



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrických pohonů a trakce**

Měření a simulace na DC motoru

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Vedoucí práce: Ing. Vít Hlinovský, CSc.

Kryštof Malěř

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Kryštof Maléř**

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

Název tématu: **Měření a simulace na DC motoru**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracujte data z digitálního osciloskopu RTO1004
- 2) Změřte základní parametry DC motoru
- 3) Vypočítejte parametry DC motoru
- 4) Navrhněte model DC motoru v MatLab-Simuling
- 5) Porovnejte reálné měření a simulované průběhy

Seznam odborné literatury:

- [1] HRABOVCOVÁ, V., RAFAJDUS, P., FRANKO, M a HUDÁK, P. Meranie a modelovanie elektrických strojov. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2009.
- [2] MĚŘIČKA, J., HAMATA, V., VOŽENÍLEK, P. Elektrické stroje. Praha: ČVUT, 2000
- [3] KRÁL, M. Nelineární modely stejnosměrných strojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně

Vedoucí: Ing. Vít Hlinovský, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

Ing. Jan Bauer, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2016



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW apod.) uvedené v příloženém seznamu.

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

V Praze dne 15. 5. 2016

.....

podpis



Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu této diplomové práce Ing. Vítu Hlinovskému, CSc., za cenné rady, účinnou metodickou a odbornou pomoc. Dále bych také poděkoval všem, kteří mě v průběhu celého studia podporovali.



Abstrakt

Cílem této práce je měření dynamických charakteristik daného stejnosměrného stroje s permanentními magnety s jeho následnou simulací v programu Matlab Simulink. Úvodní část se zaměřuje na popis principu fungování stejnosměrných strojů, přičemž důraz je kladen na stroje s cizím buzením. Druhá část se zabývá vytvořením aplikace pro zpracování a analýzu dat z osciloskopu v prostředí Labwindows/CVI. Dále se práce zabývá měřením parametrů náhradního schématu daného motoru. Tyto parametry jsou následně použity v dynamickém modelu motoru. Charakteristiky z měření a modelu jsou nakonec srovnávány.

Klíčová slova: Stejnosměrný motor, dynamický model, Simulink.



Abstract

The aim of this work is to measure dynamic characteristics of the DC machine with permanent magnets and its following simulation in Matlab Simulink. The first part of thesis is focused on the description of the principles of DC machines, with an emphasis on machines with separate excitation. The second part deals with creating applications for processing data from the oscilloscope in LabWindows / CVI environment. Further the thesis is focused on measuring the parameters of the engine. These parameters are then used in a dynamic model of the engine. Finally the characteristics of measurements and model are compared.

Keywords: Direct current motor, dynamic model, Simulink.



Obsah

| | |
|--|----|
| Seznam obrázků..... | 9 |
| Seznam tabulek..... | 11 |
| Úvod..... | 12 |
| 1. Princip činnosti stejnosměrného stroje | 13 |
| 1.1 Konstrukční uspořádání..... | 13 |
| 1.2 Princip činnosti | 14 |
| 1.3 Vinutí rotoru..... | 15 |
| 1.4 Indukované napětí ve vinutí | 16 |
| 1.5 Elektromagnetický moment | 17 |
| 1.6 Reakce kotvy..... | 18 |
| 1.7 Komutace | 19 |
| 1.8 Typy stejnosměrných motorů..... | 20 |
| 1.8.1 Stejnosměrný motor s cizím buzením..... | 21 |
| 1.8.2 Zatěžovací charakteristiky..... | 21 |
| 1.8.3 Spouštění motoru s cizím buzením | 22 |
| 1.9 Způsoby řízení rychlosti | 23 |
| 1.10 Stejnosměrný motor s permanentními magnety..... | 24 |
| 1.10.1 Řízení rychlosti SS motoru s permanentními magnety..... | 25 |
| 1.11 Přejídné děje..... | 26 |
| 2. Analýza motoru | 27 |
| 2.1 Měřicí přípravek..... | 28 |
| 2.2 Práce s osciloskopem..... | 29 |
| 3. Prostředí LabWindows/CVI..... | 31 |
| 3.1 Tvorba uživatelského rozhraní | 31 |
| 3.2 Program pro analýzu signálu..... | 34 |
| 4. Měření parametrů stroje | 38 |
| 4.1 Měření odporu vinutí | 38 |



| | | |
|-------|---|----|
| 4.2 | Měření indukčnosti kotvy..... | 38 |
| 4.3 | Určení konstanty stroje..... | 40 |
| 5. | Simulace motoru v programu Matlab Simulink..... | 41 |
| 5.1 | Parametry modelu..... | 44 |
| 5.1.1 | Moment setrvačnosti..... | 44 |
| 5.1.2 | Mechanický moment | 44 |
| 5.1.3 | Napěťový úbytek na kartáčích | 44 |
| 5.2 | Výsledky simulace..... | 46 |
| 6. | Měření na motoru | 48 |
| 6.1 | Porovnání hodnot z měření a modelu | 49 |
| 7. | Závěr..... | 53 |
| 8. | Použitá literatura | 54 |
| | Seznam příloh na CD | 55 |



Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 1 Hlavní části stejnosměrného stroje..... | 13 |
| Obr. 2 Princip stejnosměrného stroje [1]..... | 15 |
| Obr. 3 Smyčkové a vlnové vinutí [1] | 15 |
| Obr. 4 Reakce kotvy stejnosměrného stroje[1]..... | 18 |
| Obr. 5 Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře [7]..... | 18 |
| Obr. 6 Princip změna smyslu proudu v komutující cívce..... | 19 |
| Obr. 7 Průběh komutace [1]..... | 20 |
| Obr. 8 Druhy stejnosměrných motorů..... | 20 |
| Obr. 9 Náhradní schéma stejnosměrného motoru s cizím buzením..... | 21 |
| Obr. 10 Zatěžovací charakteristiky motoru s cizím buzením [1]..... | 22 |
| Obr. 11 Řízení motoru s cizím buzením..... | 23 |
| Obr. 12 Mechanická charakteristika DC motoru s permanentními magnety | 24 |
| Obr. 13 Řez DC motorem s permanentními magnety | 24 |
| Obr. 14 Pracovní oblasti motoru..... | 25 |
| Obr. 15 Výkres analyzovaného motoru Buhler 1.13.044.261.50 | 27 |
| Obr. 16 Charakteristiky motoru | 27 |
| Obr. 17 Principiální schéma přípravku..... | 28 |
| Obr. 18 Fotografie přípravku | 28 |
| Obr. 19 Osciloskop RTO 1004 | 29 |
| Obr. 20 Srovnání Sample a High resolution režimu..... | 29 |
| Obr. 21 Blokové schéma měřicího pracoviště | 30 |
| Obr. 22 Úvodní obrazovka..... | 31 |
| Obr. 23 Tvorba uživatelského rozhraní | 32 |
| Obr. 24 Aplikace pro sčítání dvou čísel..... | 32 |
| Obr. 25 Hlavní parametry prvku..... | 33 |
| Obr. 26 Uživatelské rozhraní aplikace pro měření | 34 |
| Obr. 27 Panel zobrazení jednotlivých kanálů..... | 35 |



| | |
|--|----|
| Obr. 28 Příklad parametrů osy času..... | 35 |
| Obr. 29 Zobrazení informací..... | 36 |
| Obr. 30 Vysouvací menu aplikace..... | 36 |
| Obr. 31 Nabídka menu | 36 |
| Obr. 32 Ukázka běhu aplikace | 37 |
| Obr. 33 Principiální schéma zapojení pro měření odporu kotvy..... | 38 |
| Obr. 34 Principiální schéma zapojení pro měření indukčnosti kotvy | 39 |
| Obr. 35 Průběh proudu a napětí při měření indukčnosti..... | 39 |
| Obr. 36 Průběh indukovaného napětí a otáček při doběhu motoru..... | 40 |
| Obr. 37 Náhradní schéma motoru s naměřenými parametry | 40 |
| Obr. 38 Náhradní schéma stejnosměrného motoru..... | 41 |
| Obr. 39 Simulink model stejnosměrného motoru s permanentními magnety | 43 |
| Obr. 40 Kovografická křivka [8] | 45 |
| Obr. 41 Průběh proudu kotvy při rozběhu motoru z modelu | 46 |
| Obr. 42 Průběh otáček při rozběhu motoru z modelu..... | 47 |
| Obr. 43 Průběh indukovaného napětí při rozběhu motoru z modelu..... | 47 |
| Obr. 44 Porovnání průběhu proudu z měření a modelu | 50 |
| Obr. 45 Porovnání průběhu otáček z měření a modelu | 50 |
| Obr. 46 Porovnání průběhu proudu při upravených parametrech modelu | 51 |
| Obr. 47 Porovnání průběhu otáček při upravených parametrech modelu | 52 |



Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 1 Štítkové hodnoty motoru | 27 |
| Tab. 2 Zjišťované hodnoty jednotlivých měření..... | 30 |
| Tab. 3 Parametry dynamického modelu..... | 44 |
| Tab. 4 Srovnání ustálených hodnot z měření a modelu..... | 49 |
| Tab. 5 Srovnání vrcholové hodnoty proud při rozběhu..... | 49 |
| Tab. 6 Srovnání mechanických časových konstant | 49 |

Úvod

Stejnoseměrný stroj je historicky nejstarší elektrický stroj. Je schopen pracovat jako motor a generátor. Jeho hlavní využití nejprve spočívalo v generování stejnosměrného proudu. S rozvojem výkonové elektroniky jsou však generátory postupně nahrazovány polovodičovými usměrňovači.

V současné době stejnosměrné stroje nachází uplatnění zejména jako motory v regulovaných pohonech, kde se využívá jeho relativně snadné regulace otáček. Pro svůj velký záběrný moment se používají stejnosměrné stroje se sériovým buzením v trakčních vozidlech.

Stejnoseměrné stroje jsou vyráběny od řádů výkonu několika wattů až po jednotky MW. Mohou být buzeny jak elektromagnetem, tak magnetem permanentním. Jejich hlavní nevýhodou je komutátor. Tato část je nejvíce mechanicky a tepelně namáhána.

Cílem této práce je vytvoření dynamického modelu stejnosměrného stroje s permanentními magnety s následným srovnáním výsledků z měření na skutečném motoru. Analyzovaným dynamickým stavem motoru a modelu bude rozběh. Pro zpracování dat z měření se využije programového prostředí LabWindow/CVI. Dále na základě náhradního schématu cize buzeného stroje bude vytvořen model daného stroje v programu Matlab Simulink. Vstupní parametry tohoto modelu budou získány z měření na skutečném motoru.

1. Princip činnosti stejnosměrného stroje

1.1 Konstrukční uspořádání

Základní části stejnosměrného stroje tvoří stator, rotor a komutátor. Stator slouží k vytvoření magnetického toku, který se uzavírá kostrou neboli jhem statoru. Stator je tvořen hlavními póly, na kterých je navinuto budicí vinutí. Může být vyroben z plného, litého materiálu, protože stejnosměrný proud v budicím vinutí budí stálý magnetický tok, a nevznikají tedy velké ztráty vířivými proudy. Pro vytvoření příznivého průběhu magnetického pole ve vzduchové mezeře jsou hlavní póly opatřeny pólovými nástavci.

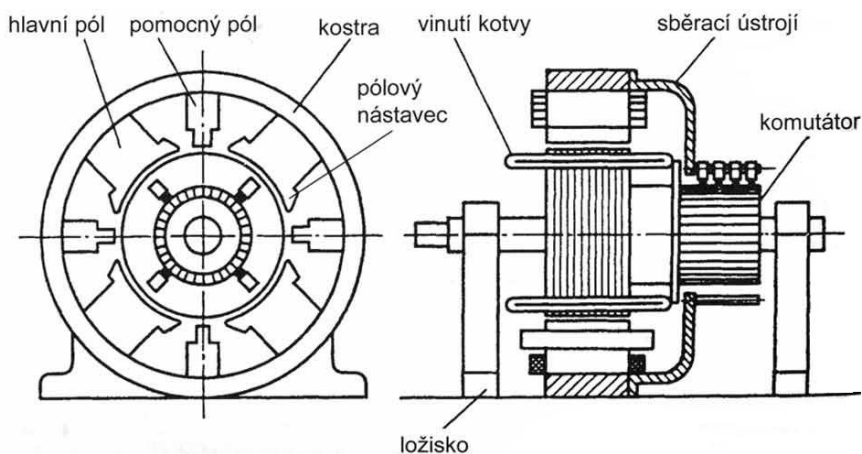
Součástí statoru jsou také pomocné póly, které slouží ke zlepšení komutace stejnosměrného stroje. Jejich vinutí je zapojeno do série s kotvou. Stroje velkých výkonů disponují také kompenzačním vinutím, které zmenšuje lamelové napětí, a tím dále zlepšuje komutaci.[1]

Rotor neboli kotva je uložen v ložiscích, má tvar válce a je na společné hřídeli s komutátorem. Je složen z izolovaných plechů, aby vlivem přemagnetování v něm nevznikaly velké ztráty vířivými proudy. Vinutí rotoru je tvořeno z cívek uložených v drážkách. Kvůli odstředivým silám, které působí na vodiče během otáčení, jsou čela cívek opatřena bandážemi. Jednotlivé vývody cívek jsou vyvedeny na lamely komutátoru.

Komutátor je složen z navzájem izolovaných lamel. Na lamely dosedají uhlíkové kartáče uložené v kartáčových drážkách. Tím je tvořeno sběrací ústrojí, které zajišťuje převod proudu mezi vnějším obvodem a vinutím kotvy.

Rotor je od statoru oddělen vzduchovou mezerou. Její velikost závisí na výkonu stroje a má významný vliv na jeho vlastnosti.

Další neméně podstatnou součástí stejnosměrného stroje je ventilátor, sloužící k chlazení stroje a svorkovnice, na kterou jsou vyvedena jednotlivá vinutí.



Obr. 1 Hlavní části stejnosměrného stroje

1.2 Princip činnosti

Činnost stejnosměrného stroje je založena na vzájemném působení magnetického pole statoru a rotoru. Rotor se otáčí ve stálém magnetickém poli vytvořeném státorem. Působením komutátoru se proud ve vodičích rotoru rozdělí tak, že v jedné polovině vodičů teče proud jedním směrem a v druhé polovině směrem opačným, jak je patrné z Obr. 2. Magnetické pole kotvy má při otáčení stálou polohu kolmou k budicímu magnetickému poli. Proud ve vodičích kotvy má střídavý charakter, avšak vlivem komutátoru se proud jeví jako stejnosměrný. [1]

Pokud je rotor poháněn mezi póly statoru, dochází k indukci střídavého napětí ve vodičích kotvy. Smysl indukovaného napětí lze určit podle pravidla pravé ruky¹. Velikost indukovaného napětí je dána vztahem:

$$U_i = B \cdot l \cdot v \quad (\text{V; T, m, m.s}^{-1}) \quad (1.1)$$

kde v je rychlost vodiče délky l pohybujícího se v magnetickém poli o indukci B .

Vlivem komutátoru se na výstupu objeví stejnosměrné napětí. Stroj tak pracuje jako dynamo a je zdrojem stejnosměrného proudu.

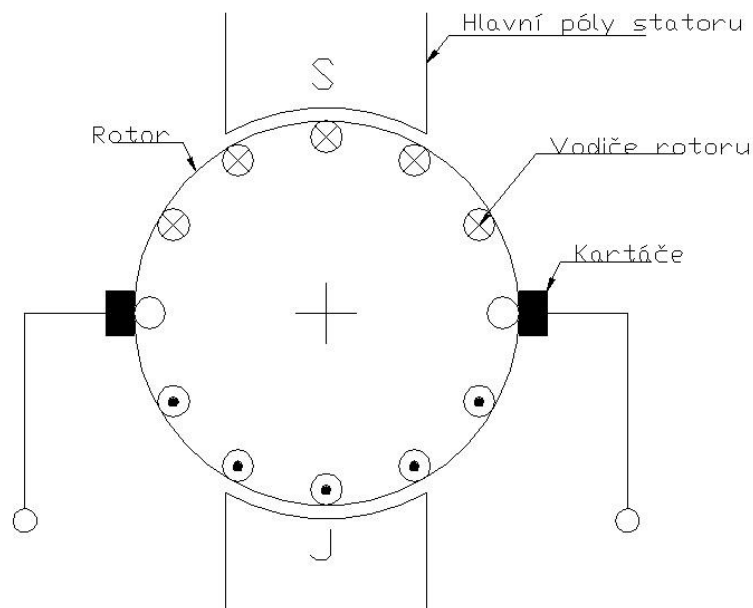
Pracuje-li stroj v motorickém režimu, jsou vodiče kotvy napájeny stejnosměrným proudem přes komutátor. Pak na vodič protékáný proudem v magnetickém poli působí magnetická síla dána následujícím vztahem.

$$F_m = B \cdot l \cdot i \quad (\text{N; T, m, A}) \quad (1.2)$$

Směr této síly lze určit pomocí Flemingova pravidla levé ruky². Komutátor v motorickém režimu zajišťuje změnu smyslu proudu při přechodu z jednoho na druhý pól stroje.

