhu o jednu vteřinu.



Graf 11-17: Doběh v závislosti na přidané setrvačnosti

V grafu lze také pozorovat změnu momentu, který dynamometr vyvíjí při výběhu s přidanou hodnotou J a bez. Je patrné, že při pouhém výběhu je hodnota momentu téměř nulová, zato při nastaveném J vzniká nepatrný hnací moment asi $0,35 \text{ Nm}$, jehož rozptyl závisí na velikosti změny otáček v definovaném časovém úseku, tedy diskrétní derivaci rychlosti. Dynamometr tedy aktivně prodlužuje dobu zastavení.



12 Závěr

Cílem práce bylo nalézt vhodný způsob řízení cize buzeného stejnosměrného stroje, které by splňovalo požadavky potřebné pro analýzu elektrických i mechanických strojů. Šlo tedy o vytvoření řízení a sestavení pohonu reálného dynamometru, které by po započítí měření postupovalo dle předem definovaného postupu.

V systému *MATLAB/Simulink* byl vytvořen model *DC* motoru a vhodného algoritmu řízení, jehož ověření probíhalo na simulační rovině a poté bylo aplikováno prakticky za pomoci měřicí platformy signálového procesoru *dSpace*. Řízení umožňuje upravit chování dynamometru tak, aby se pro hnací stroj choval jako zátěž definovaného typu (pracovní stroj).

Za pomoci *dSpace* byla navržena regulační smyčka *DC* dynamometru, která má základ v simulačním modelu. Tato smyčka byla úspěšně doplněna o další funkční bloky, kterými jsou např. zdroje reference (rampy, generátor periodického zatížení, konstantního zatížení), různé typy mechanických charakteristik a módu automatického měření, které lze volitelně nastavovat. Poslední přidanou hodnotu tvoří blok dynamického momentu, který úspěšně upravuje výsledný dynamický moment, se kterým se musí stroj potýkat a zvyšuje tím věrohodnost chování dynamometru jako pracovního stroje.

Ve vývojovém prostředí byl sestaven uživatelský program, který oproti standardnímu a doposud užívanému ovládání dynamometru pouze ovládacím pultem poskytuje přehledné zobrazení všech důležitých veličin, úpravu jeho chování, což významně zjednodušuje měření a práci s ním. Jednoduchou možnost změny parametrů a konstant programu poskytují parametrické skupiny rozdělené dle dílčích částí modelu.

Výsledný pohon dynamometru umožňuje záznam mechanických a momentových charakteristik elektrických strojů na základě otáčkové nebo momentové vazby. Referenci, podle které se odvíjí měření, zajišťuje rampa, která určuje rozsah změřené oblasti charakteristiky. Výsledkem je úspěšné změření momentových charakteristik asynchronního, stejnosměrného a synchronního stroje. Ukázkové protokoly jsou v příloze práce.

Další možný rozvoj práce je na poli měření momentu, neboť prozatím je měřeným momentem pouze ten rekonstruovaný z kotevního proudu, což do měření zavádí řadu nepřesností. Zavedením momentového senzoru a inkrementálního čidla otáčení by došlo



ke zřejmému zpřesnění měření a nejistota měření by mohla být jednoznačně vyjádřitelná. Dalším vývojem na poli řízení, bloku dynamického momentu a průběhů mechanických charakteristik, ale i ochran, se dospěje k vytvoření plnohodnotného měřícího celku na profesionální úrovni. Přínos práce je především ve vytvoření funkčního celku měřícího pracoviště ze součástí dostupných na katedře elektrických pohonů a trakce, a tedy s minimálními přidanými náklady. Podobná zařízení mají povětšinou charakter zakázkové práce, a tedy i vysoké pořizovací náklady, kdežto zde sestavený komplet lze s úpravami použít na jakýkoliv elektrický dynamometr vyžadující pouze změnu řízení a změření náhradních parametrů stroje dynamometru.



