

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra elektrotechniky a automatizace



Bakalářská práce

Zkoušky malých stejnosměrných motorů

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Gunnar Künzel

Autor bakalářské práce: Josef Kusý

PRAHA 2011

Vysoká škola: Česká zemědělská univerzita v Praze	Fakulta: Technická
Katedra: Elektrotechniky a automatizace	Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Josef Kusý**

Studijní obor: Silniční a městská automobilová doprava

Studijní zaměření:

Název práce: Zkoušky malých stejnosměrných motorů

Zásady pro vypracování:

Cíl práce: Provést rozbor malých stejnosměrných motorků, definovat a popsat základní parametry a veličiny. Analyzovat elektrické a mechanické parametry, veličiny a charakteristiky těchto motorků.

Osnova práce:

- rozdělení stejnosměrných motorků
- určení základních parametrů a veličin motorků
- měření elektrických parametrů a veličin
- měření mechanických parametrů a veličin
- měření charakteristik
- speciální měření
- zhodnocení a závěr

Metodika práce:

- zpracujte přehled druhů a typů stejnosměrných motorků
- stanovte parametry a veličiny u stejnosměrných motorků na základě náhradního schématu
- analyzujte metody měření na stejnosměrných strojích
- zpracujte ukázky měření charakteristik vybraných stejnosměrných motorků

Rozsah práce: 40 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Seznam doporučené odborné literatury:

Pokorný a kol.: Elektrotechnika I., skripta, TF ČZU Praha, 2007

časopisy Elektro, Sdělovací technika, Automatizace


Roubíček O.: Elektrické motory a pohony, BEN, Praha 2004

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Gunnar Künzel

Datum zadání bakalářské práce: 30. 11. 2008

Termín odevzdání bakalářské práce: 30. 4. 2010




prof. Ing. Zdeněk Bohuslávka, CSc.

vedoucí katedry


prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

děkan

V Praze dne 19.1.2009

„Čestně prohlašuji, že bakalářskou práci na téma Zkoušky malých stejnosměrných motorů, jsem vypracoval samostatně, s použitím uvedených zdrojů v seznamu použité literatury.“

V Praze dne 24.března 2011

Josef Kusý

Poděkování

Děkuji Ing. Gunnaru Künzelovi za odborné vedení, cenné rady a připomínky při zpracovávání bakalářské práce. Dále děkuji rodině a všem blízkým za podporu při studiu.

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zaměřuje na měření elektrických a neelektrických parametrů malých stejnosměrných motorů. Práce je rozdělena do pěti částí. Nejprve jsou představeny jednotlivé typy stejnosměrných motorů podle způsobu zapojení budícího vinutí.

V další části jsou popsány základní veličiny, parametry a charakteristiky měřené u stejnosměrných motorů. Třetí část pojednává o měření elektrických parametrů stejnosměrných motorů a přináší přehled používaných měřicích přístrojů. Přehled měření neelektrických parametrů jako mechanický výkon, otáčky či moment setrvačnosti přináší část čtvrtá. V závěrečné části jsou pak diskutovány speciální měřicí metody určené k zjištění hladiny hluku vydávaného motorem či k měření oteplení.

Klíčová slova: Stejnosměrný motor, parametry, veličiny, charakteristiky, měření,

Abstract:

This Bachelor thesis is focused on the measurements of electrical and non-electrical parameters on small DC motors. This thesis is divided into five parts. Firstly are described individual types of DC motors in accordance of the connection of excitation winding.

In next part are described basic values, parameters and characteristics, which are measured on DC motors. The third part deals with measurements of electrical parameters on DC motors and brings overview of the equipment used for theirs measurements. The aim of the fourth part is to review measurements of non-electrical parameters such as mechanical power, rotational speed or moment of inertia. In the final part are discussed the special methods of measurements used for assessment of sound level generated by motors or for temperature measurement.

Key words: DC motor, parameters, values, characteristics, measurements,

Obsah

1. Úvod:	1
2. Stejnoseměrné motory a jejich rozdělení	2
2.1 Stejnoseměrný motor s derivačním buzením.....	3
2.2 Stejnoseměrný motor s sériovým buzením.....	3
2.3 Stejnoseměrný motor se smíšeným (kompaundním) buzením.....	4
2.4 Stejnoseměrný motor s cizím buzením.....	5
3. Veličiny, parametry a charakteristiky u stejnosměrných strojů	6
3.1 Veličiny stejnosměrných motorů	6
3.2 Parametry stejnosměrných motorů	7
3.3 Charakteristiky stejnosměrných motorů	9
4. Měření elektrických parametrů a veličin	11
4.1 Měření stejnosměrného napětí	11
4.2 Měření stejnosměrného proudu	12
4.3 Přístroje používané pro měření stejnosměrného napětí a proudu	13
4.4 Měření výkonu elektrického proudu na stejnosměrných motorech.....	15
4.6 Měření elektrického odporu na stejnosměrných motorech.....	17
4.7 Měření elektrických veličin osciloskopy	18
4.8 Měření elektrických veličin automatizovanými měřicími systémy.....	20
5. Měření mechanických parametrů a veličin	21
5.1 Měření otáček a uhlové rychlosti.....	21
5.2 Měření momentu.....	25
5.3 Nepřímé měření účinnosti.....	29
5.4 Měření mechanické vůle.....	30
5.5 Měření momentu setrvačnosti.....	31
6. Speciální měření	33
6.1 Měření hluku.....	33
6.2 Měření teploty.....	35
6.2.1 Měření teploty termočlánky.....	35
6.2.2 Měření teploty termovizí	36
7. Závěr	37
8. Použité značení parametrů s jednotkami	38
9. Použité obrázky	39
10. Použitá literatura a prameny	42

1.Úvod:

Vývoji techniky a zvyšujícím se požadavkům na nižší cenu a zároveň vyšší kvalitu, spolehlivost a životnost se nevyhnuly ani stejnosměrné motory. S nárůstem jejich využití v různých odvětví průmyslu se zvýšily pro výrobce stejnosměrných motorů i požadavky na splnění různých zkušebních norem (např. ČSN, DIN, SAE atd.), což má za následek i zvyšující se počet měření pro ověření jejich kvality, kterou posuzujeme na základě naměřených parametrů a veličin. Cílem této bakalářské práce je vypracování přehledu stejnosměrných motorků a hlavně popis jejich měření, která jsou nutná k ověření parametrů a veličin požadovaných pro jejich použití. Zaměřil jsem se především na metody používané při měření stejnosměrných motorků s permanentními magnety, které se hojně používají v automobilovém průmyslu, např. pro pohon stěračů, ovládání pojezdu oken nebo jako součást ABS systému.

2. Stejnosměrné motory a jejich rozdělení

Význam stejnosměrných motorů vzrostl s rozvojem a vývojem nové techniky pohonů i trakce, jelikož v posledních desetiletích jsou stejnosměrné generátory tj. dynama zatlačována modernějšími zdroji stejnosměrného proudu jako jsou statické měniče.

K významu použití stejnosměrných motorů také přispěly mnohem lepší vlastnosti oproti střídavým motorům a to zejména při použití v soustavách automatické regulace určených k řízení rychlosti a točivého momentu. Důležité vlastnosti stejnosměrných motorů jsou: jednoduchá regulace otáček (napětím kotvy nebo budícím proudem), velký krouticí moment při malých otáčkách, snadná přizpůsobivost zatěžovacích charakteristik poháněnému zařízení, poměrně velká výkonová i momentová přetížitelnost. Váhově i rozměry jsou značně menší (2x – 4x) než střídavé motory stejného výkonu. Mají lineární mechanické a většinou i regulační charakteristiky. Základním nedostatkem stejnosměrných motorů je funkční potřeba kluzných kontaktů komutátorů (lamely komutátoru) a uhlíků v kartáčových držácích. Nestálost přechodového odporu kluzných kontaktů způsobuje nestabilitu charakteristik motorů.

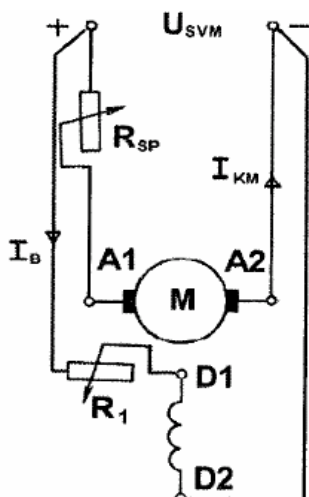
Stejnosměrné motory se vyrábějí ve výkonových řadách od několika wattů až do 7MW, při napětí maximálně 1200V. Použití stejnosměrných motorů je zvláště rozšířeno v dopravě a to jak v železniční, tak městské, dále pak u pohonů zařízení válcoven, papíren, dolů a obráběcích stojích. Rozměrově malých stejnosměrných motorků se používá zejména v regulační technice nebo také v automobilech a domácích spotřebičích .