¹ Položíme-li pravou ruku na vodič pohybující se v magnetickém poli tak, aby siločáry vstupovaly do dlaně a palec ukazoval směr pohybu vodiče, pak ostatní prsty ukazují směr elektromotorického napětí.

² Položíme-li levou ruku na vodič pohybující se v magnetickém poli tak, aby siločáry vstupovaly do dlaně a prsty ukazovaly směr proudu, pak palec ukazuje směr působící síly.

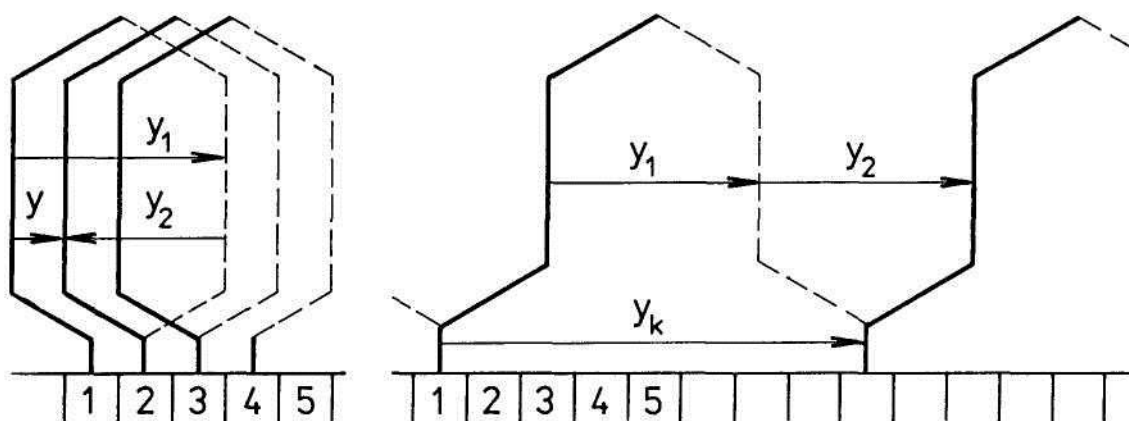


Obr. 2 Princip stejnosměrného stroje [1]

1.3 Vinutí rotoru

Vinutí rotoru stejnosměrného stroje je rozloženo po jeho obvodu a uloženo v drážkách. Velikost a počet drážek jsou voleny tak, aby nedocházelo k přesycení zubů. Vinutí se provádí jako válcové, jehož obě strany jsou aktivní. Většinou se používá vinutí dvouvrstvé, kde přední strana cívky leží v horní vrstvě drážky a zadní strana ve spodní vrstvě. Cívka je tvořena jedním nebo několika závity. [3]

Podle způsobu připojení cívek ke komutátoru se vinutí dělí na smyčkové a vlnové, jak je naznačeno na Obr. 3.



Obr. 3 Smyčkové a vlnové vinutí [1]

Vzdálenost přední a zadní části téže cívky měřená po obvodu rotoru se nazývá *zadní krok cívky* y_1 . Velikost indukovaného napětí u dynama nebo momentu u motoru závisí právě na velikosti zadního

kroku. Největších hodnot tyto veličiny dosahují, je-li zadní krok roven pólové rozteči τ_p . Ta je definována jako vzdálenost dvou sousedních pólů měřená po obvodu rotoru. Pro zlepšení komutace se však zadní krok zkracuje.[4]

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} \quad (\text{m; m, -}) \quad (1.3)$$

kde $2p$ je počet pólů.

Vzdálenost mezi zadní stranou první cívky a přední stranou následující cívky udává *přední krok* y_2 . *Celkový krok* y je vzdálenost mezi předními stranami dvou sousedních cívek zapojených za sebou. *Výsledný krok komutátoru* y_k udává počet lamel mezi začátkem a koncem jedné cívky.

U smyčkového vinutí se připojuje postupně k cívkám jedna lamela za druhou. Kartáče komutátoru spojují vinutí do paralelních větví. Počet paralelních větví je roven počtu pólů, $2a = 2p$. Na stroji musí tedy být $2p$ sběracích kartáčů. Polarita kartáčů se po obvodu komutátoru střídá a kartáče stejné polarity se spojují paralelně. Protože smyčkové vinutí vytváří větší počet paralelních větví, nazývá se *paralelní vinutí*. [4]

Proud ve vodiči jedné paralelní větve je dán počtem paralelních větví.

$$I_v = I_a = \frac{I}{2a} \quad (\text{A; A, -}) \quad (1.4)$$

U vlnového vinutí vychází vždy jen dvě paralelní větve, tedy $2a = 2$. Při tomto způsobu vinutí vychází největší možný počet cívek spojených do série. Proto se vlnové vinutí nazývá *sériové*.

Sériová vinutí se používají většinou u strojů na vyšší napětí, např. dráhové motory, avšak nejčastěji používané vinutí u běžných strojů je vinutí paralelní. [1]

1.4 Indukované napětí ve vinutí

Napětí se indukuje ve vodičích kotvy o aktivní délce l_i , pohybujících se v magnetickém poli o indukci B a obvodové rychlosti v . Velikost indukovaného napětí při sériovém zapojení je dána součtem napětí indukovaných v jednotlivých vodičích. [1]

$$U_i = \sum_{2N} U_i = \sum_{2N} B \cdot l_i \cdot v \quad (\text{V; T, m, m.s}^{-1}) \quad (1.5)$$

Magnetický tok je dán objemem tělesa daného průběhem indukce.

$$\phi = l_i \cdot \int_0^{\tau_p} B dx \quad (1.6)$$

Při provedení náhrady tvaru tělesa magnetické indukce za obdélníkový průběh je vzniklý kvádr délky l_i o šířce τ_p a výšce $B_{stř}$. Tím se získají stejná indukovaná napětí ve všech vodičích pro stroj s $2N$ aktivními vodiči zapojených do $2a$ paralelních větví.

Pro střední hodnotu indukce platí

$$B_{stř} = \frac{\phi}{l_i \cdot \tau_p} = \frac{\phi \cdot 2p}{l_i \cdot \pi D} \quad (\text{T; Wb, m, m}) \quad (1.7)$$

a pro obvodovou rychlost platí

$$v = \omega_m \cdot D / 2 \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}; \text{s}^{-1}, \text{m}) \quad (1.8)$$

Po dosazení těchto vztahů do rovnice pro indukované napětí a vynásobením počtem vodičů jedné paralelní větve dostaneme vztah pro indukované napětí.

$$U_i = \frac{pV}{2\pi a} \cdot \phi \cdot \omega_m = c \cdot \phi \cdot \omega_m \quad (\text{V; Wb, s}^{-1}) \quad (1.9)$$

Pro vyjádření indukovaného napětí v závislosti na otáčkách si vyjádříme úhlovou rychlost.

$$\omega_m = \frac{2\pi n}{60} \quad (\text{s}^{-1}; \text{min}^{-1}) \quad (1.10)$$

A po dosazení do rovnice (1.9).

$$U_i = \frac{pV}{2\pi a} \cdot \phi \cdot n = c_E \cdot \phi \cdot n \quad (\text{V; Wb, min}^{-1}) \quad (1.11)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že indukované napětí stroje je úměrné velikosti magnetického toku a rychlosti otáčení. [1]

1.5 Elektromagnetický moment

Točivý moment vychází ze vztahu pro sílu působící na vodič protékáný proudem v magnetickém poli o indukci B , jež je kolmá na směr vodiče.

Celkový moment stroje je dán z momentu působícího na jeden vodič za předpokladu obdélníkového průběhu magnetické indukce. [1]

$$M_{iv} = F_{iv} \cdot \frac{D}{2} = B_{stř} \cdot I_v \cdot l_i \cdot \frac{D}{2} \quad (\text{Nm; T, A, m}) \quad (1.12)$$

Hodnota magnetické indukce se dosadí ze vztahu (1.7) a hodnota proudu ze vztahu (1.4). Celkový vnitřní moment stroje je pak dán součtem momentů všech vodičů.

$$M_i = \frac{pV}{2\pi a} \cdot \phi \cdot I = c \cdot \phi \cdot I \quad (\text{Nm; Wb, A}) \quad (1.13)$$

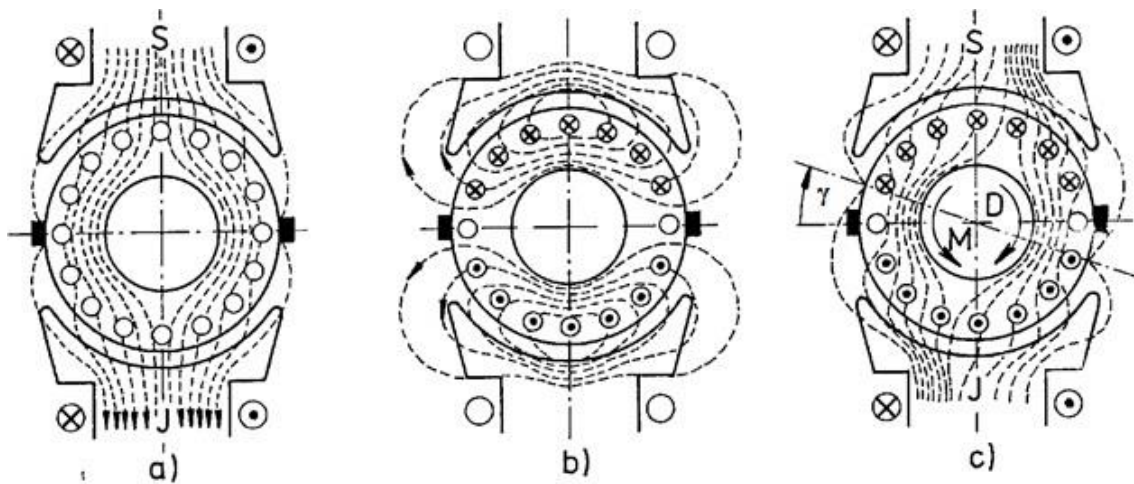
Z tohoto vztahu vyplývá, že elektromagnetický moment stroje je úměrný velikosti magnetického toku a proudu motorem. [1]

1.6 Reakce kotvy

Pokud vinutím kotvy neprochází proud a stroj je nabuzený, uplatňuje se pouze pole hlavních pólů, jak je naznačeno Obr. 4a.

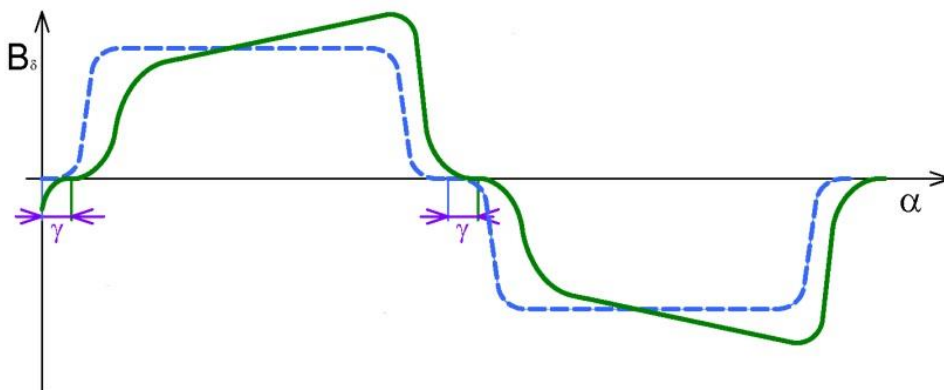
Při zatížení je kotva protékána stejnosměrným proudem. Tento proud vytvoří spolu se závitů kotvy magnetomotorické napětí F_a , které vybudí magnetický tok ϕ_a nazývaný *reakční tok*. Působení tohoto toku na pole hlavních pólů se nazývá *reakce kotvy*.

Jak je naznačeno na Obr. 4c, výsledné magnetické pole je deformováno a je složeno z hlavního toku ϕ_p a reakčního toku ϕ_a . Osa výsledného magnetického pole je u dynama natočena ve směru otáčení a u motoru proti směru otáčení rotoru. [4]



Obr. 4 Reakce kotvy stejnosměrného stroje [1]

Na následujícím obrázku je zobrazen průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře pod pólovými nástavci v rozvinutém tvaru. Čárkovaně je vyznačen průběh magnetického pole hlavních pólů. Výsledný deformovaný magnetický tok je vynesena plnou čarou. Úhel γ odpovídá pootočení magnetické neutrály, což zhoršuje komutaci.



Obr. 5 Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře [7]

Stroje se navrhují tak, aby byly co nejlépe magneticky využity, jejich pracovní bod tedy leží v blízkosti kolena magnetizační charakteristiky. Vlivem zvětšení magnetické indukce se část pólového nástavce přesyť. Tím se zmenší celkový magnetický tok stroje, což může mít za následek zmenšení svorkového napětí dynamu nebo zmenšení momentu motoru.

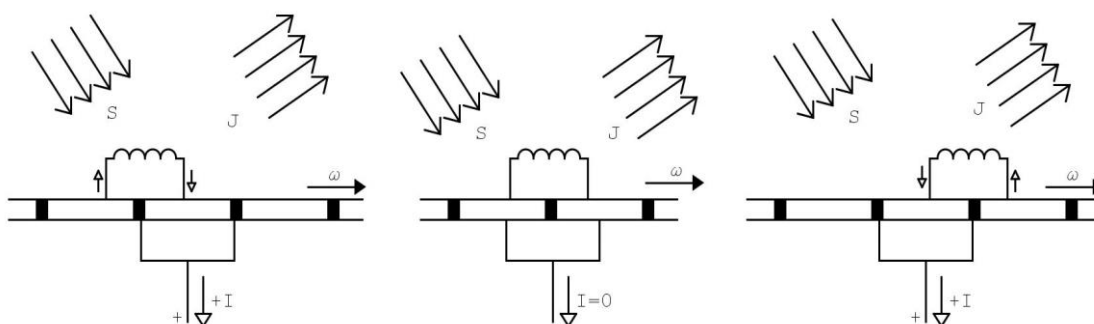
Dále se také kvůli zvětšení magnetické indukce ve vzduchové mezeře pod pólovými nástavci zvyšuje lamelové napětí, které může mít za následek projiskření mezi kartáči a poškození stroje.

Pro potlačení vlivu reakce kotvy je používáno kompenzační vinutí. Toto vinutí je uloženo v pólových nástavcích a je zapojeno tak, aby pole vytvořené těmito vodiči bylo orientováno proti reakčnímu poli kotvy. Kompenzační vinutí je zapojeno do série s obvodem kotvy pro zajištění kompenzace reakce kotvy při různém zatížení.

1.7 Komutace

Jednotlivé cívky kotvy jsou vyvedeny k lamelám komutátoru. Kartáče komutátoru tak dělí uzavřené vinutí na paralelní větve. Komutace je změna proudu v cívce jedné polaritu na polaritu opačnou při přechodu z jedné paralelní větve do druhé. Cívka je při tomto ději kartáči komutátoru spojena nakrátko.

[1]

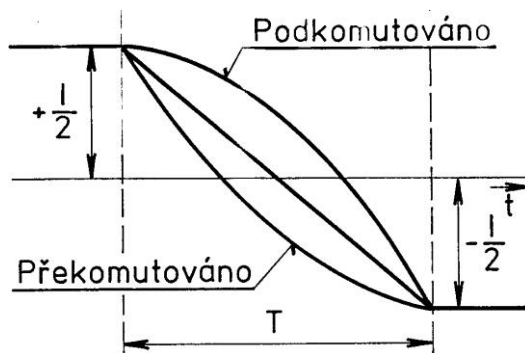


Obr. 6 Princip změny smyslu proudu v komutující cívce

Na Obr. 6 je naznačen průběh změny proudu v jedné cívce při přechodu ze severního pólu pod pól jižní. Na prostředním obrázku je cívka v neutrální ose, kartáč ji spojuje nakrátko a proud ji neprochází. Polarita kartáče je stále stejná. Pod jižním pólem se tedy změní smysl proudu.

Ideální průběh změny proudu při komutaci je lineární. Cívka má však velkou vlastní indukčnost a vzájemnou indukčnost současně komutujících cívek. Změnou proudu se v indukčnostech indukuje tzv. *reaktanční napětí*, které působí proti příčině svého vzniku, a tím zhoršuje komutaci.

Cívka má také určitou šířku a jednotlivé její vodiče nejsou všechny současně v nulové poloze. Dále kartáč sběracího ústrojí většinou spojuje nakrátko více cívek, jejichž jednotlivé vodiče nejsou všechny v prostoru nulového magnetického pole. Vlivem těchto faktů se do cívek indukuje napětí z pole hlavních magnetů.