13 Seznam symbolů a zkratek

13.1 Zkratky

<i>DC (dc)</i>	<i>označení stejnosměrné veličiny „Direct Current“ (index)</i>
<i>PWM</i>	<i>pulsní šířková modulace „Pulse Wide Modulation“</i>
<i>ASM</i>	<i>asynchronní motor</i>
<i>PI</i>	<i>proporcionálně-integrační</i>
<i>IGBT</i>	<i>Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem (Insulated Gate Bipolar Transistor)</i>

13.2 Veličiny

<i>C</i>	<i>kapacita</i>
<i>D</i>	<i>střída</i>
<i>d</i>	<i>diference</i>
<i>e</i>	<i>regulační odchylka</i>
<i>f</i>	<i>frekvence</i>
<i>G</i>	<i>přenos</i>
<i>I</i>	<i>elektrický proud</i>
<i>J</i>	<i>moment setrvačnosti</i>
<i>k</i>	<i>převodní konstanta</i>
<i>L</i>	<i>indukčnost</i>
<i>M</i>	<i>moment síly, vzájemná indukčnost</i>
<i>N, n</i>	<i>otáčivá rychlost, jmenovitá hodnota (nominal)</i>
<i>P</i>	<i>výkon, příkon</i>
<i>R</i>	<i>elektrický odpor</i>
<i>s</i>	<i>Laplaceův obraz</i>
<i>T</i>	<i>perioda, čas</i>
<i>t</i>	<i>čas (veličina proměnná v čase)</i>
<i>U</i>	<i>elektrické napětí</i>
<i>u</i>	<i>akční veličina</i>
<i>w</i>	<i>žádaná hodnota</i>
<i>y</i>	<i>regulovaná veličina</i>
<i>Z</i>	<i>impedance</i>
<i>ω</i>	<i>úhlová rychlost</i>

13.3 Indexy

<i>a</i>	<i>označení kotevní veličiny (armature)</i>
<i>d</i>	<i>dynamický</i>
<i>e</i>	<i>ekvivalentní</i>
<i>f</i>	<i>označení budicí veličiny (field)</i>
<i>h</i>	<i>hnací</i>
<i>i</i>	<i>indukovaný</i>
<i>max</i>	<i>maximální</i>



<i>min</i>	<i>minimální</i>
<i>N, n</i>	<i>jmenovitá veličina, počet</i>
<i>p</i>	<i>přivedený</i>
<i>r</i>	<i>index označení rotorové veličiny obecně</i>
<i>ref</i>	<i>referenční hodnota</i>
<i>v</i>	<i>veličina vinutí</i>
<i>z</i>	<i>zátěžný</i>



14 Použitá literatura a zdroje

- [1] LETTL Jiří, ČEŘOVSKÝ Zdeněk, PAVELKA Jiří: *Výkonová elektronika*, NAKLADATELSTVÍ ČVUT 2009, ISBN 978-80-01-03626-6
- [2] JAVŮREK, Jiří: *Regulace moderních elektrických pohonů*, GRADA 2003, ISBN 8024705079
- [3] PAVELKA Jiří, ZDĚNEK Jiří: *Elektrické pohony a jejich řízení*, NAKLADATELSTVÍ ČVUT 2010, ISBN 978-80-01-04642-5
- [4] Datasheety *dSpace, Matlab*
- [5] HEŘMAN, Josef a spol.: *Příručka silnoproudé elektrotechniky*, STNL 1986
- [6] BEJVL, Martin: *Systém dSpace v regulaci DC motoru*, ČVUT v Praze 2007, Diplomová Práce
- [7] STANIČEK, Zdenko: *Elektrický dynamometr s výkyvným statorem*, PATENTOVÝ SPIS 129656, Úřad pro patenty a vynálezy 1968
- [8] KLÁN, Petr: *Metody zlepšení PI regulace*, Časopis AUTOMA 2/2012
- [9] WIKIPEDIA: *Elektrický odpor*, https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrický_odpor
- [10] WIKIPEDIA: *PID regulátor*, https://cs.wikipedia.org/wiki/PID_regulátor
- [11] POHONNÁ TECHNIKA.CZ: *Druhy provozu*, <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/druhy-provozu>
- [12] POŠTOLKA, Martin: *Řídící jednotka pro tranzistorový čtyřkvadrantním měnič*, VUT v Brně 2012, Diplomová práce