Funkce stejnosměrného motoru je založena na požadavku měnit dodávanou energii stejnosměrného proudu na výstupní mechanickou energii ve formě točivého momentu. Podle vzájemného elektrického zapojení budícího vinutí a vinutí rotoru existují stejnosměrné motory:

- 2.1) s derivačním (paralelním) buzením
- 2.2) s sériovým buzením
- 2.3) s smíšeným (kompandním) buzením
- 2.4) s cizím buzením

2.1 Stejnoseměrný motor s derivačním buzením

Stejnoseměrný motor s derivačním buzením má zapojeno budící vinutí paralelně k vinutí kotvy (obr.1.1). V obvodu kotvy a budícího vinutí jsou zapojeny rezistory pro regulaci otáček. Zatímco regulační rezistor R_1 reguluje velikost budícího proudu, rezistor R_{sp} je spouštěcí rezistor a zapojuje se do série s kotvou motoru z důvodu snížení velikosti záběrového proudu při rozběhu. Odpor rezistoru R_{sp} se volí tak, aby při rozběhu protékal motorem nejvýše jmenovitý proud. Spouštěcí rezistor se nastaví na maximální hodnotu odporu a postupně se snižuje. Pro vytvoření dostatečně velkého záběrového momentu je potřeba vytvořit vysoký magnetický tok Φ . Ten vznikne nastavením regulačního rezistoru R_1 v budícím obvodu na minimální hodnotu, tak aby budícím vinutím protékal co nejvyšší budící proud I_B . [1]

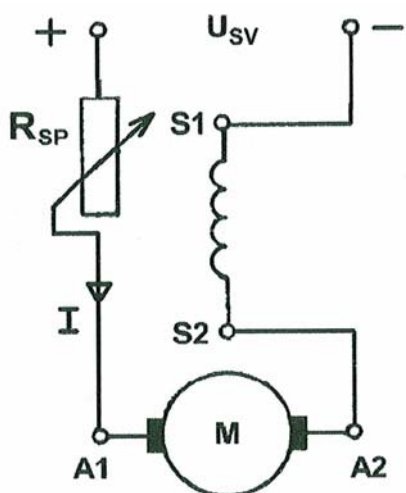


Derivační motor lze užít jako pohon strojů všude, kde se vyžaduje tvrdá mechanická charakteristika a kde je třeba měnit otáčky. Změna směru otáčení tzv. reverzace se provádí buď změnou směru budícího proudu nebo změnou směru proudu kotvy. Při změně polarity na svorkách se točí stejným směrem. [1]

Obr.2.1 Schematické zapojení derivačního motoru. Zdroj: [1]

2.2 Stejnoseměrný motor s sériovým buzením

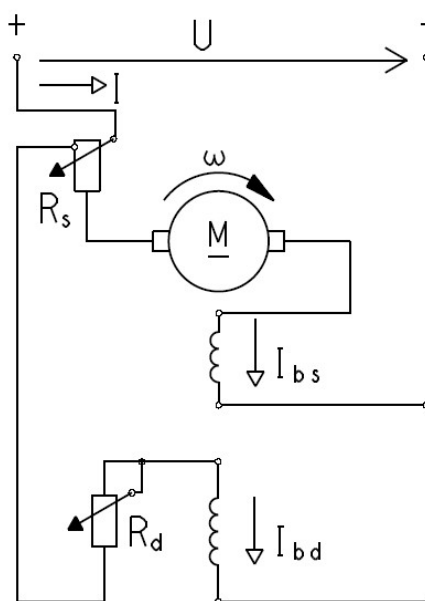
U tohoto motoru je budící vinutí zapojeno sériově s vinutím rotoru (obr.1.2) a proud kotvy I_{K_m} je totožný s budícím proudem, platí tedy $I_b = I_{K_m} = I$. Z toho vyplývá, že magnetický tok Φ je funkcí proudu kotvy a buzení motoru je závislé na velikosti zatížení motoru. Proto také musí být budící vinutí vyrobeno ze silného vodiče s malým počtu závitů, aby nebyl omezen proud kotvy. Pro spouštění sériových motorů platí stejné zásady jako pro spouštění motorů derivačních. [1]



Výhodou sériových motorů je velký záběrový moment a samostatně se přizpůsobující otáčky pracovnímu zatížení. Sériové motory se používají často v elektrické trakci jako trakční motory (např. pro lokomotivy, pohon jeřábů). Používají se také jako tzv. univerzální motory, které se mohou napájet jak střídavým tak i stejnosměrným napětím (např. vrtačky, brusky, malé kuchyňské spotřebiče). [1]

Obr.2.2 Schematické zapojení sériového motoru. Zdroj: [1]

2.3 Stejnosměrný motor se smíšeným (kompaundním) buzením

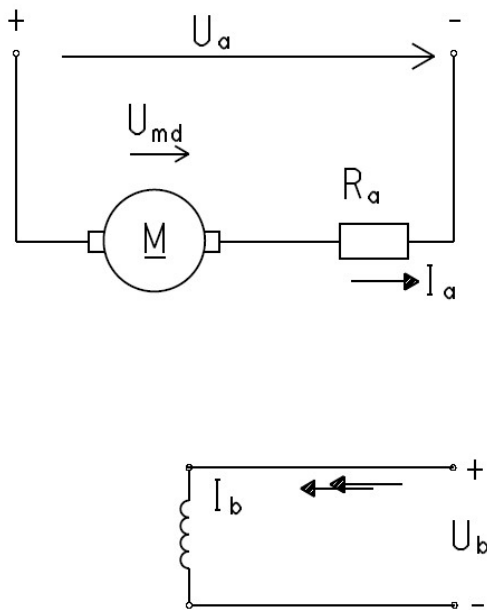


Kompaundní motory mají jak sériové, tak i derivační budící vinutí. Vlastnosti kompaundního motoru jsou dány poměrem závitů obou budících vinutí. Vlivu sériového vinutí se nejčastěji využívá v případech, kdy je požadován měkčí chod s větším záběrovým momentem (např. u válcovacích stolic nebo lisů) a derivační vinutí zabraňuje nebezpečnému růstu otáček. [1]

Obr.2.3 Schematické zapojení stejnosměrného kompaundního motoru.

Zdroj: <http://www.jsmilek.cz/skripta%20pdf/esp%2010%20ssm%20skripta.pdf>

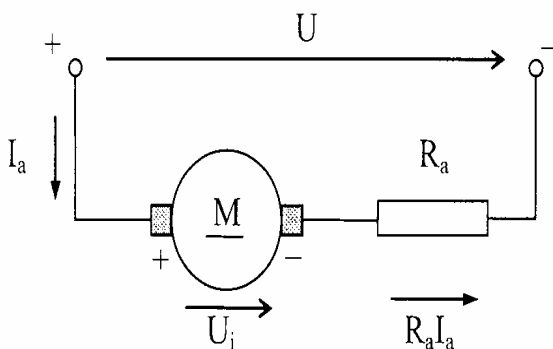
2.4 Stejnoseměrný motor s cizím buzením



Motory s cizím buzením mají budící vinutí napájené z cizího říditelného zdroje, takže jeho otáčky můžeme řídit v širokém rozsahu a vůbec nejsou závislé na zatížení, ale pouze na napětí statoru. U těchto motorů je snadno proveditelná změna směru otáčení. Provádí se buď změnou polarit napětí kotvy či budícího proudu. Stejnoseměrné motory s cizím buzením mají velký rozsah otáček a výkonů. [2]

Obr.2.4 Schematické zapojení stejnosměrného motoru s cizím buzením.

Zdroj: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_stejnosmerne_stroje_bc.pdf



Do této kategorie také patří motory s permanentním magnetem, které nemají budící vinutí a zdrojem napětí a magnetického toku je stálý magnet, tvořen pólovými nástavci na statoru. Materiálem stálého magnetu je obvykle tvrdý ferit. Motory s permanentním magnetem mají lepší účinnost, menší váhu a přitom velmi dobrou pracovní a regulační charakteristiku. [13]

Obr.2.5 Schematické zapojení stejnosměrného motoru s permanentním magnetem.

Zdroj: <http://jaja.kn.vutbr.cz/~huzlik/Ss%20motor%20s%20perm.%20magnety.pdf>

3. Veličiny, parametry a charakteristiky u stejnosměrných strojů

Chování motoru lze zjišťovat experimentálně nebo pomocí matematického modelu, řešeného na PC. K tomuto účelu definujeme základní veličiny, parametry a charakteristiky stejnosměrného motoru. Řadu údajů udává i výrobce v katalogovém listu. Zaměříme se na motorek s permanentním magnetem.[3]

3.1 Veličiny stejnosměrných motorů

Elektrické napětí U[V]

Pracovní napětí je např. u stejnosměrného motorku K6A1 5-32V, jmenovité řídicí napětí je obvykle 24V. Jde o napětí na kotvě motoru.

Elektrický proud I [A]

Jde o proud tekoucí elektrickým obvodem motoru, často se udává proud nakrátko. Např. u motoru K6A1 je $I_K=0,65A$.

Příkon motoru P_d [W]

Určujeme jako součin $P_d = U \cdot I$ (1)

Mechanický moment M[Nm]

Jde o moment motoru, záběrový moment nebo zatěžovací (brzdící) moment motoru.

Mechanický výkon P_M [W]

Počítáme ze vztahu $P_M = M \cdot \omega$ (2)

kde M [Nm] je moment motoru a ω [rad·s⁻¹] je úhlová rychlost.