Obr. 7 Průběh komutace [1]

Na Obr. 7 je vyznačen průběh komutace. Působením reaktančního napětí proud zpočátku klesá pomalu a poté je strmost poklesu značná. Tím na konci komutace vzroste proudová hustota mezi kartáčem a lamelou a dochází k jiskření nad podbíhající hranou kartáče. Stroj je podkomutován. [1]

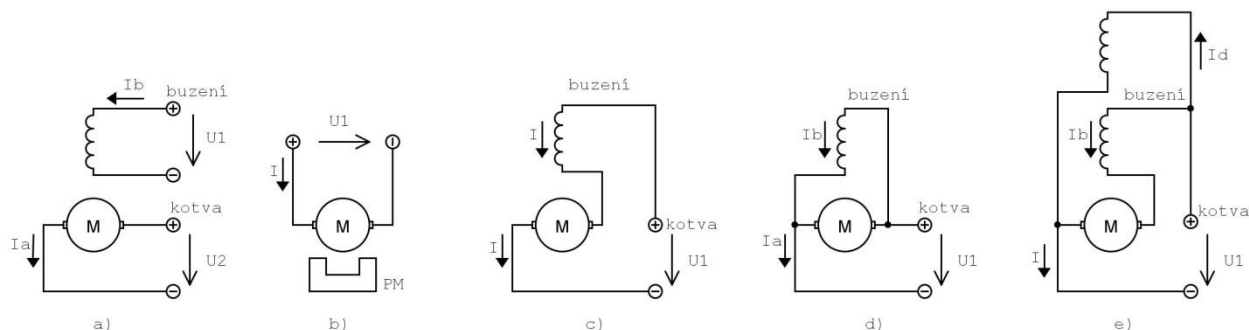
Zlepšení komutace spočívá v potlačení reaktančního napětí napětím stejně velkým, ale opačného smyslu. K vytvoření takového pole se používají úzké komutační póly umístěné mezi póly hlavními. Komutační póly také částečně kompenzují reakci kotvy.

Nevhodným vykompenzováním reaktančního napětí se může stroj také překomutovat, kdy dochází k jiskření mezi lamelou a kartáčem na náběžné straně.

1.8 Typy stejnosměrných motorů

Napájení budicího vinutí stejnosměrného motoru může být cizí nebo vlastní. U cize buzeného motoru (Obr. 8a) je budicí vinutí napájeno z jiného zdroje stejnosměrného proudu než vinutí kotvy. Další způsob nabuzení je pomocí permanentních magnetů (Obr. 8b). Toho je využíváno zejména u menších motorků.

Motory s vlastním buzením se dělí podle způsobu zapojení na sériové (Obr. 8c), derivační (Obr. 8d) a kompaundní (Obr. 8e).

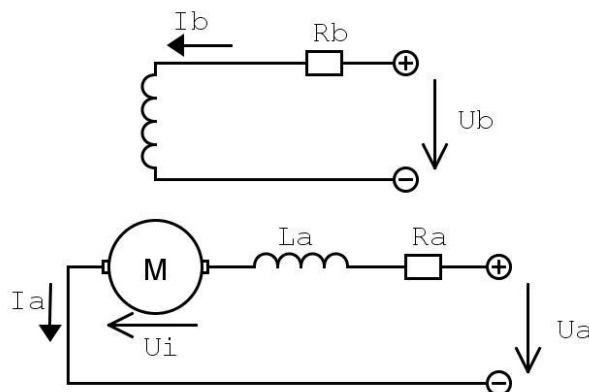


Obr. 8 Druhy stejnosměrných motorů

Protože cílem této práce je analýza stejnosměrného motoru s permanentními magnety, bude se dále práce zabývat pouze stroji s cizím buzením.

1.8.1 Stejnsměrný motor s cizím buzením

Napětové rovnice cize buzeného stroje vychází z náhradního schématu, jehož zjednodušené schéma je zobrazeno na Obr. 9.



Obr. 9 Náhradní schéma stejnosměrného motoru s cizím buzením

Pro obvod kotvy platí:

$$u_a(t) = R_a \cdot i_a + L_a \frac{d i_a}{dt} + u_i(t) = R_a \cdot i_a + L_a \frac{d i_a(t)}{dt} + c \Phi n \quad (1.14)$$

Pro obvod buzení platí:

$$u_b(t) = R_b \cdot i_b + L_b \frac{d i_b}{dt} \quad (1.15)$$

Pro hnací moment platí rovnice:

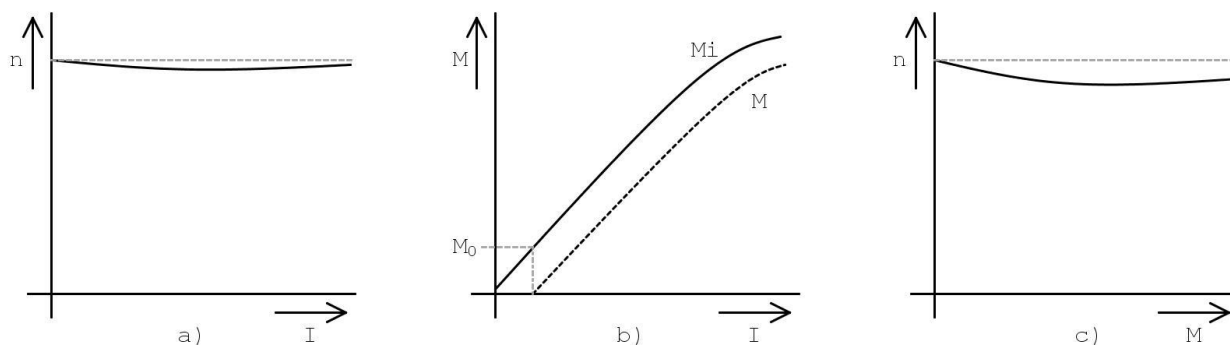
$$M = c \Phi \cdot i_a \quad (1.16)$$

Kde u_a je svorkové napětí na kotvě stroje, c konstanta stroje, Φ magnetický tok vyvolaný budicím proudem i_b , n jsou otáčky stroje, R_a je odpor kotvy, i_a proud kotvy a u_i indukované napětí.

1.8.2 Zatěžovací charakteristiky

Jsou charakteristiky, které popisují vlastnosti motoru při zatížení. Můžeme je vidět na Obr. 10. Mezi tyto charakteristiky patří:

- Rychlostní charakteristika $n(I)$ při $U_a = konst.$ a $I_b = konst.$
- Momentová charakteristiky $M(I)$ při $U_a = konst.$ a $I_b = konst.$
- Mechanická charakteristika $n(M)$ při $U_a = konst.$ a $I_b = konst.$



Obr. 10 Zatěžovací charakteristiky motoru s cizím buzením [1]

Rychlost s rostoucím proudem mírně klesá kvůli rostoucímu úbytku napětí na obvodu kotvy. Rychlostní charakteristika při vyšších proudech může stoupat vlivem zeslabení pole, které převažuje nad vlivem úbytku napětí na kotvě.

Momentová charakteristika je přímková. Při vyšších proudech se projevuje vliv demagnetizace. Mechanický moment M na hřídeli stroje je menší oproti vnitřnímu elektromagnetickému M_i o ztráty naprázdno M_0 .

Mechanická charakteristika je podobná rychlostní, protože závislost momentu na proudu je téměř lineární. [1]

1.8.3 Spouštění motoru s cizím buzením

Základní podmínkou při spouštění motoru je jeho nabuzení. Při dostatečném nabuzení a menším proudu kotvou motor může vyvinout velký záběrný moment.

Motor se většinou nespouští přímým připojením na síť, protože ve stojícím rotoru se neindukuje žádné napětí a proud je omezen pouze odporem kotvy, který je malý. Proud by tak dosahoval nebezpečných hodnot.

Spouštění motoru se provádí změnou napětí na kotvě pomocí zdroje říditelného napětí nebo pomocí odporového spouštěče. U odporového spouštění je obvod kotvy připojen přes spouštěcí stupňovitý odpor, který se postupně vyřazuje. Při snižování hodnoty odporu stoupne napětí na kotvě a proud kotvou. Tím vzroste moment, který urychluje rotor. Rychlost se následně ustálí na vyšších otáčkách. Celý odpor se tak postupně vyřazuje.

1.9 Způsoby řízení rychlosti

Způsoby řízení cize buzeného stejnosměrného stroje vychází z napěťové rovnice při vyjádření otáček.

$$n = \frac{U_a - R_a I_a}{c\Phi} \quad (1.17)$$

- **Změnou odporu obvodu kotvy R_a**

Tento způsob spočívá v připojení přídavného odporu do obvodu kotvy a jeho změnou můžeme řídit rychlost motoru. Jedná se o obdobu odporového spouštění. Protože se energie v odporu mění v teplo, je tento způsob řízení neekonomický a nevyužívá se.

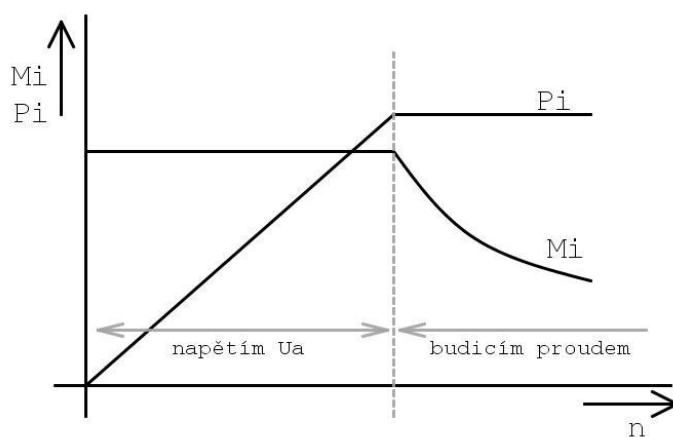
- **Změnou magnetického toku Φ**

Využívá se k dosažení otáček větších, než jsou otáčky jmenovité. Při snižování magnetického toku rostou otáčky, avšak stroj není plně magneticky využit a dochází ke snížení momentu stroje. Protože napětí a proud kotvou se nemění, jedná se o způsob řízení otáček při konstantním vnitřním výkonu. Tento způsob není možný u motorů s permanentními magnety.

$$P_i = M \cdot \omega = c\Phi \cdot I \cdot \frac{U_i}{c\Phi} = U_i \cdot I = konst. \quad (1.18)$$

- **Změnou napětí na kotvě U_a**

Jedná se o řízení rychlosti při konstantním vnitřním momentu. Otáčky se s napětím mění plynule k jmenovité hodnotě.

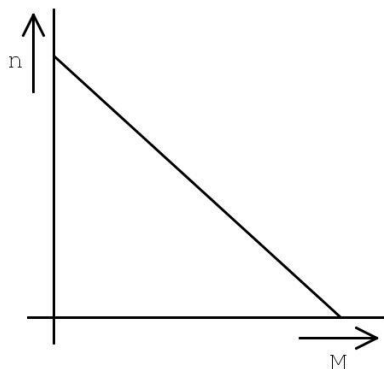


Obr. 11 Řízení motoru s cizím buzením

1.10 Stejnoseměrný motor s permanentními magnety

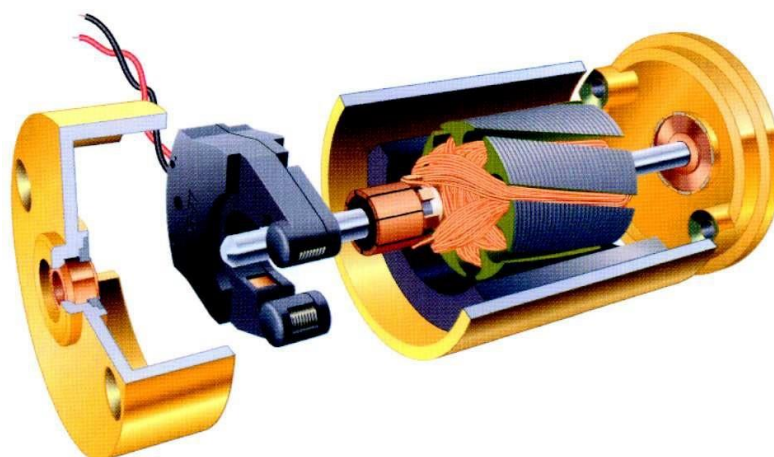
Stejnoseměrný motor s permanentními magnety je obdobou motoru cize buzeného. K vytvoření magnetického toku nepoužívá vinutí, ale permanentní magnety. Z toho vyplývá výhoda těchto strojů v tom, že pro vytvoření potřebného magnetického toku nevyžadují budicí výkon, avšak za cenu, že magnetický tok nelze účinně regulovat.

Mechanická charakteristika stejnosměrného motoru s permanentními magnety má podstatně větší sklon než motor cize buzený. Otáčky se zátěžným momentem výrazně klesají, jak je patrné z Obr. 12.



Obr. 12 Mechanická charakteristika DC motoru s permanentními magnety

Na následujícím obrázku je řez klasického provedení stejnosměrného motoru s permanentními magnety. Permanentní magnety jsou uloženy ve feromagnetickém plášti, rotor je navinut okolo rotorových plechů.



Obr. 13 Řez DC motorem s permanentními magnety[14]

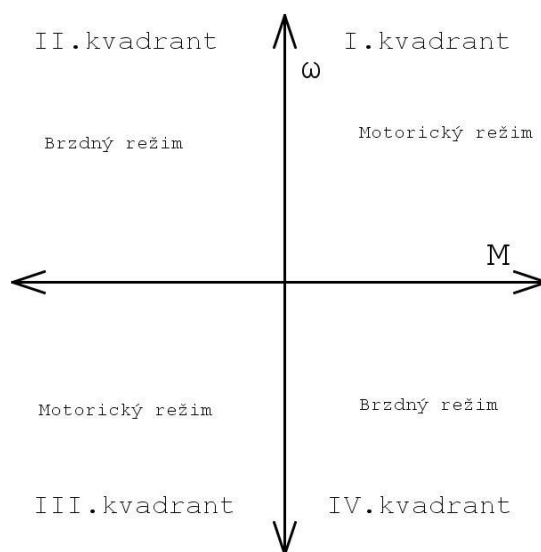
Permanentní magnety se vyrábí z materiálů magneticky tvrdých, které se vyznačují velkou remanentní indukci. Zpočátku se permanentní magnety vyráběly ze slitin AlNiCO. V současné době se používají zřídka, protože jsou citlivé na podbuzení magnetického obvodu reakcí kotvy.

Velmi rozšířené pro nízkou cenu jsou feritové magnety. Ty se však nevyznačují vysokou hodnotou remanentní indukce. Nejmodernější materiály pro permanentní magnety (SmCo a NdFeB) jsou na bázi vzácných zemin, které se vyznačují velkou hodnotou měrné energie. [10]

1.10.1 Řízení rychlosti SS motoru s permanentními magnety

Jak již bylo uvedeno, řízení rychlosti motoru s permanentními magnety je možné provádět pouze změnou napětí na svorkách obvodu kotvy. To lze uskutečnit zapojením proměnlivého odporu do obvodu kotvy nebo použitím zdroje proměnlivého stejnosměrného napětí. První způsob řízení je velmi nevhodný, proto se nevyužívá.

Pracovní oblasti motoru lze vyjádřit v $M - \omega$ diagramu, složeného ze čtyř kvadrantů, kde vodorovná osa představuje velikost momentu (popř. proudu motorem) a svislá osa úhlovou rychlost (popř. napětí motoru). [11]



Obr. 14 Pracovní oblasti motoru

Pracovní oblasti pohonu jsou spojeny s pracovními oblastmi měniče. Jednokvadrantové pohony mají pracovní oblast v prvním kvadrantu a pracují pouze s jedním směrem otáčení a neumožňují brzdění.

Dvoukvadrantový pohon může pracovat ve dvou variantách. První varianta s pracovními oblastmi v prvním a druhém kvadrantu umožňuje při jednom směru otáčení měnit smysl momentu. Druhá varianta s pracovními oblastmi v prvním a čtvrtém kvadrantu umožňuje měnit smysl otáčení bez možnosti změny smyslu momentu.

Pracovní bod čtyřkvadrantového pohonu se může nacházet v jakémkoliv kvadrantu. První a třetí kvadrant představuje motorický režim, zbylé dva kvadranty představují režim brzdňý.

1.11 Přechodné děje

Přechodným dějem stroje se rozumí odezva na změnu řídicího signálu, poruchové veličiny nebo parametru stroje. V elektrických pohonech rozlišujeme tři typy přechodných dějů. [11]

- **Elektromagnetický přechodný děj**

Při tomto ději se mění elektrické a magnetické veličiny ve stroji. Děj je charakterizován *elektromagnetickou časovou konstantou* τ_a . Doba trvání tohoto děje činí u běžných motorů řádově desítky až stovky milisekund.