15 Přílohy

15.1 Protokoly měření

PROTOKOL O MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO TOČIVÉHO STROJE			
Typ měření:		Mechanická charakteristika	
Jmenovité hodnoty stroje		Typ stroje	
<i>Napětí Un:</i>	250 V	<i>Stejnoseměrný motor</i>	
<i>Proud In:</i>	19.2 A	<i>Váha:</i>	132 kg
<i>Výkon Pn:</i>	4.4 kW	<i>Ventilace IC:</i>	416
<i>Otáčky Nn:</i>	1400 rpm	<i>Montáž IM:</i>	B3
<i>Účinité cos phi:</i>		<i>Barva:</i>	hnědá
<i>Bud./Rot U:</i>	230 V	<i>Materiál kostry:</i>	litina
<i>Bud./Rot. I:</i>	0.85 A	<i>Třída EX:</i>	
<i>Mech. Moment:</i>	30.01 Nm	<i>Podmínky měření:</i>	
<i>Záběrný proud:</i>	34.39 A	<i>Snížené napětí:</i>	250V V
<i>vztažný:</i>	1.791 In	<i>Dodatečný odpor:</i>	3,6 ohm
<i>Max. moment:</i>	40.49 Nm	<i>Okolní teplota:</i>	22 °C
<i>vztažný:</i>	1.349 Mn	<i>Atmosférický tlak:</i>	100 kPa
		<i>Okolní vlhkost:</i>	40 %
<i>Datum měření:</i>	7.5.2016	Poznámky:	
<i>Vypracoval:</i>	Josef Bráza		

PROTOKOL O MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO TOČIVÉHO STROJE			
Typ měření:		Mechanická charakteristika	
Jmenovité hodnoty stroje		Typ stroje	
Napětí U_n:	400 V	<i>Synchronní motor</i>	
Proud I_n:	14.5 A	Váha:	100 kg
Výkon P_n:	8 kW	Ventilace IC:	411
Otáčky n_n:	1500 rpm	Montáž IM:	1001
Účinník $\cos \phi$:	0.8	Barva:	
Bud./Rot U:	32 V	Materiál kostry:	litina
Bud./Rot. I:	7.6 A	Třída EX:	
Mech. Moment:	50.93 Nm	<i>Podmínky měření:</i>	
Záběrný proud:	9.078 A	Snížené napětí:	400 V
<i>vztažený:</i>	0.626 In	Dodatečný odpor:	- ohm
Záběrný moment:	40.19 Nm	Okolní teplota:	22 °C
<i>vztažený:</i>	0.789 Mn	Atmosférický tlak	100 kPa
		Okolní vlhkost:	40 %

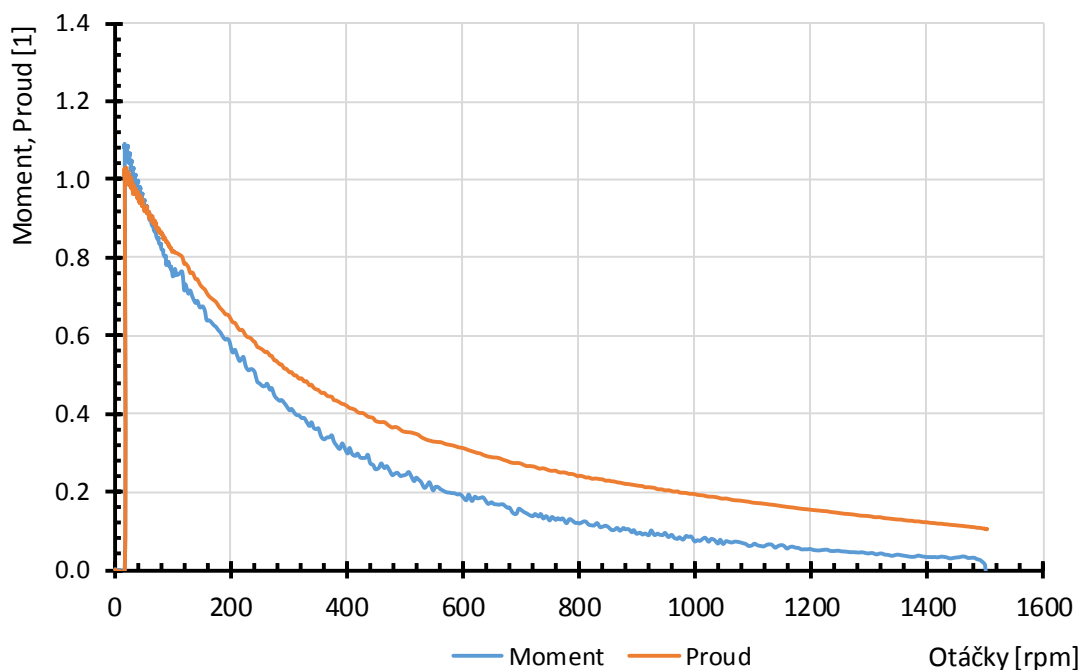
Otáčky [rpm]