Ztrátový výkon ΔP_Z [W]

Definujeme jako rozdíl $\Delta P_Z = P_d - (P_M + P_{Cu})$ (3)

Kde P_{Cu} [W] jsou Jouleovy ztráty dané vztahem $P_{Cu} = R_d I^2$ (4)

a kde R_d [Ω] je činný odpor kotvy. Odtud lze též počítat účinnost motoru.

Mechanické otáčky (úhlová rychlost) n, ω [$\text{min}^{-1}, \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]

Udáváme obvykle pracovní otáčky a otáčky v režimu bez zatížení (chod naprázdno).

Pomocnou veličinou, která může negativně ovlivňovat chování motoru je teplota [$^{\circ}\text{C}, \text{K}$.]

3.2 Parametry stejnosměrných motorů

Na základě blokového schématu obvykle definujeme následující parametry:

Rychlostní koeficient K_e [$\text{Vs}\cdot\text{rad}^{-1}$]

Určujeme ho z rovnice

$$\text{napět'ové rovnováhy} \quad K_e = \frac{U - R_K \cdot I}{\omega} \quad (5) \quad \text{kde}$$

R_K je odpor kotvy [Ω].

Přenosový koeficient momentu K_M [$\text{Nm}\cdot\text{A}^{-1}$]

$$\text{Je definován jako:} \quad K_M = \frac{M_S}{I_n} \quad (6)$$

kde M_S [Nm] je spouštěcí moment a I_n [A] je jmenovitý proud.

Napět'ový koeficient momentu K_U [$\text{Nm}\cdot\text{V}^{-1}$]

$$K_U = \frac{K_M}{R_K} \quad (7)$$

Moment setrvačnosti kotvy J [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]

Moment setrvačnosti u stejnosměrných motorů vytváří jejich točivá část (kotva).

Odtud lze určit úhlové zrychlení jako poměr spouštěcího momentu M_S a momentu setrvačnosti kotvy J [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$].

$$\varepsilon = \frac{M_S}{J} [\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}] \quad (8)$$

Konstanta vnitřního tlumení D [$\text{Nm}\cdot\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]

Se stanovuje jako poměr spouštěcího momentu a otáček naprázdno

$$D = \frac{M_s}{\omega_0} = \frac{M_s}{n_0 \cdot \frac{2\pi}{60}} = \frac{30M_s}{n_0 \cdot \pi} \quad (9)$$

kde ω_0 [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$] je úhlová rychlost naprázdno a n_0 [min^{-1}] jsou otáčky naprázdno.

Elektromechanická časová konstanta T_M [s]

Časová konstanta v elektromechanickém obvodu motoru je dána vztahem

$$T_M = \frac{J}{D} \quad (10)$$

Přibližně lze tuto konstantu určit také ze vztahu

$$T_M = \frac{J}{K_U \cdot K_e} \quad (11)$$

kde K_U [$\text{Nm}\cdot\text{V}^{-1}$] je momentová přenosová konstanta a K_e [$\text{V}\cdot\text{rad}^{-1}\cdot\text{s}$] je rychlostní konstanta stejnosměrného motoru.

Odpor kotvy motoru R_k , R_a [Ω]

Odpor kotvy při zabrzděném rotoru určíme z katalogových hodnot jako poměr

$$R_k = \frac{U}{I_S} \quad (12)$$

kde I_S spouštěcí proud stejnosměrného motoru (nakrátko).

Činný odpor kotvy R_a , kde musí platit podmínka $R_a < R_k$

Vlastní indukčnost kotvy L_a [H] je obvykle zanedbatelná u malých motorků (např. u stejnosměrného motoru typu K6A1 je $L_a = 0,024$ H).

Elektromagnetická časová konstanta T_e [s] je obvykle u malého stejnosměrného motoru zanedbatelná jako např. u K6A1 je

$$T_e = \frac{L_a}{R_A} = \frac{0,024}{3,2} = 0,0075[\text{s}] \quad (13)$$

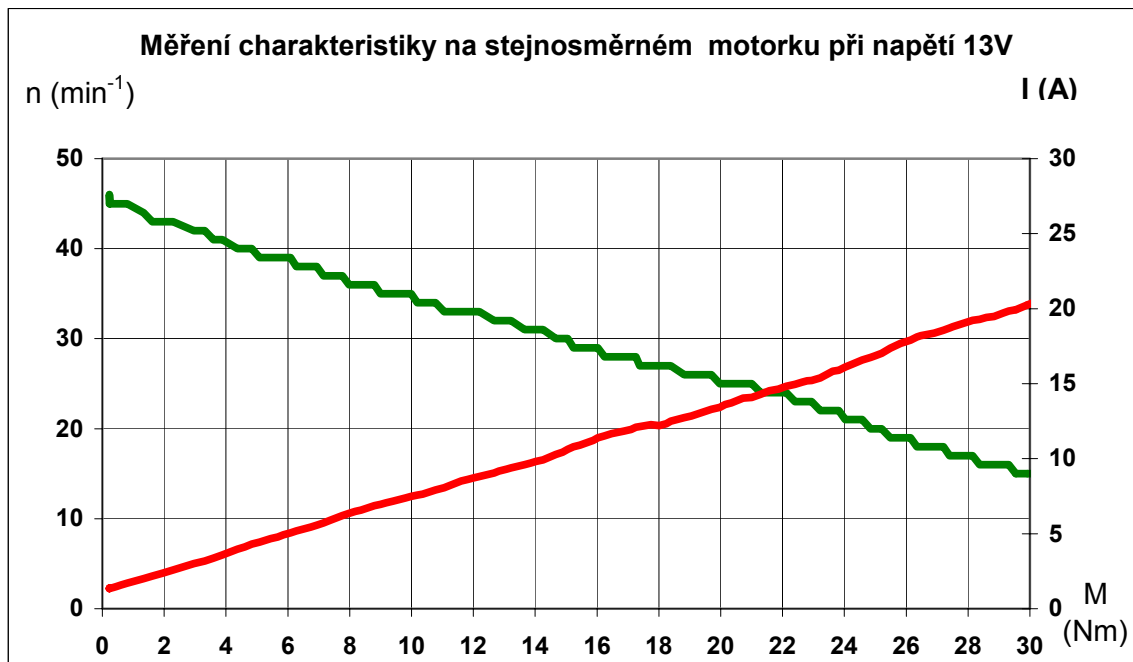
Stejnosemřný motorek typ K6A1		
Parametr	jednotka	provozní hodnota
Jmenovité napětí	V	24
Proud nakrátko	A	0,65
Maximální výkon	W	2
Záběrový moment	Nm	$1300 \cdot 10^{-5}$
Pracovní napětí	V	5 až 32
Otáčky naprázdno	ot/min	6600
Rozsah pracovních teplot	$^{\circ}\text{C}$	-10 až +32

Obr.3.1 Provozní hodnoty stejnosměrného motoru typu K6A1. Zdroj: [3]

3.3 Charakteristiky stejnosměrných motorů

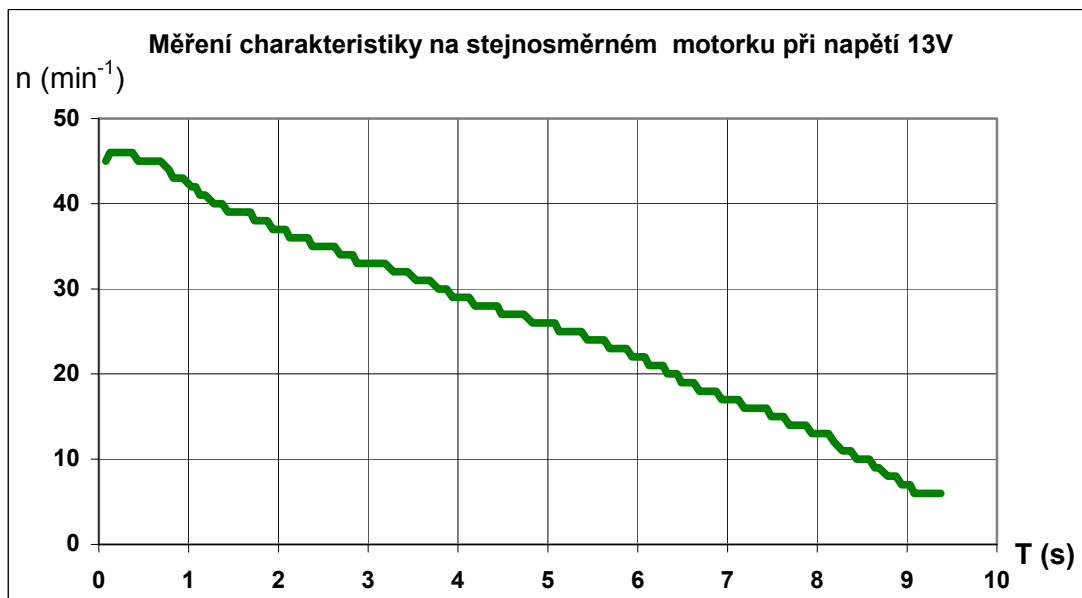
U motorů s permanentními magnety určujeme následující charakteristiky:

- Závislost průběhu proudu I na zatěžovacím momentu M_z [Nm].
- Závislost průběhu otáček n na zatěžovacím moment M_z .
- Závislost průběhu otáček n na čase t při plynule proměněném zatěžovacím momentu.
- Přechodová charakteristika motoru



Obr.3.2 Graf průběhu proudu a otáček v závislosti na zatěžovacím momentu. Zdroj: [6]

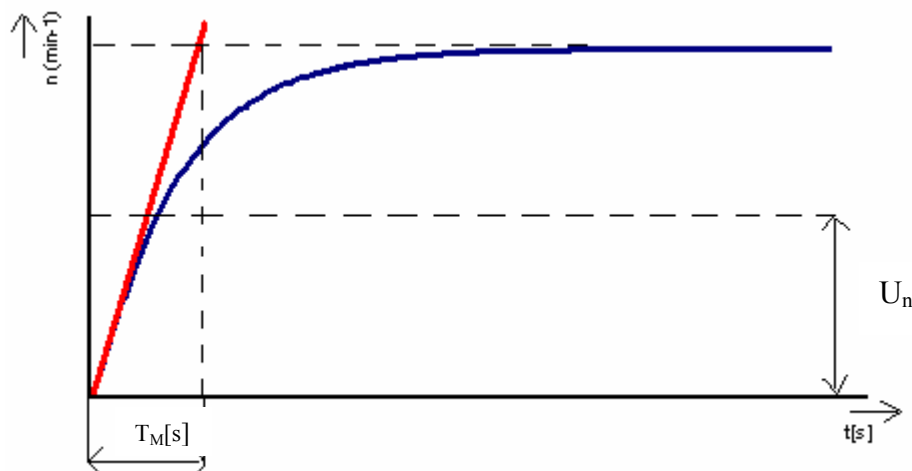
Měření bylo provedeno při zatížení v rozsahu 0 – 30Nm jako záznam charakteristiky stěračového motorku určeného pro automobil ŠKODA OCTAVIA. Měření bylo provedeno na dynamometru (typ 2PB 65). [6]



Obr.3.3 Graf průběhu otáček v závislosti na čase při plynule zvyšujícím se zatěžovacím momentu. Zdroj: [6]

Měření bylo provedeno po dobu 10s jako záznam charakteristiky stěračového motorku určeného pro automobil ŠKODA OCTAVIA. Měření bylo provedeno na dynamometru (typ 2PB 65). [6]

Dynamické vlastnosti motoru lze též posoudit podle přechodové charakteristiky $n=f(t)$ -tedy závislosti otáček na čase při vstupním skoku elektrického napětí v čase $t=0$. Z měřené charakteristiky lze určit časovou konstantu motoru a ustálené otáčky. [5]



Obr.3.4 Přechodová charakteristika motoru. Zdroj: [6]

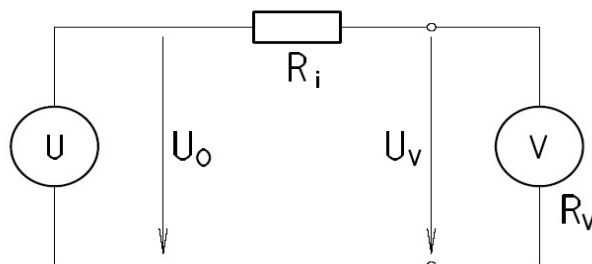
4. Měření elektrických parametrů a veličin

4.1 Měření stejnosměrného napětí

Stejnoseměrné napětí se měří voltmetrem, který se zapojí paralelně k měřené části obvodu. Aby voltmetr nezatěžoval měřený obvod, musí jím procházet co nejmenší proud. Vnitřní odpor voltmetru R_V [Ω] musí být tedy co největší. V ideálním případě by se měl vstupní odpor použitého voltmetru blížit k nekonečnu, jinak voltmetr s vnitřním odporem R_V zatěžuje měřený obvod s výstupním odporem R_i (viz. obr. 3.1) a vzniká chyba měření (Δ_M) [V], jejíž velikost se určí ze vztahu: [12]

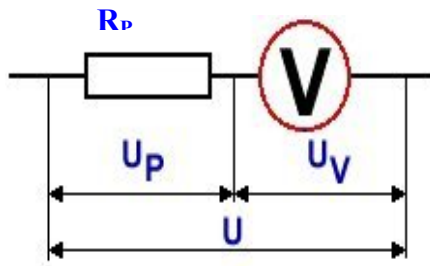
$$\Delta_M = U_V - U_0 = -\frac{R_i}{R_i + R_V} \cdot U_0 \quad (14)$$

Kde U_V je napětí měřené na voltmetru a U_0 napětí měřené na zdroji napětí.



Obr.4.1 Schéma zapojení voltmetru do stejnosměrného obvodu. Zdroj: [12]

Změna rozsahu měřících přístrojů pro měření napětí



Potřebujeme-li změřit větší napětí než pro které je voltmetr určen, musíme k němu do série zapojit tzv. předřadný odpor R_p [Ω], takové velikosti, aby se měřené napětí U rozdělilo ve vhodném poměru na napětí na předřadném odporu a na napětí na voltmetru U_v . [12]

Obr.4.2 Schéma zapojení měření napětí s předřadným odporem.

Zdroj: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/2-4.htm>

$$\text{Platí, že } U=U_p+U_v \quad (15)$$

kde U_p [V] je napětí měřené na předřadném odporu R_p .

$$\text{Dále platí, že } R_p = R_v \cdot (n - 1) \quad (16)$$

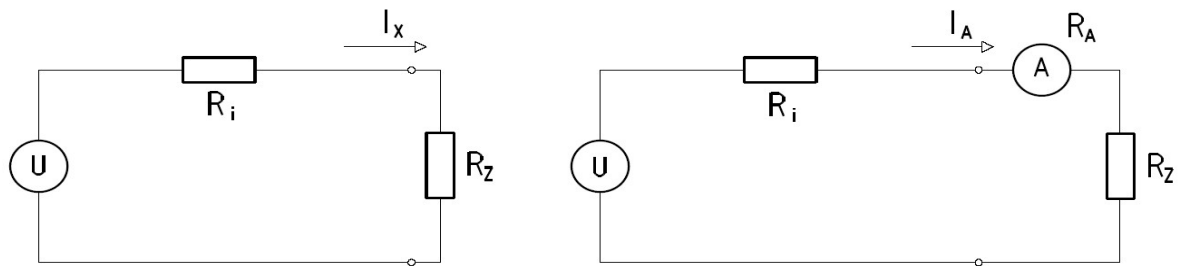
kde n značí, kolikrát zvětšíme měřicí rozsah voltmetru.

4.2 Měření stejnosměrného proudu

Stejnosemřný proud se měří ampérmetrem, který se zapojuje do série se spotřebičem a musí mít co nejmenší vnitřní odpor R_A [Ω], v ideálním případě nulový, aby co nejméně ovlivnil výsledky měření. Ve skutečnosti tomu tak v řadě případů není a zařazením ampérmetru do obvodu (viz. obr. 3.3) se mění velikost proudu procházejícího zátěží a odporem R_Z , napájenou ze zdroje s vnitřním odporem R_i a vzniká tak chyba měření (Δ_M) [A], jejíž velikost se určí ze vztahu: [12]

$$\Delta_M = I_A - I_X = U \cdot \frac{-R_A}{(R_i + R_Z + R_A)(R_i + R_Z)} \quad (17)$$

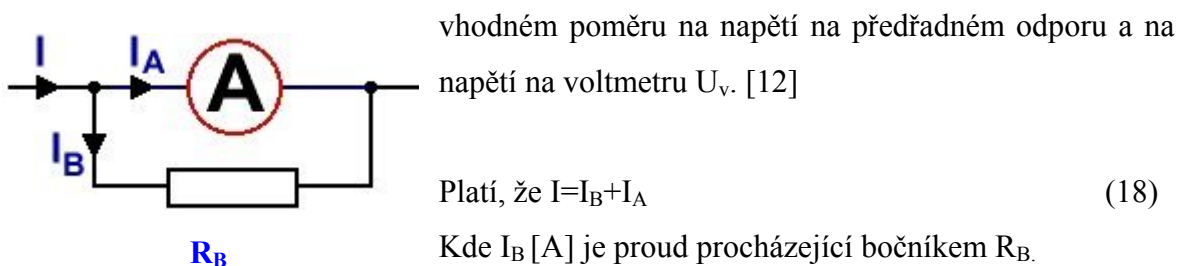
Kde I_A [A] je proud měřený v obvodě zatíženém ampérmetrem a I_X je proud v obvodě nezatíženém ampérmetrem.



Obr.4.3 Schéma zapojení ampérmetru do stejnosměrného obvodu. Zdroj: [12]

Změna rozsahu měřících přístrojů pro měření proudu

Potřebujeme-li změřit větší proud než pro který je ampérmetr určen, musíme k němu paralelně zapojit tzv. bočník R_B , takové velikosti, aby se měřené napětí U rozdělilo ve



vhodném poměru na napětí na předřadném odporu a na napětí na voltmetru U_v . [12]

$$\text{Platí, že } I = I_B + I_A \quad (18)$$

Kde I_B [A] je proud procházející bočníkem R_B .

$$\text{Dále platí, že } R_B = \frac{R_A}{n - 1} \quad (19)$$

Obr.4.4 Schéma zapojení měření proudu s bočníkem.