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (1.19)$$

- **Elektromechanický přechodový děj**

Při tomto ději se mění elektromagnetický moment stroje, který urychluje nebo zpomaluje pohyblivé části stroje. Tento děj probíhá, pokud je úhlové zrychlení různé od nuly. Je-li úhlové zrychlení rovné nule, pohon se z elektromechanického hlediska nachází v ustáleném stavu. Tento děj je charakterizován *elektromechanickou časovou konstantou* τ_m , která u běžných motorů nabývá hodnot řádově stovek milisekund až desítek sekund.

$$\tau_m = \frac{R_a \cdot J}{(c\Phi)^2} \quad (1.20)$$

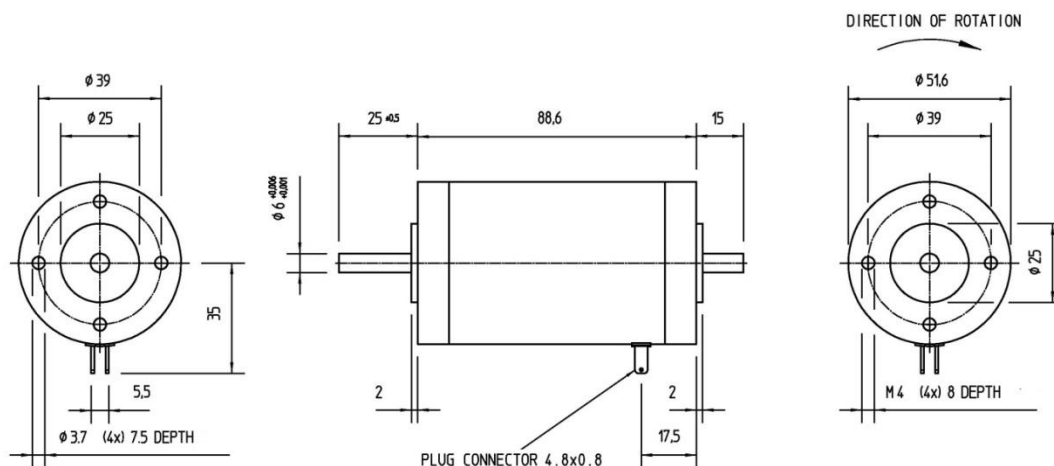
- **Tepelný přechodný děj**

U tohoto děje se mění teplota vinutí a magnetického obvodu. Doba trvání děje činí desítky sekund až desítky minut.

Z porovnání výše uvedených časových konstant lze pro analýzu těchto dějů učinit následující zjednodušení. Při elektromechanickém přechodném ději je již elektromagnetický přechodný děj ukončen a lze tedy uvažovat statický elektromagnetický moment. Z toho vyplývá, že při analýze elektromagnetického děje uvažujeme, že děj elektromechanický ještě nenastal. Také pro určení ustáleného oteplení stroje není zapotřebí uvažovat děj elektromechanický.

2. Analýza motoru

Stejnoseměrný motor určený pro analýzu je od firmy Buhler Motor s typovým označením GmbH. Jedná se o dvoupólový motor se jmenovitým napětím 24V. Buzení je zajištěno permanentními magnety. Štítkové hodnoty jsou uvedeny v Tab. 1. Kompletní datasheet motoru je přiložen v příloze na CD.



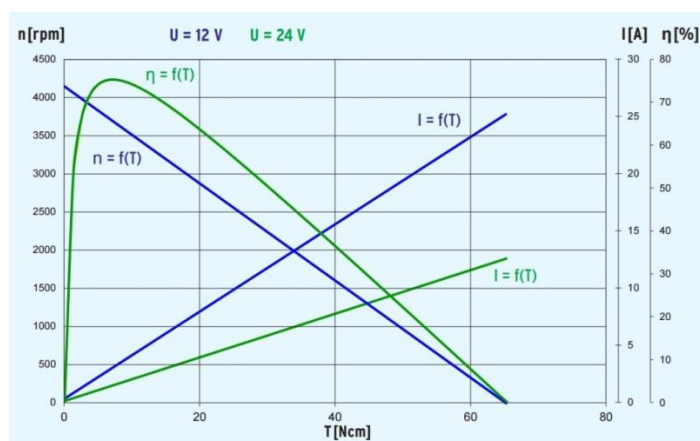
Obr. 15 Výkres analyzovaného motoru Buhler 1.13.044.261.50

Tento motor je využíván v profesionálních barevných tiskárnách HP DesignJet 800. Z charakteristiky na Obr. 16 je patrné, že při jmenovitém zatížení 15Ncm stroj pracuje při účinnosti přibližně 72 %.

| U_n [V] | P_n [W] | M_n [Ncm] | n_n [min^{-1}] | I_n [A] | krytí |
|-----------|-----------|-------------|-----------------------------|-----------|-------|
| 24 | 50 | 15 | 3 200 | 3,1 | IP40 |

Tab. 1 Štítkové hodnoty motoru

Za účelem simulace motoru v programu Matlab Simulink je zapotřebí nejprve změřit parametry náhradního schématu motoru a to odpor a indukčnost kotvy a dále konstantu stroje. Tímto úkolem se budou zabývat následující kapitoly této práce.



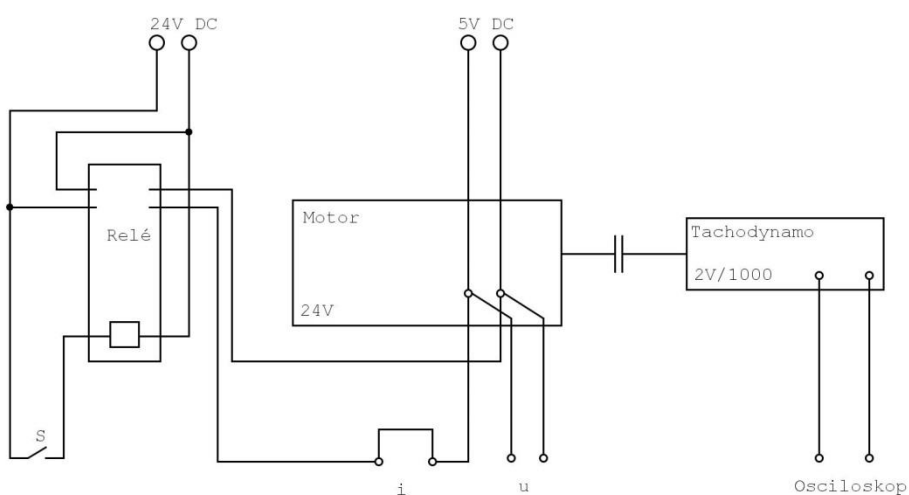
Obr. 16 Charakteristiky motoru

2.1 Měřicí přípravek

Analyzovaný motor s dalšími potřebnými komponenty je uložen na společném kompaktním přípravku, jehož principiální schéma je na Obr. 17. Motor je napájen ze zdroje stejnosměrného napětí spínačem přes paticové relé firmy ABB s označením CR-PO24DC2.

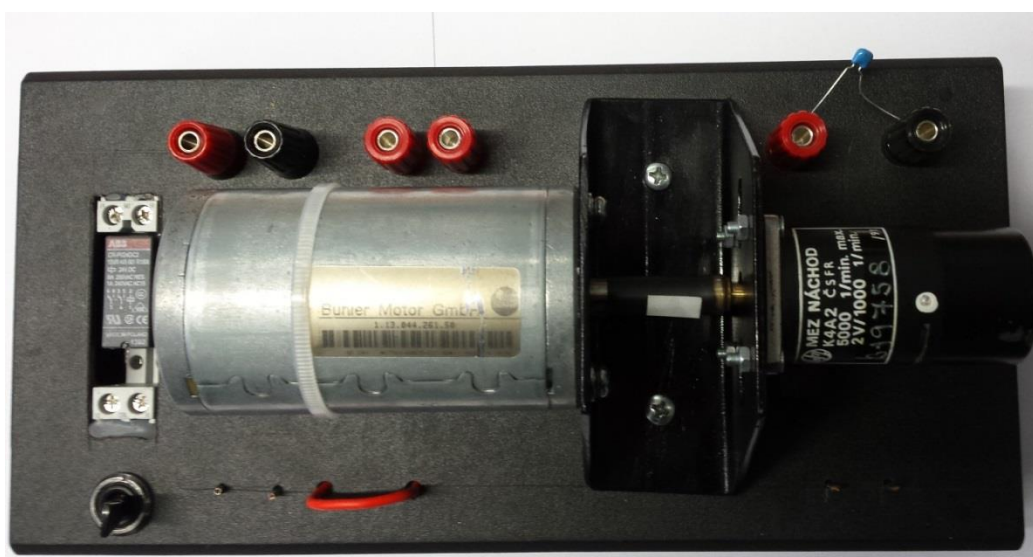
Za účelem měření indukčnosti stroje pomocí přechodového jevu je na přípravku vyveden zvlášť vývod k motoru na zdroj sníženého stejnosměrného napětí.

K měření otáček je použito tachodynamo K4A2 výroby Mez Náchod s převodem $2V/1000min^{-1}$ a maximálními otáčkami $5000min^{-1}$. Spojení hřídelí tachodynamu a motoru zajišťuje pevná gumová objímka. Vývody tachodynamu jsou během měření připojeny na osciloskop.



Obr. 17 Principiální schéma přípravku

K měření indukovaného napětí motoru jsou vyvedeny zvlášť svorky. K měření proudu je z přípravku vyveden závit pro klešťový ampérmetr.



Obr. 18 Fotografie přípravku

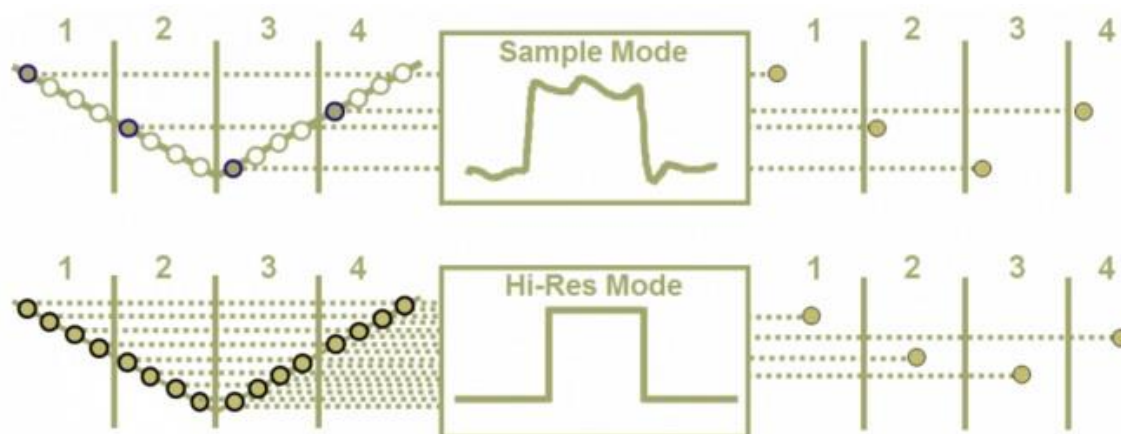
2.2 Práce s osciloskopem

Sběr měřených dat je zajištěn čtyřkanálovým osciloskopem RTO 1004 firmy Rhode&Schwarz. Jedná se o osciloskop se šířkou pásma 2Ghz a vzorkovací frekvencí 10GSa/s.



Obr. 19 Osciloskop RTO 1004

Pro potřeby měření dynamických jevů je osciloskop nastaven v režimu sběru dat *High Resolution* neboli ve vysokém rozlišení. Většího vertikálního rozlišení je dosaženo tím, že se softwarově navýší počet bitů A/D převodníku z původních 8 na konečných 11. Převodník tak pracuje s maximálním vzorkovacím kmitočtem.



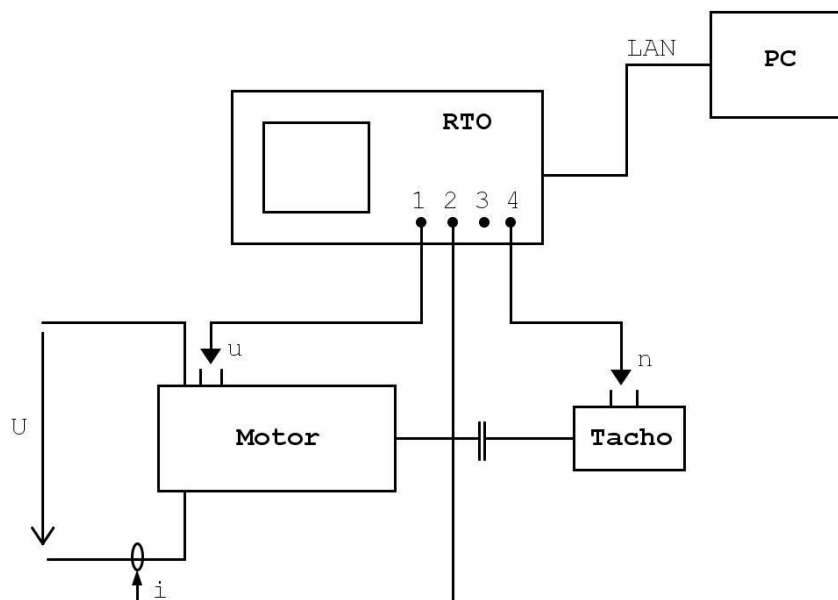
Obr. 20 Srovnání Sample a High resolution režimu

Na Obr. 20 je naznačeno srovnání režimu *High Resolution* s režimem *Sample*. V režimu *Sample* je uložen do paměti každý čtvrtý, resp. každý N tý vzorek, zatímco v režimu *High Resolution* je do paměti uložen průměr ze čtyř, resp. N vzorků. V tomto režimu je docíleno potlačení šumu a zvýšení odstupe signálu od šumu.

| Zjišťovaná veličina | Kanál | | | |
|---------------------|-------|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| L | u | i | | |
| U_i | u | | | n |
| I_a | u | i | | n |

Tab. 2 Zjišťované hodnoty jednotlivých měření

V Tab. 2 je naznačeno využití jednotlivých kanálů osciloskopu pro zjišťované veličiny. Napětí měřeno na svorkách motoru je připojeno na kanál č. 1. Měření proudu je zajištěno klešťovým ampérmetrem, který je připojen na kanál č. 2. Výstup tachodynamy je připojen na kanál č. 4. Kanál č. 3 je ponechán volný jen z důvodu pomyslného oddělení elektrických a mechanických veličin.



Obr. 21 Blokové schéma měřicího pracoviště

Jak je naznačeno na Obr. 21, osciloskop je propojen s počítačem komunikačním rozhraním LAN. Pro zpracování a zobrazení dat v počítači je použito aplikace vytvořené v prostředí LabWindows/CVI. Práce v tomto prostředí a samotná aplikace bude popsána v následující kapitole.

3. Prostředí LabWindows/CVI

LabWindows /CVI je vývojové programovací prostředí americké firmy National Instrument. Systém je zaměřený na komplexní vývoj programů pro měřicí systémy na bázi standardizovaných rozhraní nebo zásuvných měřicích desek. Základem tohoto prostředí je programovací jazyk C, avšak prostředí poskytuje velké množství funkcí a nástrojů pro snadnou tvorbu aplikací, sběr dat, jejich analýzu a případnou vizualizaci.

Tvorba programu v prostředí LabWindows/CVI zahrnuje typicky následující kroky.

- Tvorba uživatelského prostředí
- Sběr a analýza dat
- Řízení programu

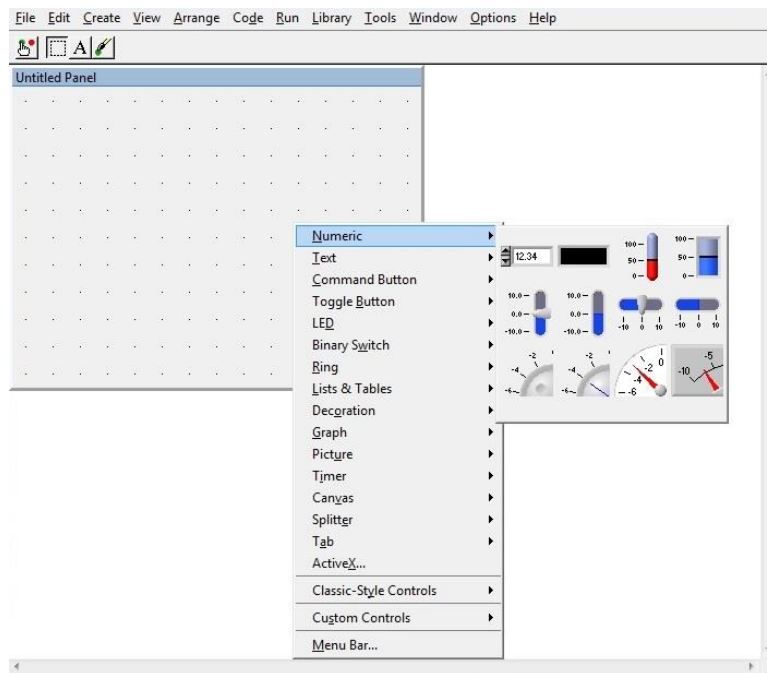
Po spuštění LabWindows/CVI se zobrazí úvodní obrazovka, která je zobrazena na následujícím obrázku. Úvodní okno nám dává možnosti otevření či založení projektu, vzorové příklady řešení, webové stránky a dokumenty pro seznámení s programem.