Moment, Proud [1]

Datum měření:	4.5.2016		Poznámky:
Vypracoval:	Josef Bráza		

PROTOKOL O MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO TOČIVÉHO STROJE

Typ měření:		Momentová charakteristika	
Jmenovité hodnoty stroje		Typ stroje	
<i>Napětí Un:</i>	220 V	<i>Stejnoseměrný motor</i>	
<i>Proud In:</i>	22 A	<i>Váha:</i>	50 kg
<i>Výkon Pn:</i>	4.4 kW	<i>Ventilace IC:</i>	416
<i>Otáčky Nn:</i>	1400 rpm	<i>Montáž IM:</i>	B3
<i>Účinník cos phi:</i>	-	<i>Barva:</i>	hnědá RAL
<i>Bud./Rot U:</i>	220 V	<i>Materiál kostry:</i>	litina
<i>Bud./Rot. I:</i>	22 A	<i>Třída EX / třída IP:</i>	- IP23
<i>Mech. Moment:</i>	30.01 Nm	<i>Podmínky měření:</i>	
<i>Záběrný proud:</i>	22.71 A	<i>Snižené napětí:</i>	100 V
<i>vztažný:</i>	1.032 In	<i>Dodatečný odpor:</i>	- ohm
<i>Záběrný moment:</i>	32.69 Nm	<i>Okolní teplota:</i>	22 °C
<i>vztažný:</i>	1.089 Mn	<i>Atmosférický tlak:</i>	100 kPa
		<i>Okolní vlhkost:</i>	40 %



Datum měření:	4.5.2016	Poznámky:
Vypracoval:	Josef Bráza	
Stejnoseměrný motor se sériovým buzením, automatické měření v pracovním rozsahu motoru		

PROTOKOL O MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO TOČIVÉHO STROJE			
Typ měření:		Momentová charakteristika	
Jmenovité hodnoty stroje		Typ stroje	
Napětí U_n :	380 V D	Asynchronní motor	
Proud I_n :	11.8 A	Váha:	67 kg
Výkon P_n :	5.5 kW	Ventilace IC:	416
Otáčky N_n :	1430 rpm	Montáž IM:	B3
Účinník $\cos \phi$:	-	Barva:	hnědá
Bud./Rot. U:	- V	Materiál kostry:	litina
Bud./Rot. I:	- A	Třída EX:	-
		Podmínky měření:	
Mech. Moment:	36.73 Nm	Snížené napětí:	220 V
Záběrný proud:	57.39 A	Dodatečný odpor:	- ohm
vztažený:	4.863 In	Okolní teplota:	22 °C
Max. moment:	90.52 Nm	Atmosférický tlak	100 kPa
vztažený:	2.464 Mn	Okolní vlhkost:	40 %
<p> Moment M_s/M_n, Proud I_s/I_n vs. Otáčky [rpm] </p>			
Datum měření:	4.5.2016	Poznámky:	
Vypracoval:	Josef Bráza		

PROTOKOL O MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO TOČIVÉHO STROJE			
Typ měření:		Momentová charakteristika	
Jmenovité hodnoty stroje		Typ stroje	
		<i>Asynchronní motor</i>	
Napětí U_n:	380 V	Váha:	- kg
Proud I_n:	22 A	Ventilace IC:	416
Výkon P_n:	12 kW	Montáž IM:	B3
Otáčky n_n:	1400 rpm	Barva:	modrá
Účinník $\cos \phi$:	0.8		
		Podmínky měření:	
Bud./Rot U:	- V	Snížené napětí:	180 V
Bud./Rot I:	- A	Dodatečný odpor:	- ohm
		Okolní teplota:	22 °C
Mech. Moment:	81.86 Nm	Atmosférický tlak	101 kPa
Záběrný proud:	89.7 A	Okolní vlhkost:	40 %
<i>vztažený:</i>	4.1 I_n		
Max. moment:	183.0 Nm		
<i>vztažený:</i>	2.2 M_n		
Datum měření:		20.4.2016	
Vypracoval:		Josef Bráza	
		Poznámky:	