Zdroj: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/2-4.htm>

4.3 Přístroje používané pro měření stejnosměrného napětí a proudu

K měření stejnosměrného elektrického napětí nebo proudu se používají přístroje pracující na elektromechanickém, elektronickém nebo číslicovém principu. Výstupem je buďto analogový údaj na stupnici případně číslicový údaj na displeji. [9]

a) Analogové měřící přístroje

Významnou součástí analogových měřících přístrojů je elektromechanické měřící ústrojí, které přiřazuje hodnotě měřené elektrické veličiny výchylku ukazatele. U analogických přístrojů je výchylka spojitou funkcí měřené veličiny. Měřící ústrojí u stejnosměrných analogových přístrojů je zpravidla magnetoelektrické. K výhodám magneticko elektrických přístrojů patří možnost měřit proud a napětí ve velkém rozsahu hodnot, nevýhodou je choulostivost na hrubé mechanické zacházení a nebezpečí nesprávného

zapojení (přepólování). Tyto přístroje mohou být určeny pro měření jedné veličiny (ampérmetry, voltmetry). [9]



Obr.4.5 Analogový ampérmetr.

Zdroj: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e7/Ammeter.jpg>

b) Digitální měřící přístroje

Základní částí číslicového měřidla s digitálním displejem je analogově číslicový převodník. Je to elektronický obvod, který převede hodnotu elektrické veličiny (např. proudu nebo napětí) na číselnou hodnotu v dvojkové soustavě. Tento údaj je přístrojem zpracován a výsledek, převedený z dvojkové soustavy do číslicové formy, se zobrazí na displeji. Složitější přístroje jsou často řízeny mikroprocesorem a dovedou veličiny nejen změřit, ale i připravit data do počítačového zpracování a grafické podoby. Funkci a rozsah přístroje volíme přepínačem. [9]



Obr.4.6 Digitální multimetr.

Zdroj: <http://www.e-pristroje.cz/pictures/multimetr/dm506.jpg>

Jedním ze základních parametrů pro digitální měřící přístroje je výběr měřícího přístroje dle počtu míst číslicového zobrazovače. Ten začíná od 3 (u obyčejných provozních přístrojů) až po $8 \frac{1}{2}$ (u přístrojů velmi přesných). To znamená, že na displeji se zobrazí číslice 999 až 199 999 999. Nejčastěji se v laboratorních podmínkách používá digitální multimetr s počtem míst číslicového zobrazovače $3 \frac{1}{2}$, což znamená že na displeji se zobrazí číslice 000 až 1999. [14]

4.4 Měření výkonu elektrického proudu na stejnosměrných motorech

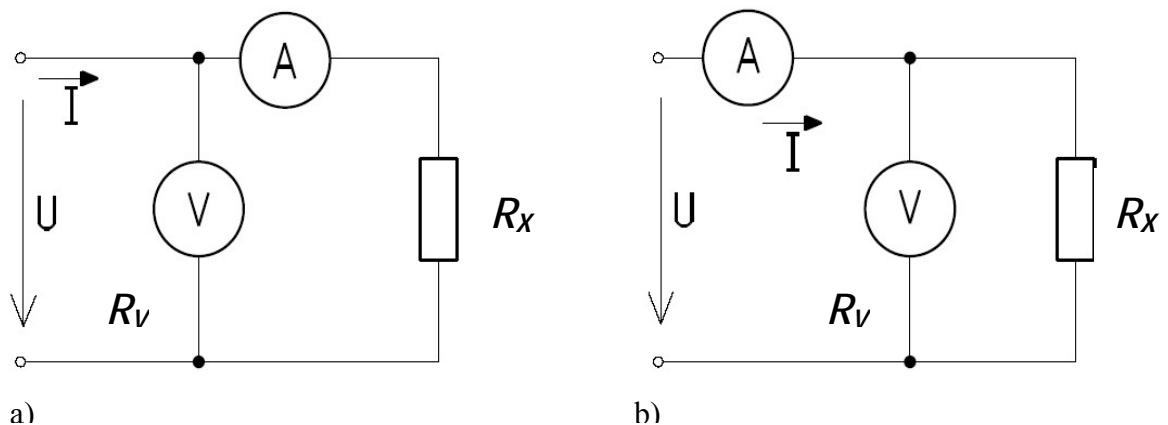
Výkon elektrického proudu na stejnosměrných motorech lze změřit buď nepřímou metodou nebo metodou přímou. [5]

Výkon elektrického proudu na stejnosměrném motoru je definován vztahem:

$$P = U \cdot I = [\text{W}] \quad (20)$$

Nepřímá metoda

Nepřímou metodou lze výkon elektrického proudu stanovit pomocí ampérmetru a voltmetru. Zanedbáme-li spotřebu voltmetru v případě a), nebo ampérmetru ve případě b), dopustíme se chyby měření, která je chybou metody a v tomto případě je snadno spočitatelná. [5]



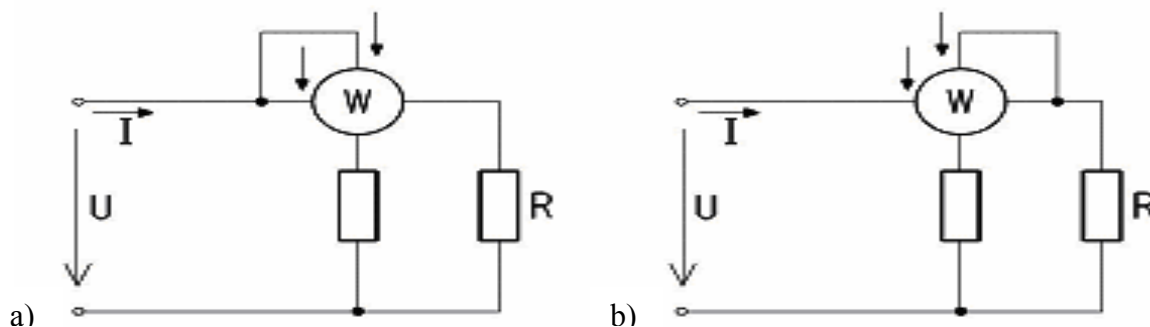
Obr.4.7 Schéma zapojení při měření výkonu stejnosměrného proudu voltmetrem a ampérmetrem. Zdroj: [5]

a) Zapojení pro malý proud a velké napětí v měřeném obvodu. Tato metoda se používá při měření větších odporů, kdy musí platit, že $R_X > R_V$. [14]

b) Zapojení pro velký proud a malé napětí v měřeném obvodu. Tato metoda se používá při měření menších odporů, kdy musí platit, že $R_X < R_V$. [14]

Přímá metoda

Stejně jako nepřímou metodou lze výkon elektrického proudu změřit pomocí wattmetru (např. elektrodynamickým), kdy obdobně vzniká chyba metody, způsobená vlastní spotřebou napěťového a proudového obvodu. [14]



Obr.4.8 Schéma zapojení při měření výkonu stejnosměrného proudu wattmetrem.

Zdroj: [5]

a) Wattmetr v tomto případě měří spotřebu zátěže zvětšenou o spotřebu proudového obvodu wattmetru. Toto zapojení používáme v případě, kdy lze zanedbat spotřebu wattmetru, protože spotřeba proudové cívky je obvykle menší než spotřeba napěťového obvodu.

b) Wattmetr v tomto případě měří spotřebu zátěže zvětšenou o spotřebu napěťového obvodu wattmetru. Toto zapojení používáme v případě, kdy nelze zanedbat spotřebu wattmetru, protože odpor napěťového obvodu je obvykle znám. [5]

4.5 Měření izolačního odporu na stejnosměrných motorech

Izolační odpor je odpor mezi krajními vodiči, které vedou elektrický proud. Měl by být pokud možno co nejvyšší. Ideální stav je, kdyby se blížil k nekonečnu. Všeobecně platí, že minimální požadovaný izolační odpor je $1000\Omega/V$ provozního napětí mezi krajními vodiči nebo zemí. V tomto případě platí že u každého elektrického přístroje musí být před



uvedením do provozu přezkoušen a zkontrolován izolační odpor. Často se ke kontrole izolačního odporu používá elektronický měřič izolačního odporu řady PU. Jedná se o přímo ukazující ohmmetr s převodem odporu na měření proudu při známém měřicím napětí. Podmínkou ovšem je, že měřený objekt musí být bez napětí. [15]

Obr.4.9. Revizní přístroj PU 294 pro měření izolačního odporu.