Obr. 22 Úvodní obrazovka

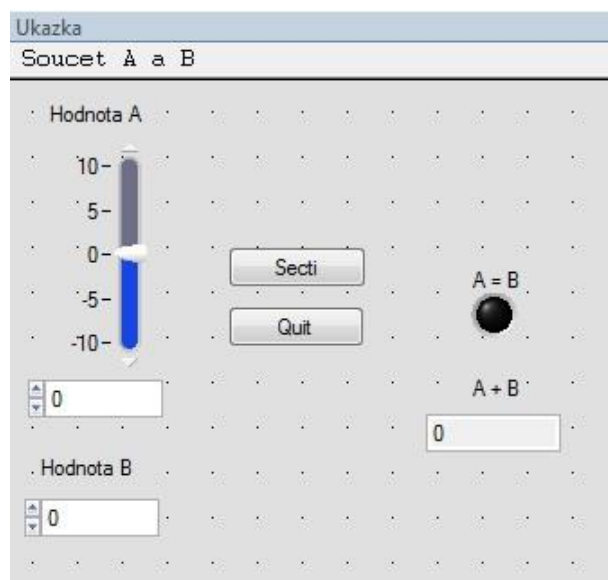
3.1 Tvorba uživatelského rozhraní

Uživatelské rozhraní, v angličtině *User interface (uir)* se vytváří za pomoci grafického editoru. Na Obr. 23 je zobrazena paleta *Create* s rozvinutou nabídkou *Numeric*. V nabídce můžeme vybírat jednotlivé prvky pro tvořenou aplikaci. Po vložení vybraného prvku do panelu lze měnit velkou škálu jeho vlastností od barev a velikosti prvku přes datové typy, které se zobrazují uživateli.



Obr. 23 Tvorba uživatelského rozhraní

Pro názornou ukázkou vytvoříme velmi jednoduchou aplikaci pro sčítání dvou čísel. Do pracovní plochy přetáhneme myší jednotlivé prvky. Pro zadání vstupní hodnoty *A* vyberme prvek s názvem *Numeric*, pro hodnotu *B* prvek *Vertical Pointer Slide*. Za účelem zobrazení výstupní hodnoty je použit také prvek *Numeric*, avšak v módu *indicator*. Rovnost obou zadaných hodnot budeme signalizovat rozsvícením *LED*. Tlačítko, které provede součet zadaných hodnot, je vybráno z nabídky *Command button*. Tento druh tlačítka může být také použit pro naprogramování ukončení aplikace. Jednodušší možností však je vložení tlačítka s názvem *Quit button* z nabídky *Customs Control*, které má v sobě již naprogramovanou funkci pro ukončení běhu aplikace.



Obr. 24 Aplikace pro sčítání dvou čísel

Jak již bylo řečeno, každému prvku vloženému do pracovní plochy se dá změnit a nastavit řada vlastností. Nejdůležitější parametry prvku pro jeho propojení s kódem jsou *Constant name* a *Callback function*, které nalezneme po otevření daného prvku v nabídce *Source Code Connection*.



Obr. 25 Hlavní parametry prvku

- *Constant name* představuje jméno proměnné, která je vždy pro každý prvek unikátní. Přes tento název je možno s daným prvkem pracovat. Implicitně je pojmenován z typu a pořadového čísla proměnné.
- *Callback function* je název funkce, která se zavolá při výskytu události dané použitým prvkem. Událostí může být kliknutí na tlačítko, volba z nabídky menu apod. Implicitně pro prvek není funkce pojmenovaná.

Pro danou aplikaci jsou pojmenovány dvě *Callback* funkce pro tlačítka a to *secti* a *quit*, jména konstant jsou ponechány.

V nabídce *Code – Generate – All code* je možno nechat automaticky vygenerovat kostru kódu pro funkce volané jednotlivými aktivními prvky grafického rozhraní. Generátor také vytvoří funkci *main*, která zajistí zobrazení okna vytvořené aplikace.

Vygenerováním kódu a uložením rozhraní se vytvoří tři soubory.

- *ukazka.uir*, obsahuje vytvořené uživatelské rozhraní
- *ukazka.c*, obsahuje vygenerovaný kód
- *ukazka.h*, obsahuje definici konstant a prototypy *Callback* funkcí

Dále je ukázka vygenerované funkce s již vytvořeným kódem pro vykonání požadované rutiny při stisknutí tlačítka *Secti*. Pro získání hodnot z prvků s názvem *NUMERIC_2* a *NUMERICSLIDE* na vytvořeném panelu je použita funkce *GetCtrlVal* neboli *Get Control Value*. Funkcí *SetCtrlVal* neboli *Set Control Value* se nastaví vypočtená hodnota do prvku s názvem proměnné *PANEL_NUMERIC*. Touto funkcí je také realizováno rozsvícení LED při rovnosti zadaných hodnot.

```

int CVICALLBACK secti (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
    int A, B, soucetAB;
    switch (event)
    {
        case EVENT_COMMIT:
            GetCtrlVal(panelHandle, PANEL_NUMERICSLIDE, &A);
            GetCtrlVal(panelHandle, PANEL_NUMERIC_2, &B);
            soucetAB = A + B;
            if(A == B){
                SetCtrlVal (panelHandle , PANEL_LED , 1);
            }
            else{
                SetCtrlVal (panelHandle , PANEL_LED , 0);
            }
            SetCtrlVal(panelHandle, PANEL_NUMERIC, soucetAB);
            break;
    }
    return 0;
}

```

Pro zajištění ukončení běhu aplikace daným tlačítkem je zapotřebí pouze vepsat do vygenerované funkce `QuitUserInterface(0)`.

```

int CVICALLBACK Quit (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
    switch (event)
    {
        case EVENT_COMMIT:
            QuitUserInterface (0);
            break;
    }
    return 0;
}

```

Příklad uvedený v této kapitole pouze demonstruje postup při vytváření aplikací. Je ukázáno, že lze použít tzv. programování řízené událostmi, tj. pouze vepisování toho, jak se má program zachovat při výskytu určité události. Programování také usnadňuje kvalitní nápověda a velké množství použitelných funkcí.

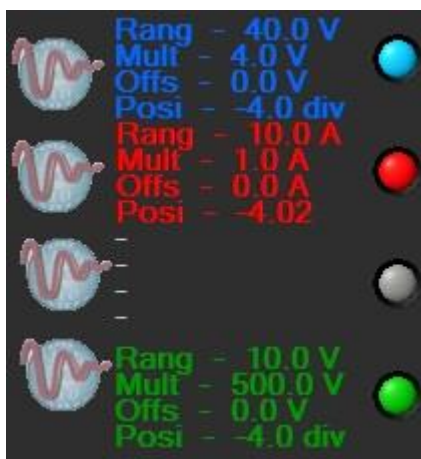
3.2 Program pro analýzu signálu

Pro potřeby této úlohy byla vytvořena aplikace pro zpracování a zobrazení a naměřených dat z osciloskopu. Uživatelské rozhraní této aplikace je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 26 Uživatelské rozhraní aplikace pro měření

Podstatnou část prostředí zaujímá okno pro graf, ve kterém jsou zobrazovány jednotlivé kanály. Pro univerzálnost aplikace disponuje čtyřmi kanály, ačkoliv v úloze jsou používány pouze tři z nich. Každý kanál je vykreslován na vlastní graf. Tyto grafy jsou umístěny na společnou plochu tak, že se jednotlivé průběhy překrývají.



Obr. 27 Panel zobrazení jednotlivých kanálů

V levé části od grafu je umístěn panel pro zobrazení aktivních kanálů a parametry zobrazení. Tento panel je ukázán na Obr. 27 s hodnotami získanými z reálného měření. Mezi zobrazované parametry patří vertikální rozsah grafu, počet voltů, ampér nebo otáček připadajících na jeden dílek. Dalšími zobrazovanými parametry je nastavení offsetu a pozice, která značí, v jaké vertikální hodnotě graf začíná. V pravé části tohoto panelu jsou umístěny zobrazovací prvky LED. Ty plní dvě funkce. První z nich je indikace aktivního kanálu. Druhá funkce se aktivuje po kliknutí na LED, čímž se docílí zobrazení rozsahu vertikální osy grafu podle kanálu, na který bylo kliknuto.



Obr. 28 Příklad parametrů osy času

Pod výše popsaným panelem je část, která zobrazuje parametry osy času. Mezi tyto parametry patří měřítko, doba mezi sousedními hodnotami, pozice neboli trigger a celkový počet vykreslených bodů.

V levé spodní části aplikace se nacházejí tlačítka získání dat z osciloskopu a provedení interpolace zobrazených křivek.

Signalizace běhu výpočtu, příp. načítání dat je provedena rozsvícením virtuální LED v informativní části nad grafem (Obr. 29). Je zde také zobrazen název aplikace a čas, kdy byly vykresleny průběhy. V případě načítání dat ze souboru je v pravé části tohoto informativního pruhu pod značkou použitého osciloskopu zobrazen výpis URL adresy datového souboru.



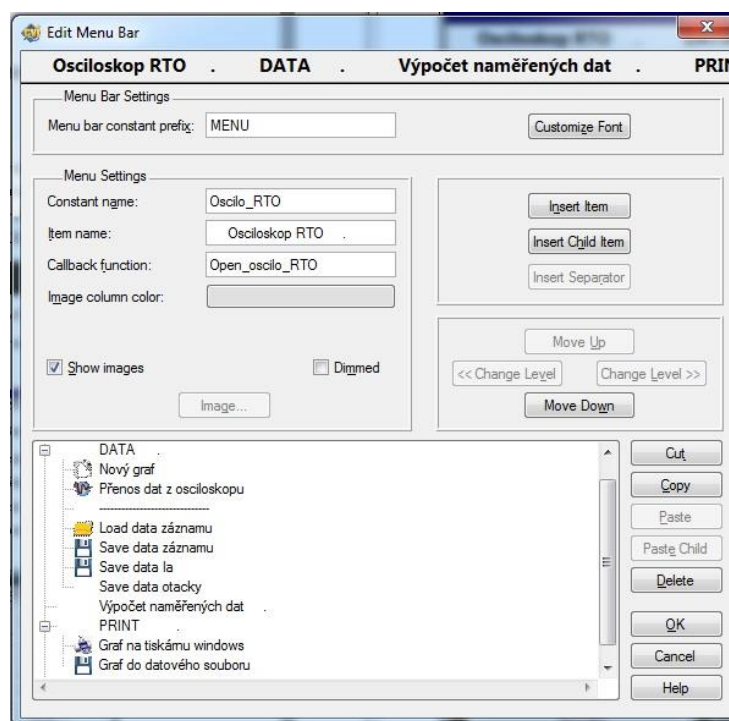
Obr. 29 Zobrazení informací

Práce uživatele s programem je zajištěna pomocí vysouvacího menu, které je zobrazeno na Obr. 30.



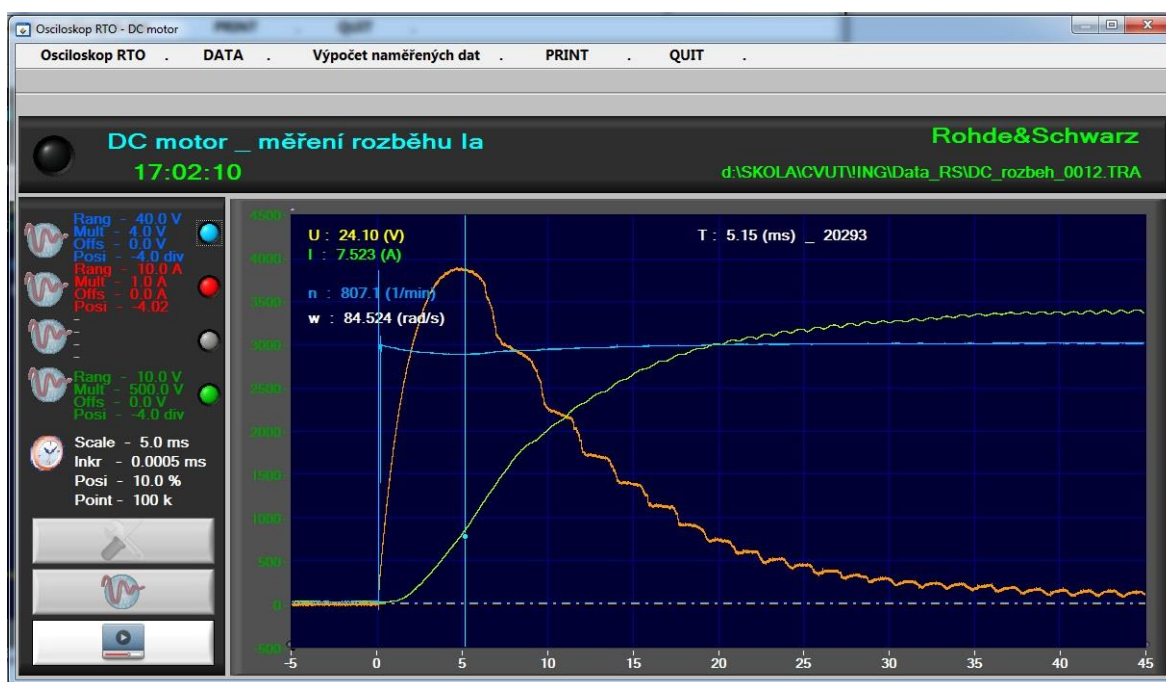
Obr. 30 Vysouvací menu aplikace

Toto menu obsahuje tři funkční nabídky. Menu *Osciloskop RTO* je pouze nápis bez dalších nabídek. Paleta *DATA_Výpočet naměřených dat* v sobě zahrnuje funkci pro vytvoření nového grafu, přenos dat z osciloskopu, načtení a uložení datového souboru *TRA a dále uložení průběhu otáček a proudu v datovém souboru xlsx. Paleta *PRINT* v sobě zahrnuje funkci pro náhled a tisk grafu na používané tiskárně. Tlačítko *QUIT* ukončí běh aplikace.



Obr. 31 Nabídka menu

Na následujícím obrázku je ukázka, jak vypadá zobrazení průběhu v dané aplikaci. Tyto průběhy jsou jedny z mnoha, které byly při měření získány a pro následnou analýzu motoru nebyly použity.



Obr. 32 Ukázka běhu aplikace

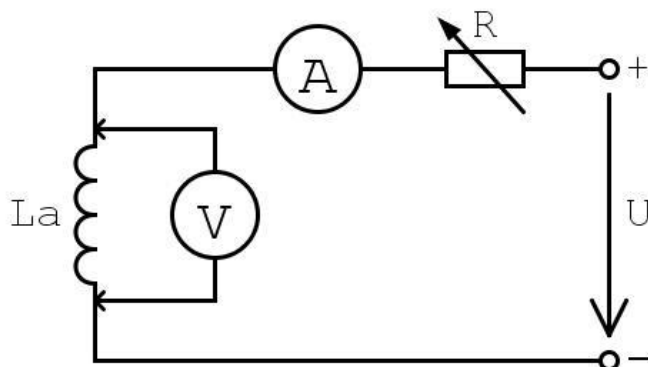
Pro analýzu průběhů je vhodné nechat program provést interpolaci průběhů kliknutím na spodní levé tlačítko. Tímto se také zajistí zjištění a vykreslení limitních ustálených a maximálních hodnot každého průběhu.

Po provedení interpolace průběhů je také možné pracovat s kurzorem a při stisknutí levého tlačítka myši měnit jeho polohu. Pomocí tohoto kurzoru jsou odečítány hodnoty každého průběhu v daném čase. Tyto hodnoty jsou zobrazovány v horní levé části grafu.

4. Měření parametrů stroje

4.1 Měření odporu vinutí

Odpor vinutí je měřen voltampérovou metodou. Měření se provádí po ustálení teploty stroje a okolí. Aby se vinutí při měření nezahřívalo, je třeba volit proud v mezích $0,1 \div 0,2 I_n$. Z několika měření se dále vypočte průměrná hodnota.



Obr. 33 Principiální schéma zapojení pro měření odporu kotvy

Změřený odpor vinutí kotvy:

$$R_a = 2,189\Omega$$

4.2 Měření indukčnosti kotvy

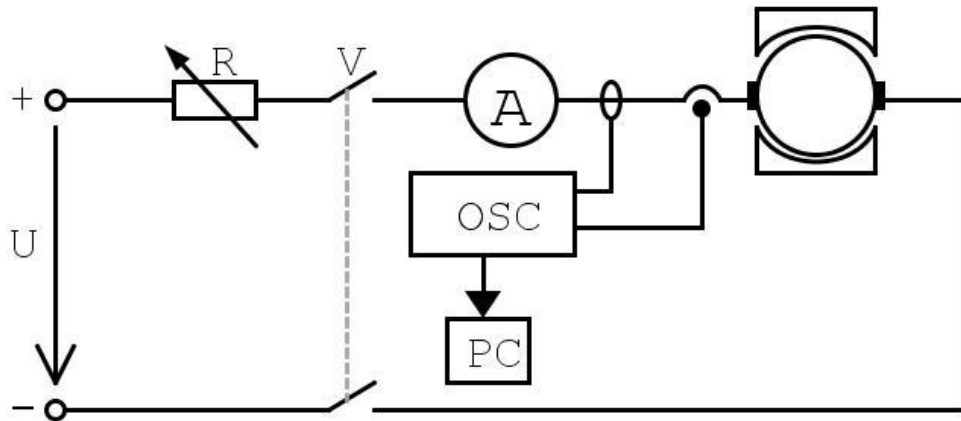
Indukčnost kotvy L_a je určena na základě přechodného jevu, který nastane po skokovém připojení stejnosměrného napětí na svorky zabrzděného motoru. Velikost připojeného napětí nesmí překročit hodnotu jmenovitou.