15.2 Seznam obrázků

Obrázek 2-1: Tenzometrické měření momentu [5]	16
Obrázek 2-2: Náhradní schéma cize buzeného motoru	17
Obrázek 2-3: Blokové schéma buzení [6]	17
Obrázek 2-4: Blokové schéma kotvy [6]	17
Obrázek 2-5: Mechanika blokově [6]	17
Obrázek 3-1: Základní regulační smyčka [8]	19
Obrázek 3-2: Kaskádní regulace [8]	22
Obrázek 4-1: Blokové znázornění elektrického stroje [5]	23
Obrázek 4-2: Mechanické charakteristiky stejnosměrného cize buzeného motoru [3]	24
Obrázek 4-3: Odporové spouštění stejnosměrného stroje [3]	25
Obrázek 4-4: Tvorba modulovaného signálu [2]	26
Obrázek 4-5: Znázornění pracovního diagramu [12]	27
Obrázek 4-6: Měnič prac. v kvadrantu I [12]	28
Obrázek 4-7: Měnič prac. v kvadrantu II [12]	28
Obrázek 4-8: Měnič pracující v kvadrantu I. a II. [12]	28
Obrázek 4-9: Měnič pracující v kvadrantu I. a IV. [12]	28
Obrázek 4-10: Měnič čtyřkvadrantním [12]	29
Obrázek 4-11: Pulzní řízení odporu se sériovým spínačem [1]	30
Obrázek 4-12: Pulzní řízení odporu s paralelním spínačem [1]	30
Obrázek 5-1: Kalandrová char. [3] Obrázek 5-2: Jeřábová char. [3]	31
Obrázek 5-3: Navíječková char. [3] Obrázek 5-4: Ventilátorová char. [3]	32
Obrázek 6-1: Schéma zapojení metody měření [9]	34
Obrázek 6-2: Průběh budicího proudu	36
Obrázek 6-3: Průběh kotevního proudu	36
Obrázek 7-1: Zjednodušené blokové schéma pohonu	41
Obrázek 8-1: Celá soustava v prostředí Simulink	43
Obrázek 8-2: Výkonová a mechanická soustava v prostředí PLECS	44
Obrázek 8-3: Proudový model stejnosměrného motoru	44
Obrázek 8-4: Napětový model stejnosměrného motoru s cizím buzením	45
Obrázek 8-5: Náhled ochrany kotvy a buzení (vlevo) a ovládaní brzděného chopperu (vpravo)	45
Obrázek 8-6: Blok regulátorů momentu a toku	45
Obrázek 8-7: Detail PI regulátoru	46
Obrázek 9-1: M skok: rychlost a moment	47
Obrázek 9-2: M skok: průběhy U a I	47
Obrázek 9-3: N skok: rychlost a moment	48
Obrázek 9-4: N skok: průběhy U a I	48
Obrázek 9-5: N reverzace: rychlost a moment	48
Obrázek 9-6: N reverzace: průběhy U a I	48
Obrázek 9-7: Výsledek simulace měřené momentové charakteristiky ASM s kotvou nakrátko (osa x: úhlová rychlost [rad/s], osa y: moment [Nm])	49
Obrázek 9-8: Lineární charakteristika	50
Obrázek 9-9: Kvadratická charakteristika	50
Obrázek 10-1: Hlavní model	51
Obrázek 10-2: Generátor rampy a periodického zatížení	52
Obrázek 10-3: Blok dSpace (měření a řízení PWM)	52
Obrázek 10-4: Nastavení LP filtru	53
Obrázek 10-5: Nastavení PWM modulátoru	53
Obrázek 10-6: Výpočet efektivní hodnoty harmonického průběhu vzorkovaného signálu pro frekvenci 50Hz v bloku „EF“	53
Obrázek 10-7: Blok modelu motoru	53
Obrázek 10-8: Ochrany	54
Obrázek 10-9: Detail ochrany kotvy Obrázek 10-10: Regulátor napětí v meziobvodu	55
Obrázek 10-11: Otáčková ochrana	55