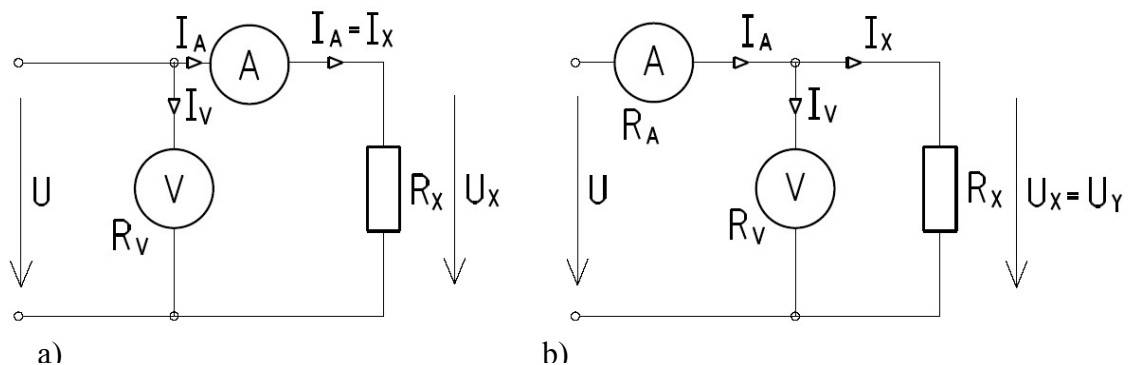
Zdroj: <http://www.merici-opticke-pristroje.cz/Revizni-pristroje/Revizni-pristroj-pu-294.aspx>

4.6 Měření elektrického odporu na stejnosměrných motorech

Měření elektrického odporu se u stejnosměrných motorů provádí buď přímo a to v případě, když se měří odpor budícího vinutí na svorkovnici motoru, nebo se používá Ohmova metoda při měření odporu kompenzačních vinutí, vinutí pomocných pólů a měření odporu kotvy. Ohmova metoda se používá také pro ověření úbytku napětí na napájecích svorkách motoru a vychází z definice odporu jako poměru napětí ku proudu. [14]

$$R_X = \frac{U_X}{I_X} [\Omega] \quad (21)$$

Kde R_X je odpor zátěže, U_X je napětí na odporu a I_X je proud procházející odporem.



Obr.4.10 Zapojení ohmovou metodou pomocí voltmetru a ampérmetru Zdroj: [14]

V zapojení dle obr.3.10a měří voltmetr napětí na odporu R_X , $U_V = U_X$, ale ampérmetr měří součet proudů $I = (I_X + I_V)$. Tato metoda se používá při měření větších odporů, kdy musí platit, že $R_X > R_V$. Při zanedbání odporu voltmetru R_V se určí hodnota dle: [14]

$$R'_X = \frac{U_V}{I_A} = \frac{R_X \cdot R_V}{R_X + R_V} [\Omega] \quad (22)$$

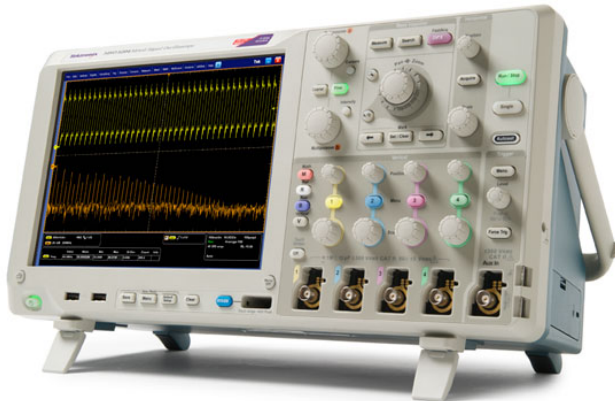
V zapojení dle obr.3.10b měří voltmetr napětí $U_V = (U_X + U_V)$ ampérmetr proud rezistorem $I_A = I_X$. Při zanedbání odporu Ampérmetru R_A se určí hodnota dle:

$$R'_X = \frac{U_V}{I_A} = R_X + R_A [\Omega] \quad (23)$$

Tato metoda se používá při měření menších odporů, kdy musí platit, že $R_X < R_V$. [14]

4.7 Měření elektrických veličin osciloskopy

Osciloskopy slouží ke grafickému zaznamenání elektrických dějů v daném časovém úseku. Osciloskopy mohou pracovat na analogovém a v dnešní době již zcela běžném digitálním principu. Hlavní výhodou zejména moderních digitálních paměťových osciloskopů je možnost uložit naměřená data buď ve formě obrázku či přímo jako datový soubor použitelný na další počítačové zpracování. To je možné provést díky sériovému rozhraní (RS-232, USB) nebo GPIB, kterým jsou digitální osciloskopy vybaveny. Dnešní digitální osciloskopy jsou používány běžně do frekvencí v řádu stovek MHz až jednotek GHz. Ovládání digitálních osciloskopů je řešeno pomocí kombinace ovládacích prvků,



numerických tlačítek, funkčních tlačítek a tlačítek, jejichž funkce se mění podle zvoleného režimu přístroje. Hlavními parametry jsou vzorkovací frekvence, šířka pásma, velikost paměti, rozlišovací schopnost přesnost vertikálního a horizontálního kanálu a také počet kanálů ke kterým se připojují měřicí sondy. [10]

Obr.4.11 Digitální osciloskop.

Zdroj: <http://www.tek.com/images/imagewidget/mso5000/mso5000-angle-lrg.jpg>

Žádné měření s osciloskopem by nemohlo být provedeno bez měřících sond. Ty mají funkci propojení vstupu osciloskopu s měřeným objektem. Jejich vlastnosti jsou velmi důležité a velkou měrou ovlivňují výsledky měření. Nevhodným použitím sondy může být měření natolik znehodnoceno, že měřený signál je nepoužitelný. [10]

Používané měřicí sondy:

- e) Pasivní napěťová sonda, která je složena z odporu a k němu paralelně připojenému kondenzátoru a přívodního koaxiálního kabelu.
- f) Aktivní sonda obsahující aktivní prvky (tranzistor, zesilovač), zapojené jako napěťový sledovač. Mají vyšší vstupní impedanci a širší frekvenční pásmo.

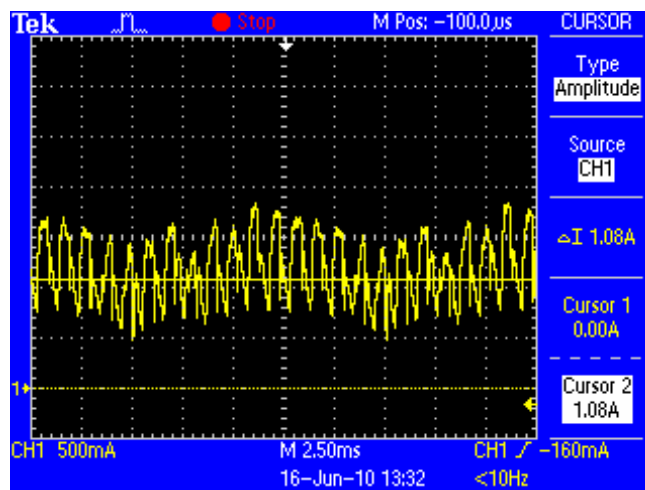
- c) Proudové sondy používají se pro měření proudu a jsou to v podstatě převodníky proudu na napětí. [10]



Obr.4.12 Proudová sonda zapojena při měření stejnosměrného motoru. Zdroj: [6]



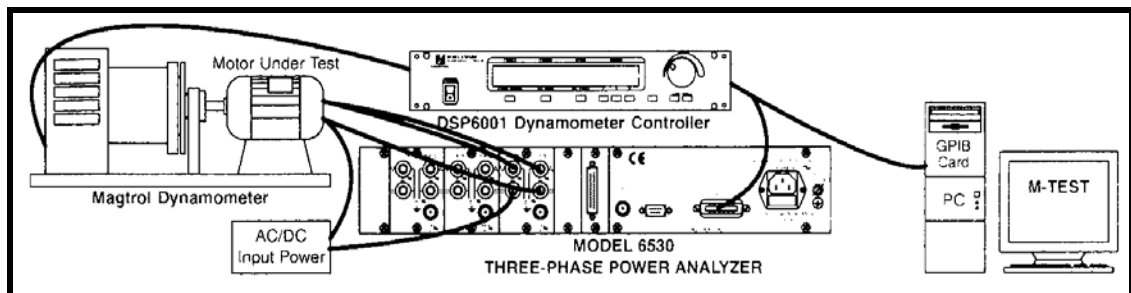
Obr.4.13 Napěťová sonda zapojena při měření na stejnosměrném motoru. Zdroj: [6]



Obr.4.14 Záznam měřeného signálu proudu digitálním osciloskopem na stejnosměrném motoru. *Zdroj:* [6]

4.8 Měření elektrických veličin automatizovanými měřicími systémy

Rostoucí počet zaznamenávaných údajů a potřeba rychlého odečtení měřených hodnot v jeden okamžik sebou přinesl požadavek na automatizovaný, často i programově řízený sběr analogových a digitálních dat jak v laboratorních tak i ve výrobních podmínkách. Většinou je součástí takového systému počítač, do kterého je zajištěn přenos výsledků z programově řízeného měření dat a kde také probíhá následné zpracování a vyhodnocování. Počet měřených veličin, doba měření a velikost vzorkování je obvykle dána v nastavení softwaru v počítači. Pro připojení měřících zařízení k počítači se používají např. systémy se sériovým rozhraním RS 232 nebo sběrnice s paralelním rozhraním GPIB IEEE 488.2 nebo přes standardizované sériové sběrnice a rozhraní USB. [10]



Obr.4.15 Uspořádání zapojení dynamometru s měřicí jednotkou Model 6510e. *Zdroj:* [11]

Přes tuto jednotku jsou naměřené hodnoty proudu, napětí, výkonu a frekvence zaznamenávány do počítače. Komunikace mezi počítačem a měřicí jednotkou Model 6510e je zajištěna propojovacím kabelem přes rozhraní RS-232 nebo GPIB na počítači a rozhraní RS-232 a GPIB/IEEE-488. [11]



Obr.4.16 Měřicí jednotka Model 6510e.