Průběh elektrického proudu po skokovém připojení napětí na obvod kotvy je dán následující rovnicí.

$$i = I_m \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_a}}) \quad (4.1)$$

Kde $\tau_a = \frac{L_a}{R_a}$ je časová konstanta obvodu. Je rovna době, za kterou proud dosáhne 63,2 % své

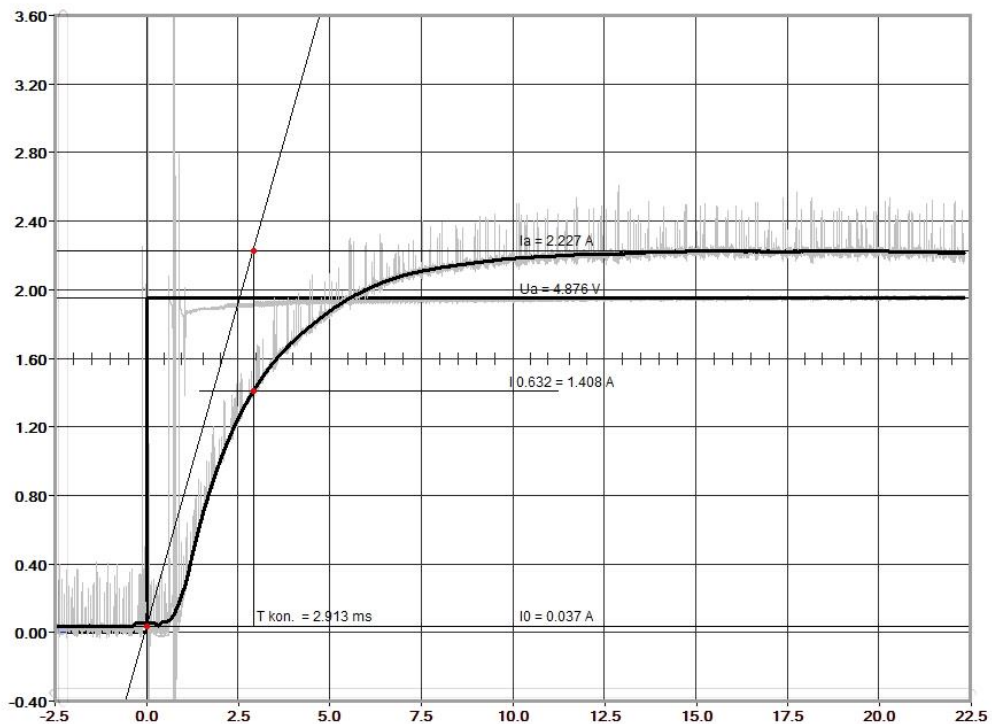
maximální hodnoty. Po uplynutí doby 5τ se udává, že rozdíl mezi okamžitou hodnotou proudu a limitní hodnotou je menší než 1 %.



Obr. 34 Principiální schéma zapojení pro měření indukčnosti kotvy

Z průběhu proudu na Obr. 35 je patrné, že po připojení napětí o hodnotě přibližně 4,9V proud narůstá až na limitní hodnotu přibližně 2,227A. V čase 2,913ms dosáhne proud hodnoty $0,632 \cdot I_{a\max}$. Po dosažení této hodnoty do rovnice pro časovou konstantu a vyjádření indukčnosti dostaneme konečnou hodnotu zjišťované indukčnosti.

$$L_a = \tau_a \cdot R_a = 2,913 \cdot 10^{-3} \cdot 2,189 = 8,468 \cdot 10^{-3} H = 6,377 mH$$



Obr. 35 Průběh proudu a napětí při měření indukčnosti

4.3 Určení konstanty stroje

Princip měření konstanty stroje vychází z rovnice pro indukované napětí při vyjádření konstanty stroje.

$$U_i = c\phi \cdot \omega = c\phi \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad (4.2)$$

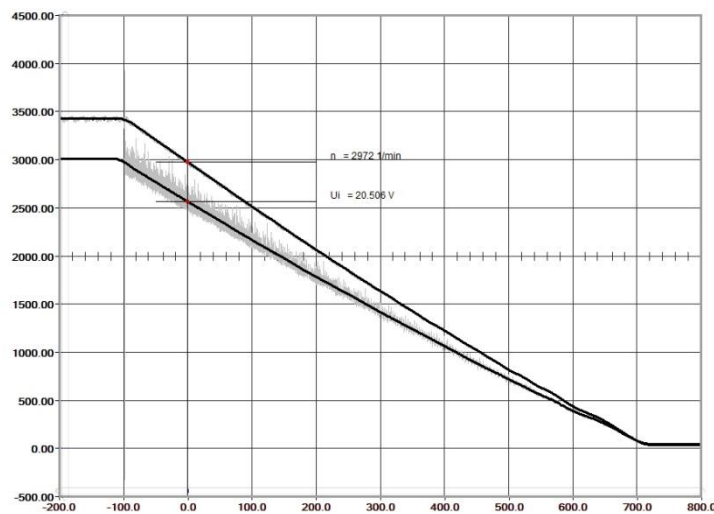
A tedy:

$$c\phi = \frac{U_i \cdot 60}{2\pi \cdot n} \quad (4.3)$$

Potřebné hodnoty pro výpočet byly získány z doběhové křivky motoru při snímání otáček a indukovaného napětí. Z Obr. 36 je patrné, že při otáčkách motoru 2972 min^{-1} je indukované napětí motoru rovno $20,506 \text{ V}$.

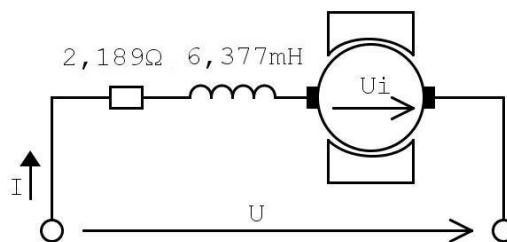
Po dosazení změřených hodnot do rovnice (4.3) získáme hledanou hodnotu konstanty stroje.

$$c\phi = \frac{U_i \cdot 60}{2\pi \cdot n} = \frac{20,506 \cdot 60}{2\pi \cdot 2972} = 0,0659 \text{ V} \cdot \text{s}$$



Obr. 36 Průběh indukovaného napětí a otáček při doběhu motoru

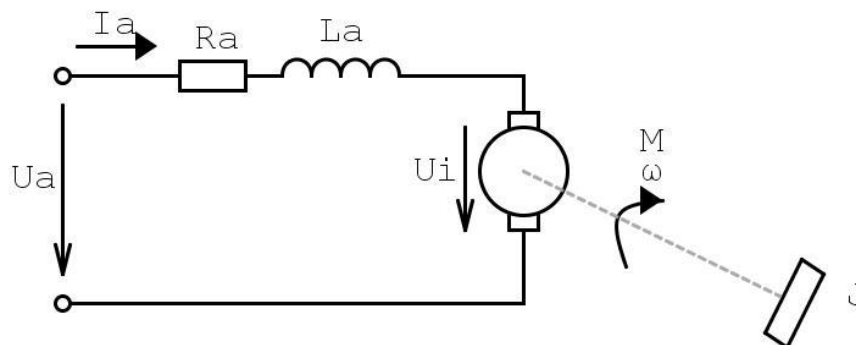
Výsledné náhradní schéma daného motoru se zjištěnými parametry je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 37 Náhradní schéma motoru s naměřenými parametry

5. Simulace motoru v programu Matlab Simulink

Pro analýzu daného motoru v programu Matlab Simulink je nutné vytvořit matematický model stroje. Ten vychází z náhradního schématu zobrazeného na Obr. 38.



Obr. 38 Náhradní schéma stejnosměrného motoru

Napěťová rovnice rotoru se skládá z úbytku napětí na odporu kotvy, napětí vlastní indukce cívky, indukovaného napětí a úbytku napětí na kartáčích. Magnetický tok vyvolaný permanentními magnety uvažujeme konstantní.

$$u_a(t) = R_a \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} + u_i(t) + \Delta u_{kartac}(t) \quad (5.1)$$

Indukované napětí vychází z rovnice (1.9). Pro spřažený magnetický tok platí:

$$\psi_a = L_a \cdot i_a \quad (5.2)$$

Po dosazení:

$$u_a(t) = R_a \cdot i_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + c\Phi \cdot \omega(t) + \Delta u_{kartac}(t) \quad (5.3)$$

Pro pohybovou rovnici platí:

$$m_i = m_d + m_{mech} \quad (5.3)$$

Kde m_i je vnitřní moment (Nm)

m_d je dynamický moment (Nm)

m_{mech} je mechanický moment (Nm)

Dynamický moment je moment, kterým se rotující těleso brání změně rychlosti. Obecně pro něj platí následující rovnice.

$$m_d = \frac{d}{dt}(J \cdot \omega) \quad (5.4)$$

Kde J je moment setrvačnosti rotující soustavy (kgm^2)

ω je úhlová rychlost rotující soustavy ($rad \cdot s^{-1}$)

Moment setrvačnosti soustavy považujeme za konstantní. Rovnice (5.4) se pak zjednoduší na následující tvar.

$$m_d = J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (5.5)$$

Pro vnitřní moment platí rovnice odvozena v kapitole 2.

$$m_i = c\Phi \cdot i_a \quad (5.6)$$

Po dosazení rovnice (5.6) a (5.5) do rovnice (5.3) získáme výsledný tvar pohybové rovnice.

$$c\Phi \cdot i_a = J \frac{d\omega(t)}{dt} + m_{mech} \quad (5.7)$$

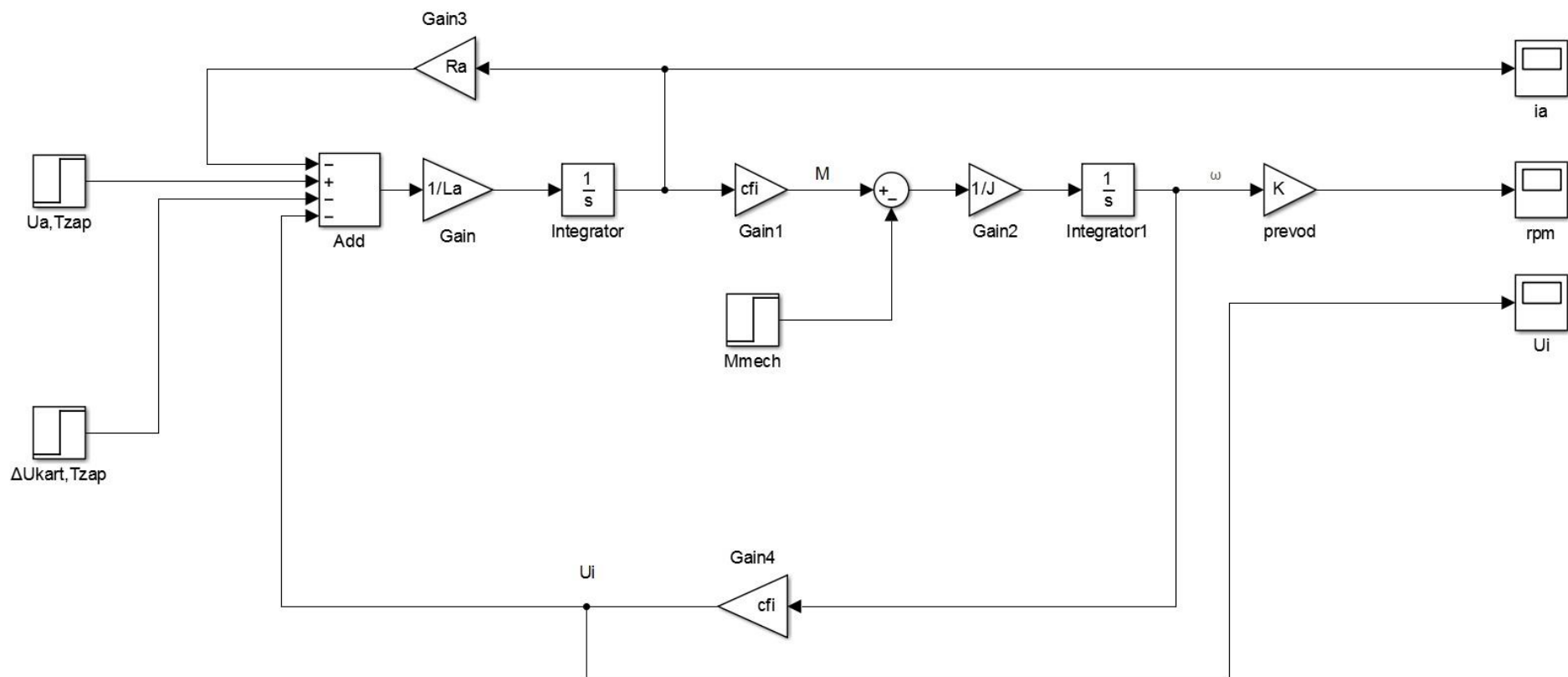
Po vyjádření členů obsahujících derivaci z rovnice (5.7) a (5.3) získáme tvary rovnic popisující motor s permanentními magnety, které jsou možné realizovat v program Matlab Simulink.

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} [u_a - R_a i_a(t) - c\Phi \cdot \omega(t) - \Delta u_{kartac}(t)] \quad (5.8)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} [c\Phi i_a(t) - m_{mech}] \quad (5.9)$$

Z těchto rovnic sestavíme dynamický model, který je zobrazen na následující straně. Protože výstupem z matematického modelu je úhlová frekvence a z měření jsou získávány otáčky za minutu, je zapotřebí model doplnit převodem podle známého vztahu.

$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi \cdot p \cdot n}{60} \quad (5.10)$$



Obr. 39 Simulink model stejnosměrného motoru s permanentními magnety

5.1 Parametry modelu

Parametry náhradního schématu motoru byly změřeny v předchozích částech práce. V následující tabulce je souhrn použitých hodnot v dynamickém modelu.

| R_a [Ω] | L_a [mH] | $c\Phi$ [V.s] | J [gcm^2] | M_{mech} [Ncm] | U [V] | ΔU_{kartac} [V] |
|--------------------|------------|---------------|------------------------|-------------------------|---------|--------------------------------|
| 2,189 | 6,377 | 0,0659 | 180 | 1,71 | 24 | 0,3 |

Tab. 3 Parametry dynamického modelu

5.1.1 Moment setrvačnosti

Moment setrvačnosti vyjadřuje setrvačnost hmoty při pohybu. Hodnota momentu setrvačnosti použitého motoru udávaná výrobcem je 180gcm^2 . K motoru je připojeno tachodynamo, které celkový moment setrvačnosti soustrojí navyšuje. Tuto hodnotu bohužel výrobce neudává a bude nejprve zanedbána. Z porovnání výsledků měření a simulace může být následně tato hodnota určena.

5.1.2 Mechanický moment

Do mechanického momentu se zahrnuje zátěžný moment a mechanické ztráty. Pomocí pohybové rovnice lze tento moment vypočítat. Pro výpočet je třeba uvažovat nulový dynamický moment. Ten je nulový, pokud je mechanická rychlost konstantní a tedy $\frac{d\omega_m}{dt} = 0$. Pak platí:

$$m_i = m_{\text{mech}} = c\phi \cdot i_a \quad (5.11)$$

Ustálený proud nezátěženým roztočeným motorem během měření činil 0,26A. Tuto hodnotu dosadíme do rovnice (5.11) spolu s již změřenou hodnotou konstanty stroje.

$$m_{\text{mech}} = 0,0659 \cdot 0,26 = 0,0171\text{Nm} = 1,71\text{Ncm}$$

5.1.3 Napěťový úbytek na kartáčích

Velikost napěťového úbytku na kartáčích je možno určit z kovografické křivky použitého materiálu. Tato křivka znázorňuje úbytek napětí na kartáčích v závislosti na proudové hustotě kartáčem. Proudová hustota je dána známým vztahem:

$$J_l = \frac{I_a}{S} \quad (5.12)$$

Kde I_a je proud kotvou a S průřez kartáče.