Obrázek 10-12: Blok regulátorů a výběru typu řízení.....	56
Obrázek 10-13: Blok dynamického momentu	57
Obrázek 10-14: Detail PI regulátoru a jeho masky	57
Obrázek 10-15: Filtry veličin zobrazených v uživatelském rozhraní.....	57
Obrázek 10-16: Detail zásobníku (filtru)	58
Obrázek 10-17: Zjednodušené schéma silové části pracoviště	58
Obrázek 10-18: Zjednodušené schéma měřicí a ovládací části.....	59
Obrázek 10-19: Náhled pracoviště.....	59
Obrázek 10-20: Detail soustrojí	60
Obrázek 11-1: Náhled do vývojového prostředí	61
Obrázek 11-2: Uživatelské rozhraní.....	61
Obrázek 11-3: Záložka nastavení a parametrizace.....	62
Obrázek 11-4: Momentový skok $+10\text{Nm}$ (T: 1 s / div; M:4 Nm/div; N: 20 $\text{rads}^{-1}/\text{div}$; fialová: moment; modrá: rychlost)	62
Obrázek 11-5: Otáčkový skok 100 rad/s (T: 2,5 s / div; M:4 Nm/div; N: 20 $\text{rads}^{-1}/\text{div}$; fialová: moment; modrá: rychlost).....	63
Obrázek 11-6: Budící napětí a proud (T: 625 μs / div; U_f :125 V/div; I_f : 100 mA/div).....	63
Obrázek 11-7: Kotevní napětí a proud (T: 50 μs / div; U_a :125 V/div; I_a : 1 A/div).....	64
Obrázek 11-8: Napětí a proud na reostatu (T: 5 ms / div; U_a :125 V/div; I_a : 20 A/div).....	64

15.3 Seznam grafů

Graf 6-1: $k\Phi = f(I_f)$:.....	37
Graf 6-2: $k\Phi = f(I_f)$:.....	38
Graf 10-1: Automat kompenzující mrtvou dobu.....	54
Graf 11-1: Momentová charakteristika lineární elektrické zátěže - kalandr	65
Graf 11-2: Momentová charakteristika kvadratické elektrické zátěže - ventilátor	66
Graf 11-3 Momentová charakteristika konstantní elektrické zátěže - navíječka	66
Graf 11-4: Momentová charakteristika nepřímo úměrné zátěže - hoblovka	67
Graf 11-5: Mechanická charakteristika cize buzeného DC motoru s odporem a bez odporu v kotvě	68
Graf 11-6: Momentová charakteristika DC motoru se sériovým buzením	68
Graf 11-6:Automaticky změřená momentová charakteristika ASM 12 kW s průběhem proudu	69
Graf 11-7: Automaticky změřená momentová charakteristika ASM 5,5 kW s průběhem proudu	70
Graf 11-8: Mechanická charakteristiky asynchronního stroje	70
Graf 11-9: Zatěžování typu S6 stejnosměrného motoru s cizím buzením s odporem v kotvě....	71
Graf 11-10: Spouštění simulovaného kalandru motorem – mechanický průběh	72
Graf 11-11: Spouštění simulovaného kalandru – časový průběh.....	72
Graf 11-12: Spouštění simulovaného ventilátoru – mechanický průběh	73
Graf 11-13: Spouštění simulovaného ventilátoru – časový průběh	73
Graf 11-14: Spouštění simulovaného jeřábu – mechanický průběh.....	74
Graf 11-15: Spouštění simulovaného jeřábu – časový průběh.....	74
Graf 11-13: Doběh v závislosti na přidávané setrvačnosti	75

15.4 Seznam tabulek

Tabulka 4-1: Přehled způsobů řízení stejnosměrného stroje [5]	23
Tabulka 6-1: Štítek motoru	36
Tabulka 6-2: Štítek dynamometru.....	38