Zdroj: <http://www.magtrol.com/motortest/poweranalyzers.html#specs>

Proud (A)	Napětí (V)	Vstupní výkon (W)	Účinnost (%)	Rychlost (ot/min)	Moment (N.m)	Výstupní výkon (W)	Doba měření (s)
2,289	13,531	30,764	0,039	64	0,178	1,193	0,031
2,286	13,531	30,745	0,04	65	0,179	1,218	0,078
2,262	13,531	30,412	0,04	64	0,18	1,206	0,141
2,25	13,531	30,246	0,04	64	0,179	1,2	0,187
2,249	13,531	30,238	0,04	65	0,177	1,205	0,234
2,253	13,531	30,289	0,046	64	0,208	1,394	0,281
2,276	13,531	30,603	0,064	64	0,292	1,957	0,328
2,356	13,531	31,694	0,096	64	0,456	3,056	0,391
2,509	13,532	33,764	0,13	63	0,664	4,381	0,437
2,716	13,532	36,569	0,163	62	0,919	5,967	0,484
2,957	13,533	39,856	0,196	61	1,226	7,832	0,531

Obr.4.17 Soubor naměřených hodnot na stejnosměrném motoru pře jednotku Model 6510e.

Zdroj: [6]

5. Měření mechanických parametrů a veličin

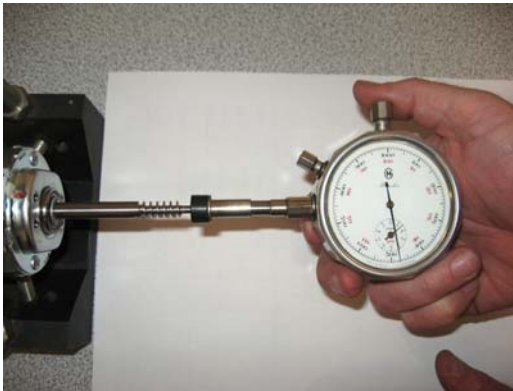
5.1 Měření otáček a uhlové rychlosti

V současné době se používá hlavně měření bezkontaktní, které je založeno na znalosti, že kmitočet impulzů je úměrný rychlosti motoru. Jestliže počet generovaných pulzů na jednu otáčku je známý, pak pro měření rychlosti stačí provést měření kmitočtu. [4]

- a) Měření mechanickými otáčkoměry
- b) Měření digitálním ručním otáčkoměrem
- c) Měření pomocí inkrementálního rotačního čidla
- d) Měření otáčivé rychlosti tachogenerátorem
- e) Měření stroboskopem
- f) Měření elektromagnetickým otáčkoměrem
- g) Měření tachodynamem

a) Měření mechanickými otáčkoměry

Podle principu vnitřního mechanismu rozeznáváme otáčkoměr chronometrický a odstředivý. U otáčkoměru chronometrického je hodinový strojek, který po přesně nastavenou dobu přes převodový mechanismus sčítá počet otáček. Otáčkoměr odstředivý se skládá se závaží, umístěných v určité vzdálenosti od osy otáčení. Zvětšují-li se otáčky, vzdalují se působením odstředivých sil závaží od osy otáčení, překonávají sílu pružiny a jejich pohyb je převeden na ručku přístroje. Rozsahy u těchto otáčkoměrů se mění pomocí převodovky (obvykle v rozmezí 16 – 16 000 ot/min). Samotný princip měření u obou typů otáčkoměrů spočívá pouze v přiložení nástavce kuželového tvaru na čelní plochu hřídele



motoru a na stupnici lze ihned odečíst naměřené hodnoty. Z důvodu přesnosti měření je při této metodě nutné dbát na dodržení souososti výstupní hřídele otáčkoměru s hřídelí měřeného motoru a také na přítlačnou sílu vyvinutou koncovým nástavcem otáčkoměru na výstupní hřídel motoru, která by měla být minimální. [4]

Obr.5.1 Metoda měření mechanickým chronometrickým otáčkoměrem. *Zdroj:* [6]

b) Měření digitálním ručním otáčkoměrem

Je obdobou mechanického otáčkoměru, s tím rozdílem, že tento otáčkoměr neobsahuje žádnou převodovku a proto nezatěžuje výstupní hřídel měřeného motoru prakticky žádným momentem. [4]



Obr.5.2 Metoda kontaktního měření otáček digitálním otáčkoměrem. *Zdroj:* [6]

Uvnitř otáčkoměru je na hřídelce vložena volně se točící clona, která přerušuje osvětlení fotodiody. U digitálního otáčkoměru je většinou možné provést i bezkontaktní měření. V tomto případě se musí na hřídel měřeného motoru nalepit reflexní páska, která se otáčkoměrem osvětluje. Zdroj světla (vysílač) i přijímač je integrován do otáčkoměru. Naměřené hodnoty jsou při kontaktním tak i bezkontaktním způsobu měření čteny na displeji otáčkoměru. Většinou tyto typy otáčkoměrů jsou vybaveny pamětí pro zachycení maximální, minimální i poslední změřené hodnoty otáček. Některé typy mají i sériové rozhraní (RS232) pro přenos dat do PC. [4]



Obr.5.3 Metoda bezkontaktního měření otáček digitálním otáčkoměrem. Zdroj: [6]

c) Měření pomocí inkrementálního rotačního čidla

Tento princip měření, který vychází z metody měření pomocí impulzů, je využíván např. u dynamometrů, kdy na hřídeli s rotorem dynamometru je připevněno inkrementální čidlo, které je přes hřídel rotoru spojeno s hřídelí měřeného motoru. Inkrementální rotační čidlo může mít až tři výstupní signály, z toho dva jsou tvořeny obdélníkovým průběhem. Počet impulzů na jednu otáčku je známý a oba kanály jsou navzájem pootočený o 90° . Poté je na základě jejich posuvu možné určit směr točení. Třetí kanál vysílá tzv. nulový impuls za jednu otáčku a je možné jím sledovat natočení hřídele do dané polohy.

Výstupy jsou zpravidla ještě vnitřním zapojením negovány a tak můžeme mít až 6 výstupních kanálů. Na trhu jsou nabízeny IRC smínače s určitým počtem inkrementů (impulzů) na otáčku. Počet je většinou dán mocninou dvou nebo je dělitelný třemi. [4]



Obr.5.4 Inkrementálního čidlo.

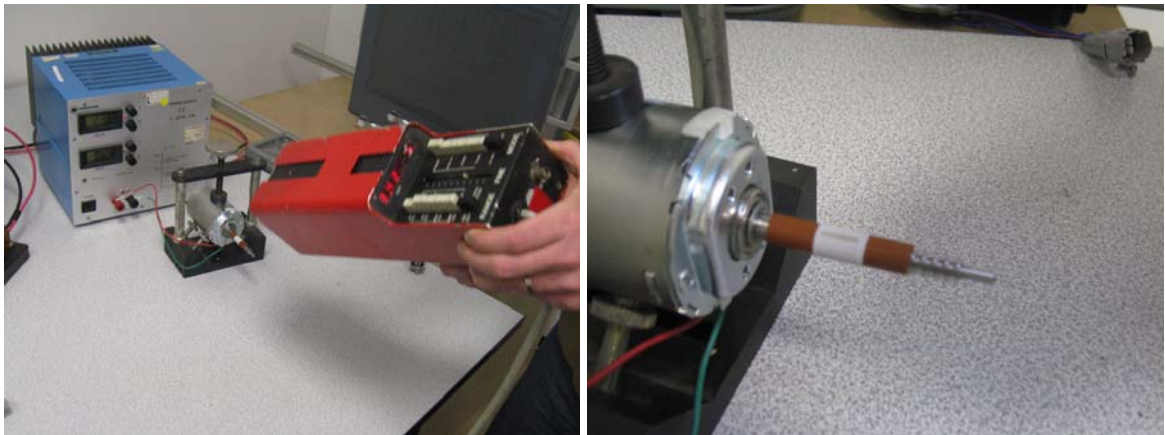
Zdroj: <http://www.baumerelectric.com/be105.html?L=1>

d) Měření otáčivé rychlosti tachogenerátorem

Jedná se u využití střídavého stroje s permanentními magnety, který nemá komutátor. Výstupní střídavé napětí je úměrné rychlosti stroje. Vzhledem k vysoké kvalitě použitých materiálu (magnety z kobaltových slitin a stříbrné kontakty) vykazují tachogenerátory vynikající elektrické vlastnosti. Využívají se pro měření motorů s častými a rychlými změnami směru otáčení. [4]

e) Měření stroboskopem

Před začátkem měření musí být na hřídel motoru nalepena reflexní páska, na kterou se vyznačí např. fixem čára. Stroboskopem se poté na otáčející hřídel vyzařují záblesky a postupně se mění na stupnici stroboskopu frekvence záblesků. Jakmile souhlasí frekvence záblesků s rychlostí nastavenou na stupnici stroboskopu, otáčející hřídel působí dojem, jakoby stála. Při tomto momentu se odečítají ze stupnice na stroboskopu naměřené otáčky. [4]