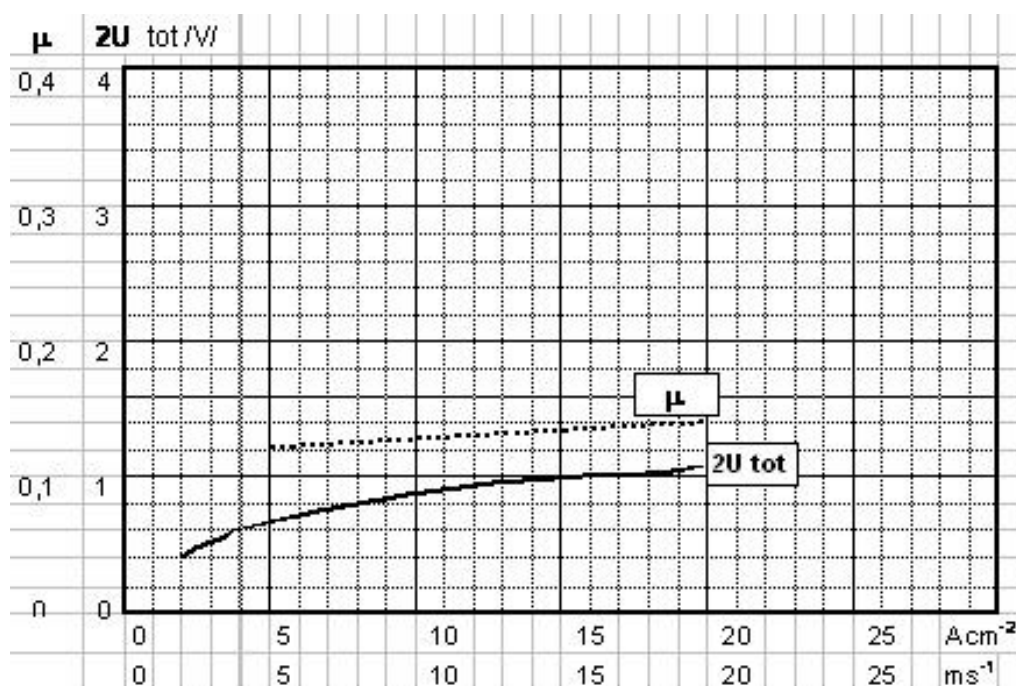
Průřez kartáče je bohužel neznámý a provedení motoru neumožňuje šetrné rozebrání krytu za účelem jeho změření. Rozměry kartáče mohou však být odhadnuty z výkresu motoru.

Z Obr. 15 je patrné, že volný prostor mezi komutátorem a krytem motoru je 13 mm na každou stranu. V tomto prostoru musí být uložen kartáč. Vhodný kartáč, který by se do tohoto prostoru vešel, byl nalezen o výšce 8,5 mm. Tento kartáč je určen pro ruční nářadí firmy Makita. Zbýlý prostor mezi kartáčem a krytem motoru může být využit pro jeho držák. Nalezený kartáč má zbylé rozměry 4,9 x 5,3 mm, tedy průřez cca 0,26 cm².

Protože motor při analýze provozujeme ve stavu naprázdno, tedy bez zátěže, dosadíme za proud do vztahu (5.12) změřenou ustálenou hodnotu motoru naprázdno, který činila 0,26A.

$$J_I = \frac{I_a}{S} = \frac{0,26}{0,26} = 1A \cdot cm^{-2}$$

Vypočtená hodnota proudové hustoty je bohužel již mimo křivku z Obr. 40. Tuto křivku můžeme aproximovat a napěťový úbytek na kartáčích zvolit 0,3V. Tato hodnota je v modelu považována za konstantní.

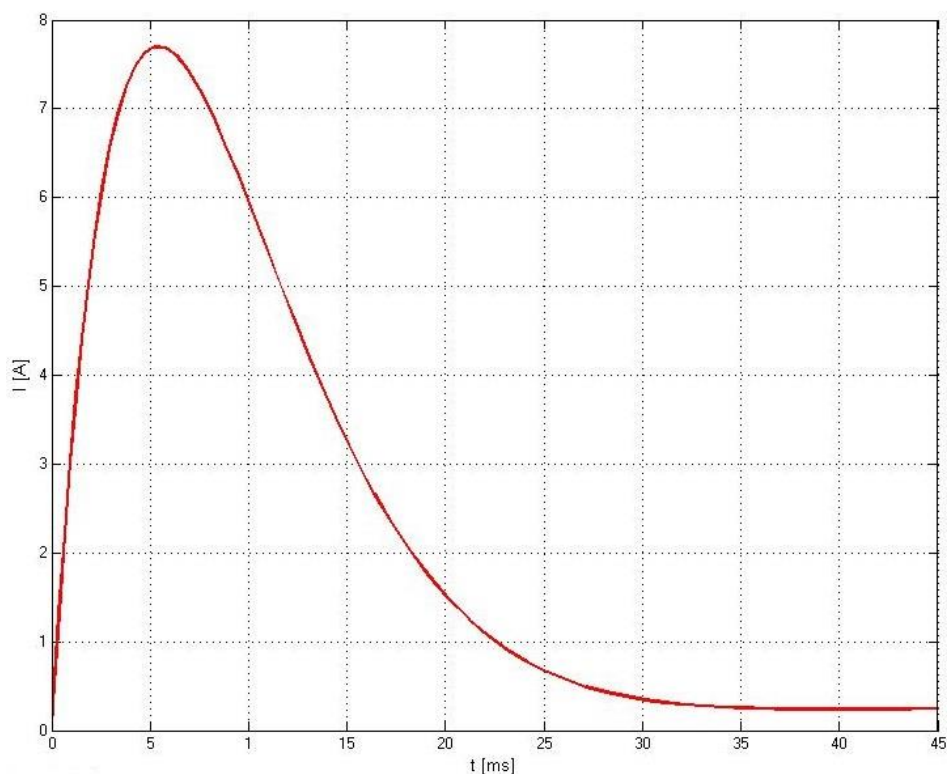


Obr. 40 Kovografická křivka [8]

5.2 Výsledky simulace

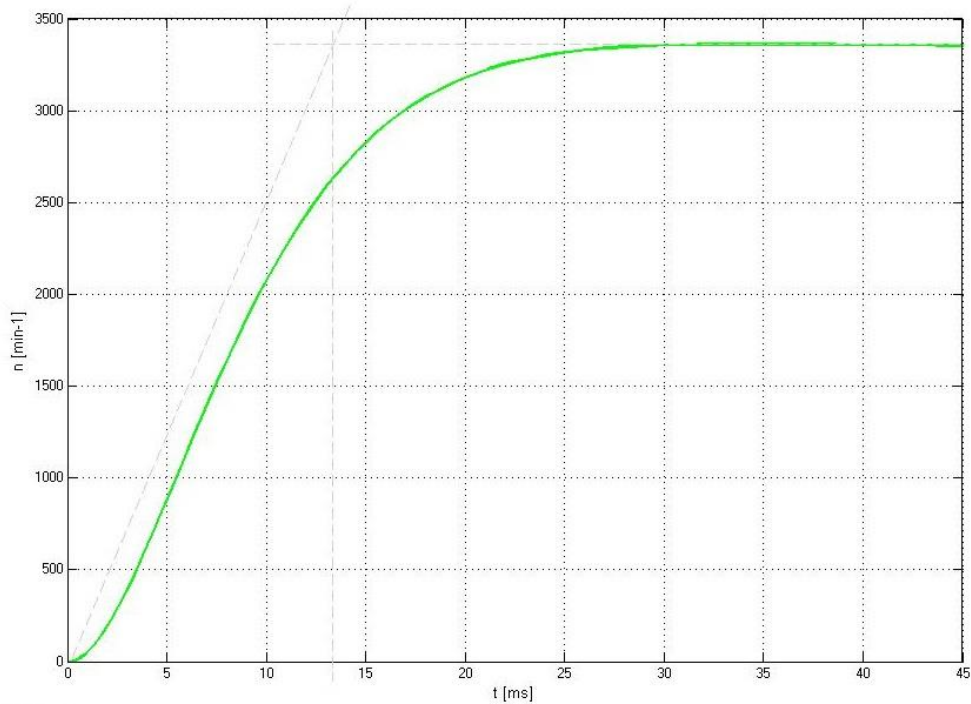
Výstupy modelu jsou zobrazovány v blocích *SCOPE*. Mimo průběh proudu a otáček je také vykreslován průběh indukovaného napětí.

Na Obr. 41 je zobrazen průběh proudu kotvou při rozběhu motoru. Proud motorem nejprve prudce roste a po dosažení maxima postupně klesá do ustálené hodnoty. Vrcholová hodnota proudu činí 7,7A a nastane v čase 5.5ms po připojení napětí. Proud se následně ustálil na hodnotě 0,26A.



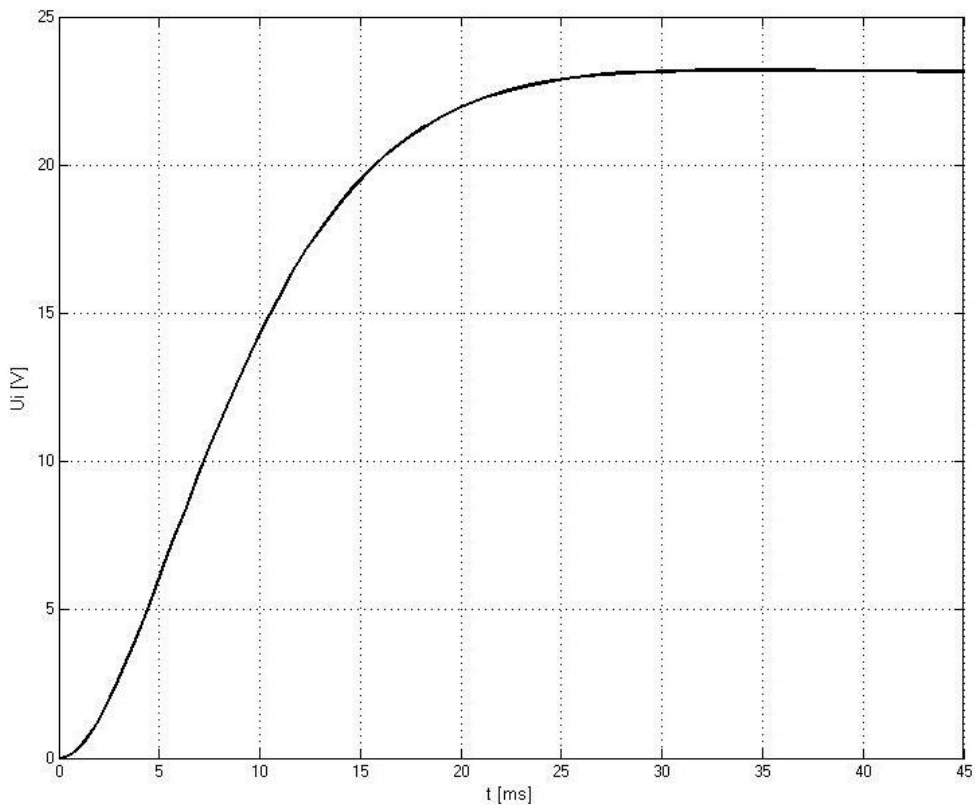
Obr. 41 Průběh proudu kotvy při rozběhu motoru z modelu

Na Obr. 42 je zobrazen průběh otáček po skokovém připojení napětí o hodnotě 24V. Otáčky nejprve prudce rostou, dále se rychlost nárůstu zmenšuje, až se otáčky ustálí na hodnotě $3\,352\text{ min}^{-1}$. Z průběhu otáček lze určit mechanickou časovou konstantu, která nabývá hodnoty 13ms.



Obr. 42 Průběh otáček při rozběhu motoru z modelu

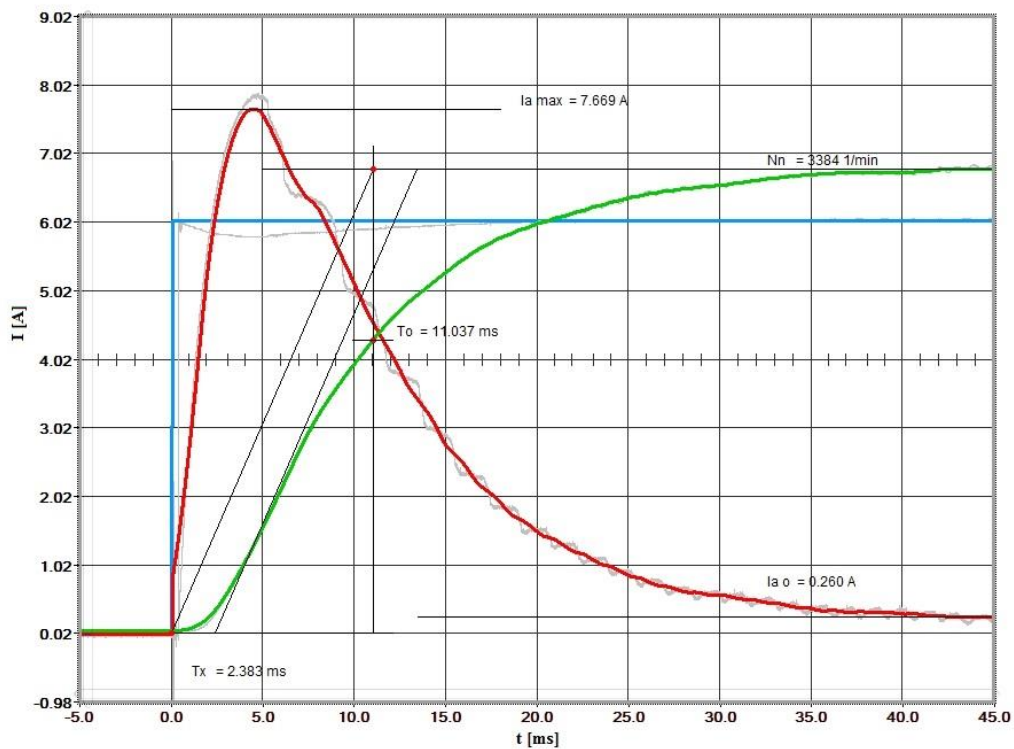
Jak vyplývá z rovnice (1.11), indukované napětí motoru je přímo úměrné uhlové rychlosti, resp. otáčkám za minutu. Z toho vyplývá, že průběh indukovaného napětí bude podobný průběhu otáček motoru. Ustálená hodnota indukovaného napětí je 23,13V.



Obr. 43 Průběh indukovaného napětí při rozběhu motoru z modelu

6. Měření na motoru

Při měření rozběhu bylo na motor přivedeno napětí o hodnotě 24V. Průběhy byly zaznamenávány osciloskopem a analyzovány aplikací v programovém prostředí LabWindows/CVI.



Obr. 44 Průběh proudu, napětí a otáček při rozběhu motoru

Z Obr. 44 je patrné, že po připojení motoru na napětí začnou růst otáčky a proud. Maximální hodnota proudu kotvou činí 7,67A. Tato hodnota nastane v době 4,7ms po připojení napětí. Dále proud postupně klesá, až se ustálí na hodnotě 0,26A v čase přibližně 45ms. Otáčky motoru se ustálí na hodnotě 3 384 min^{-1} v čase 40ms. Z obrázku je také možné vyčíst mechanickou časovou konstantu, která nabývá hodnoty 11,037ms.

6.1 Porovnání hodnot z měření a modelu

Prvním krokem pro určení správnosti modelu je porovnání ustálených hodnot získaných z měření skutečného motoru a z dynamického modelu.

| | I_a [A] | n [min^{-1}] |
|--------|-----------|---------------------------|
| Měření | 0,26 | 3384 |
| Model | 0,26 | 3352 |

Tab. 4 Srovnání ustálených hodnot z měření a modelu

Z ustálených hodnot se liší pouze otáčky. To může být způsobeno nepřesným odhadnutím velikosti kartáče, resp. úbytku napětí na kartáčích. Při uvažování úbytku napětí na kartáčích 0,1V by se otáčky ustálily na hodnotě 3380 min^{-1} . Z tabulky lze usoudit, že model byl sestaven správně.

| | $I_{a\text{max}}$ [A] | t_{max} [ms] |
|--------|-----------------------|-----------------------|
| Měření | 7,67 | 4,47 |
| Model | 7,79 | 5,5 |

Tab. 5 Srovnání vrcholové hodnoty proud při rozběhu

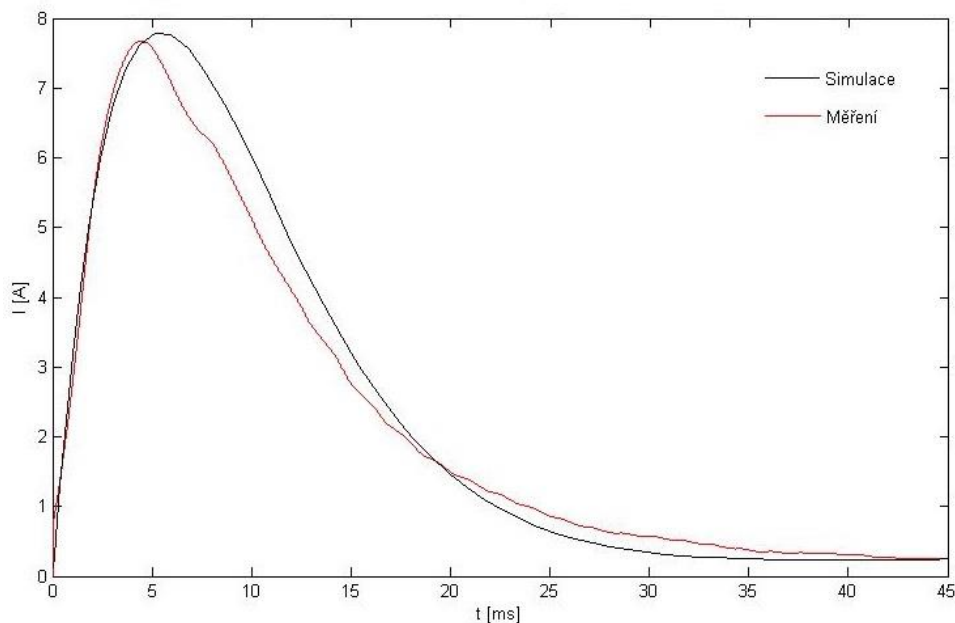
Dalším krokem je porovnání samotných průběhů získaných z měření a z dynamického modelu. V Tab. 5 je srovnání vrcholových hodnot proudu a času, kdy tyto hodnoty nastaly. Maximální hodnota proudu z modelu je o 0,12A větší a nastane o necelou milisekundu později. Z toho lze usoudit, že reálné hodnoty odporu a indukčnosti motoru se mírně liší od hodnot použitých v modelu.

| | τ_m [ms] |
|--------|---------------|
| Měření | 11,04 |
| Model | 13,5 |

Tab. 6 Srovnání mechanických časových konstant

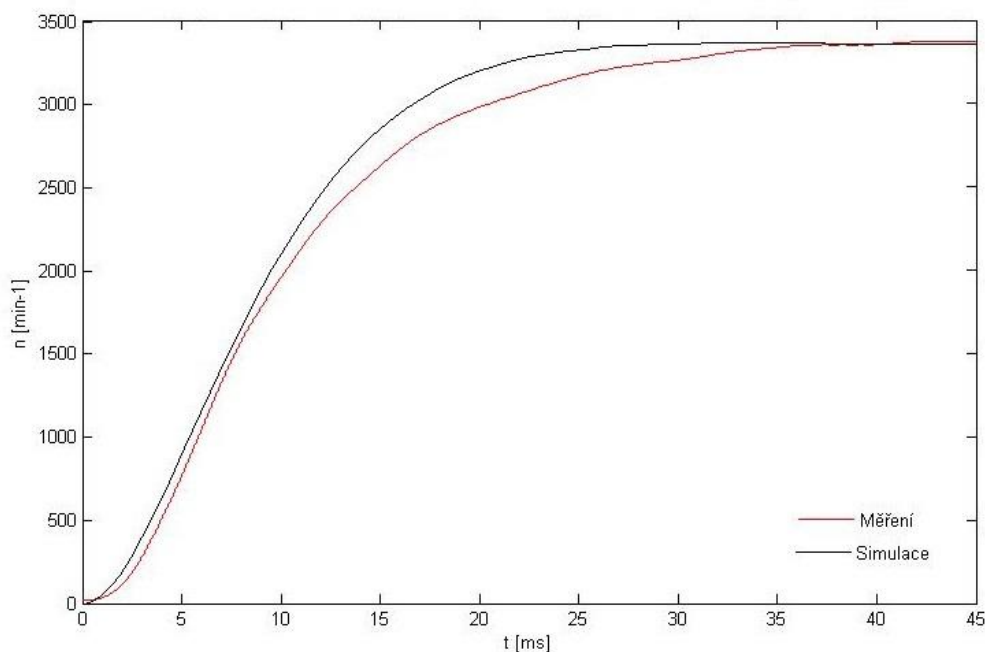
Dalším porovnávaným parametrem je elektromechanická časová konstanta. Změřená konstanta motoru nabývá hodnoty 11,04ms, zatímco časová konstanta z modelu vychází 13,5ms.

Na Obr. 45 jsou zobrazeny průběhy proudu z měření a simulace. Průběh nárůstu proudu se u obou křivek téměř shoduje. Podstatnější rozdíl lze pozorovat v části poklesu proudu. Pokles křivky proudu je u skutečného motoru menší a proud se tedy ustálí za delší časový úsek. Na obrázku si lze také všimnout rozdílné velikosti maximální hodnoty proudu a času, kdy tyto hodnoty nastaly.



Obr. 45 Porovnání průběhu proudu z měření a modelu

Obr. 46 porovnává průběh otáček z měření a simulace. Do času přibližně 9ms od připojení napětí na motor jsou oba průběhy velmi podobné a neliší se od sebe více než o hodnotu 100min^{-1} . Mezi časem přibližně 10ms až 35ms si lze všimnout výraznějšího rozdílu v průbězích. V čase 22ms rozdíl mezi simulací a měřením činí 220min^{-1} .

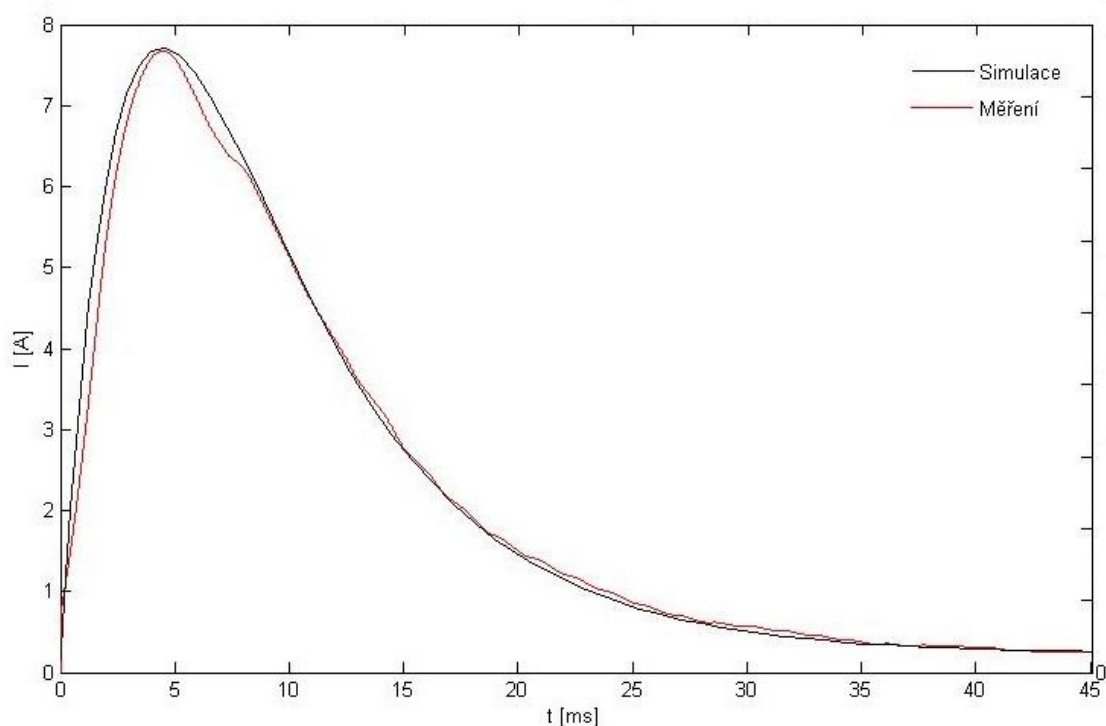


Obr. 46 Porovnání průběhu otáček z měření a modelu

Z porovnání jednotlivých průběhů vyplývá, že měřený motor disponuje rozdílnými parametry oproti parametrům použitým v modelu. Hlavní rozdíly mohou být v hodnotě odporu a indukčnosti kotvy a momentu setrvačnosti.

Model byl simulován při hodnotě momentu setrvačnosti motoru danou výrobcem. Tento motor je však připojen k tachodynamu, který moment setrvačnosti celého soustrojí navýší. Na stroj tedy působí větší setrvačné síly.

Při navýšení momentu setrvačnosti dojde zejména k rychlejšímu ustálení proudu motorem a úpravou poměru L_a/R_a se změní zejména maximální hodnota proudu a času, kdy tento proud nastal.



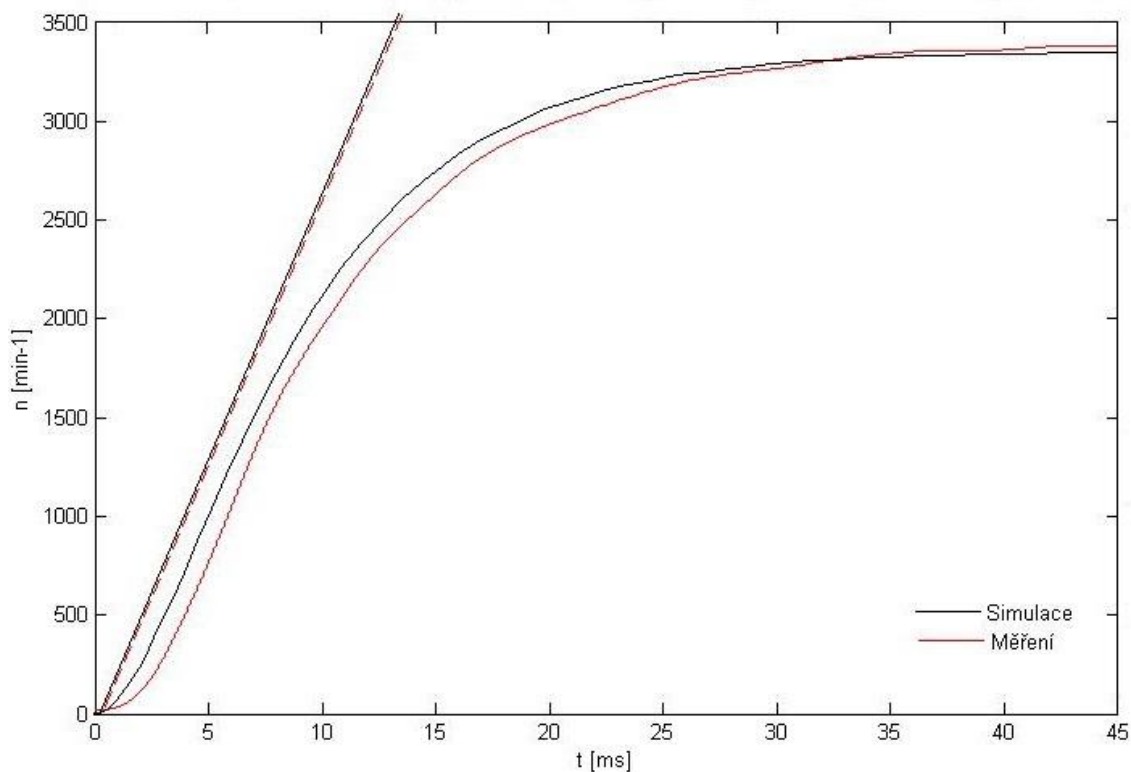
Obr. 47 Porovnání průběhu proudu při upravených parametrech modelu

Na Obr. 47 a Obr. 48 jsou porovnány průběhy měření s průběhy simulace s následujícími změnami parametry:

- $L_a = 4,377mH$
- $R_a = 2,1\Omega$
- $J = 200g \cdot cm^2$

Při použití uvedených parametrů se výsledky simulace více blíží průběhům naměřených na skutečném motoru.

Z Obr. 47 je patrné, že průběh proudu z modelu téměř kopíruje průběh proudu skutečným motorem. Velké shody je zde docíleno zejména v klesající části charakteristiky, zatímco ve stoupající části se rozdíl hodnot mírně navýšil. Úpravou parametrů se také změnil čas a hodnota maxima proudu. Z obrázku lze vypočítat, že obě tyto hodnoty jsou téměř totožné.



Obr. 48 Porovnání průběhu otáček při upravených parametrech modelu

Úpravou parametrů modelu se také změnil průběh otáček, jak je patrné z Obr. 48. Můžeme si všimnout, že se zmenšil rozdíl otáček v časech od 10ms do 35ms. Rozdíl otáček v časech do cca 35ms je téměř konstantní a nepřesahuje hodnotu 100min^{-1} . Úpravou se také zmenšil rozdíl elektromechanických časových konstant na hodnotu menší než 1ms.

7. Závěr

První kapitola této práce se zabývá vysvětlením principu fungování stejnosměrných strojů. Kláden je důraz na stroje s cizím buzením, protože motor určený ke zkoumání je buzen permanentními magnety.

Analýzou samotného motoru se zabývá druhá kapitola. Je zde uveden štítek motoru a jeho základní parametry. Kapitola také popisuje přípravek, na kterém byl motor měřen. Dále je zde podrobně uvedeno nastavení osciloskopu a vysvětlení režimu, který byl při měření použit.

Pro analýzu a sběr dat z osciloskopu byla vytvořena aplikace v programovém prostředí LabWindows/CVI. Tomuto programovému prostředí je věnována samostatná kapitola. Nejprve jsou zde vysvětleny potřebné části tohoto prostředí. Základní principy programování v tomto prostředí jsou demonstrovány na jednoduchém příkladu. Následně je podrobně popsána daná aplikace.

Za účelem simulace motoru bylo nejprve zapotřebí změřit parametry náhradního schématu. Mezi tyto parametry patří odpor a indukčnost kotvy a konstanta stroje. Změřený odpor kotvy činil $2,189\Omega$, indukčnost $6,377\text{mH}$ a konstanta stroje $0,0659\text{Wb}$. Dále na základě změřené ustálené hodnoty proudu roztočeným motorem byl vypočítán mechanický moment o hodnotě $1,71\text{Ncm}$. Hodnota momentu setrvačnosti motoru 180gcm^2 byla získána z datasheetu motoru. Vliv tachodynamy na celkový moment setrvačnosti byl nejprve zanedbán.

Čtvrtá kapitola se zabývá vytvořením dynamického modelu stejnosměrného motoru s permanentními magnety v programu Matlab Simulink. Tento model vychází z matematického modelu cize buzeného stejnosměrného stroje.

Závěrečná kapitola této práce srovnává výsledky získaných z měření a z modelu. Z ustálených hodnot se lišily pouze otáčky a to o hodnotu 32min^{-1} , zatímco se proud v obou případech ustálil na hodnotě $0,26\text{A}$. Výraznější rozdíly mezi modelem a skutečným motorem vycházely při srovnávání samotných průběhů. Maximální hodnota proudu modelem byla o $0,12\text{A}$ vyšší a nastala o necelou 1ms později. Z porovnání průběhů proudů z Obr. 45 je patrné, že pokles proudu modelem je strmější a proud se ustálí za kratší časový úsek než u skutečného motoru.

Pro získání výsledků, které by se co nejvíce blížily výsledkům z měření, byly hledány nové parametry modelu. Při změně odporu a indukčnosti kotvy na hodnoty $2,1\Omega$ a $4,377\text{mH}$ a navýšení momentu setrvačnosti na hodnotu 200gcm^2 vycházely jednotlivé průběhy velice podobné průběhům získaným z měření.

Úpravou parametrů modelu se velice přiblížila maximální hodnota proudu a čas, kdy toto maximum nastalo hodnotám získaným z měření. Také průběh poklesu proudu je téměř shodný s průběhem získaným z měření na skutečném motoru. Úpravou parametrů se také docílilo zmenšení rozdílu otáček mezi modelem a skutečným motorem.

8. Použitá literatura

- [1] VOŽENÍLEK, P., NOVOTNÝ, V., MINDL, P. *Elektromechanické měniče*. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03137-7
- [2] Elekrika.cz, portál o silnoproudé elektrotechnice, elektroinstalace, vyhlášky, schémata zapojení. *Princip stejnosměrných motorů* [online]. 1998 [cit. 2015-12-14]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/princip-stejnosmernych-motoru>
- [3] MĚŘIČKA, J., HAMATA, V., VOŽENÍLEK, P. *Elektrické stroje*. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02109-2.
- [4] MRAVEK, R. *Elektrické stroje a přístroje*. Druhé vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1982.
- [5] KRÁL, M. *Nelineární modely stejnosměrných strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Mach.
- [6] CHEMLÍK, K., POSPIŠILÍK, J. *Elektrické stroje v energetice*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2003. ISBN 80-248-0314-3
- [7] VAVŘIŇÁK, P. *Elektrické stroje - pohony* [online]. Ostrava: SŠE, 2014 [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/studijni_materialy/elektricke_stroje_a_pristroje.pdf
- [8] GOTTWALD, M. *Dynamický model stejnosměrného motoru s využitím metody konečných prvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
- [9] HRABOVCOVÁ, V., RAFAJDUS, P., FRANKO, M a HUDÁK, P. *Meranie a modelovanie elektrických strojov*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2009. ISBN 978-80-8070-924-2.
- [10] ŠIMON, J. *Jak se dělá elektromotor*. [Online]. Náchod, 2001 [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=42921
- [11] PAVELKA, J. *Elektrické pohony*. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03588
- [12] ALON, T. *How to cvi*. [online] [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <http://www.howtocvi.net>
- [13] NATIONAL INSTRUMENTS, *Getting started with LabWindows/CVI*. [online]. 2004 [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: http://www.nikhef.nl/~h73/ccursus/docu_ccursus/docu_labwindows.pdf
- [14] ZABLOUDIL, R. *Řízení stejnosměrného pohonu systémem NI cRIO*. Praha: ČVUT, 2013. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vít Hlinovský, CSc.

Seznam příloh na CD

Diplomová práce ve formátu pdf

Datasheet motoru Buhler Motor 1.13.044.2XX

LabWindows/CVI aplikace pro měření

Simulink model motoru