Obr.5.5 Metoda měření stroboskopem. Zdroj: [6]

f) Měření elektromagnetickým otáčkoměrem

Změna magnetického toku, která je vytvářena ozubeným kolečkem z magneticky měkkého materiálu, je v cívce zpracována do el. impulsů a ty jsou načítány. Tento systém se používá v automobilech ke snímání otáčení kol pro ABS systém. [4]

g) Měření tachodynamem



Tachodynamo je rotační elektrický stroj, který generuje stejnosměrné napětí a používá se jak pro měření otáček, tak pro měření úhlové rychlosti. Výstupní hodnota napětí se lineárně mění s otáčkami rotoru tachodynamu, proto je možné využití tohoto efektu pro měření otáček a úhlové rychlosti. [4]

Obr.5.6 Tachodynamo. Zdroj: [6]

Převodní vztah mezi úhlovou rychlostí a otáčkami:

$$\omega = \frac{2n\pi}{60} = [\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (24)$$

5.2 Měření momentu

Pro měření točivého momentu na motorech se používají brzdící přístroje nazývané dynamometry. [4]

Dynamometry se podle způsobu brzdění dělí na:

- a) práškovou brzdu
- b) vířivou brzdu
- c) hysterezní brzdu.

a) Prášková brzda

Skládá se z nízko-profilového rotoru a statoru, který je namontován na kyvném rámu, tak aby měřený moment byl přenesen a vyhodnocen siloměrem na boční straně dynamometru. Malý průměr rotoru poskytuje výhodu působení malého momentu setrvačnosti. Dynamometry jsou vybaveny chladícím systémem na odvod tepla generovaného brzděním a také termostatem, který chrání dynamometr v případě, že ochrana chlazením není účinná. U práškové brzdy je vzduchová mezera mezi státorem a rotorem vyplněna práškem magnetu. Samotný brzdící efekt je tvořen třením mezi státorem a rotorem, které vzniká magnetizací prášku. Děje se tak pomocí magnetizování budícím proudem na cívkách statoru. Po nabuzení brzdy lze měřit točivý moment. Práškové brzdy jsou většinou

konstruované pro měření méně citlivých motorů s menším počtem otáček a velkým záběrovým momentem. Tyto měří s přesností od 0,3% do 0,5% a jsou vhodné pro měření motorů od středních až po velmi vysoké momenty (5 – 1200Nm). [7]

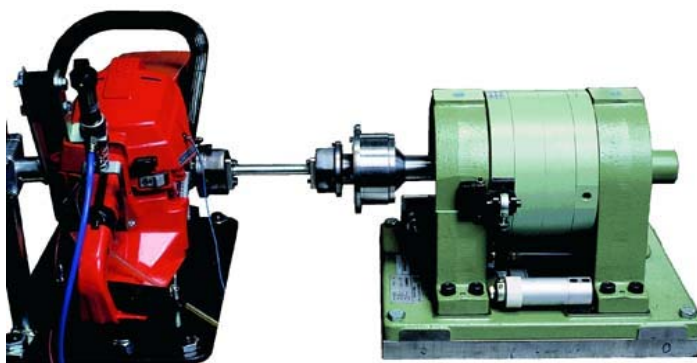


Obr.5.7 Prášková brzda.

Zdroj: <http://www.magtrol.com/motortest/dynamometers.html>

b) Vířivá brzda

U vířivé brzdy jsou cívky statoru buzeny stejnosměrným proudem, který vytvoří magnetické pole. Rotor se otáčí v magnetickém poli statoru a vlivem střídání zubu a mezery rotoru se mění magnetický odpor magnetického obvodu a tím i magnetický tok. Změna magnetického toku způsobuje indukování napětí v magnetickém obvodu, v důsledku čehož začnou obvodem protékat vířivé proudy. Působením vířivých proudů se vytvoří brzdňý moment, přičemž velikost tohoto momentu je říditelná změnou proudu v budicí cívce. Aby bylo možné měřit záběrový moment na tomto dynamometru, je nutné zablokovat stator i rotor najednou. V tomto případě dynamometr zastaví rotaci rotoru a



moment testovaného motoru je integrálně přenesen na měřicí siloměr dynamometru. Vířivé brzdy měří s přesností od 0,3% do 0,5% a jsou vhodné pro měření motorů od středních až po velmi vysoké momenty (5 – 600Nm). [7]

Obr.5.8 Vířivá brzda při měření charakteristiky motoru pro motorovou pilu.

Zdroj: http://www.magtrol.com/motortest/wbpb_applications.html

c) Hysterézní brzda

Hysterezní brzda je vhodná pro měření motorů s malým momentem (18 mN·m do 56.5 N·m) a vysokými otáčkami (0- 32000ot/min). Skládá se ze statoru a rotoru, které jsou odděleny vzduchovou mezerou. V momentě, kdy magnetizační síla je z cívky vybuzena na



statoru, vzduchová mezera se stává magnetickým polem a rotor, který je magneticky omezen, poskytuje brzdicí účinek mezi statorem a rotorem. [8]

Obr. 5.9 Hysterézní brzda. Zdroj: [6]

Měření na dynamometrech

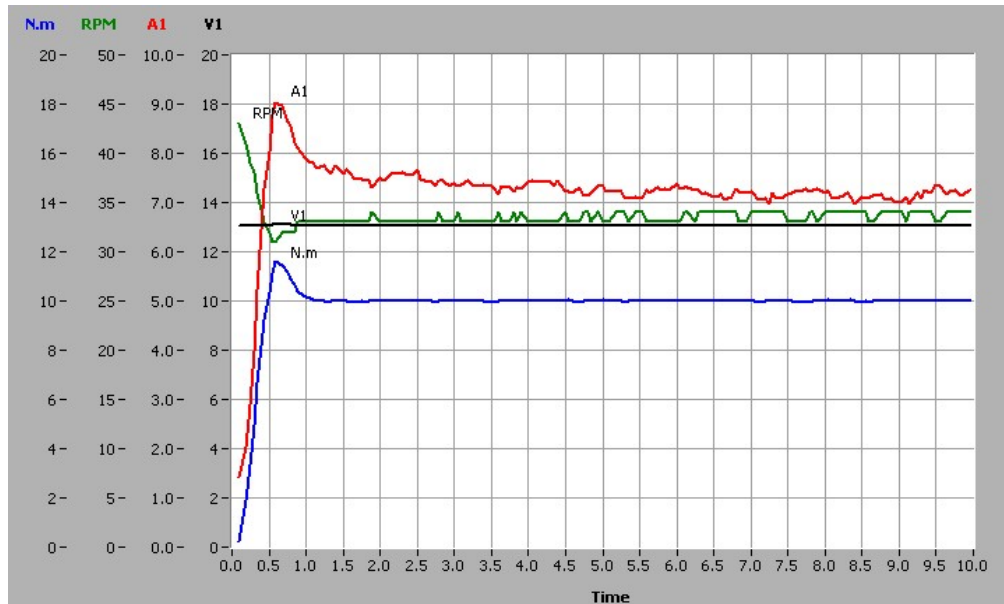
Použitím dynamometrů lze kromě měření momentu s odpovídajícím příslušenstvím (řídící jednotky, výkonový analyzátor a příslušný testovací software) měřit i otáčky, proud, vstupní výkon, výstupní výkon, úhel a účinnost. Z důvodu přesnosti měření je ovšem důležité před začátkem měření znát přibližnou hodnotu maximálního momentu a rychlosti, podle které se použije dynamometr co s nejvhodnějším rozsahem. Po tomto kroku je ještě nezbytné pro správné zatěžování motoru nastavit regulaci PID dle rychlosti a výkonu motoru. Během samotného měření se motory zahřívají a jejich moment se s zvyšující teplotou ve vinutí rotoru snižuje, proto je nutné provést měření v co možná nejkratší době (max. 10s) aby nebylo zkresleno. Důležitým faktorem ovlivňujícím naměřené hodnoty je i odpor vodičů, kterými je měřený motor napájen ze zdroje. Odpor těchto vodičů by měl být vždy předem definován z důvodu možných ztrát úbytku napětí během měření. [7]

Měření momentu podle způsobu měření lze rozdělit na:

- a) měření momentu v ustáleném stavu (konstantní moment)
- b) měření momentu v přechodovém stavu (rozběh nebo průběh celé charakteristiky)
- c) měření speciální (kyvný pohyb, torzní kmity) [4]

a) Měření momentu v ustáleném stavu

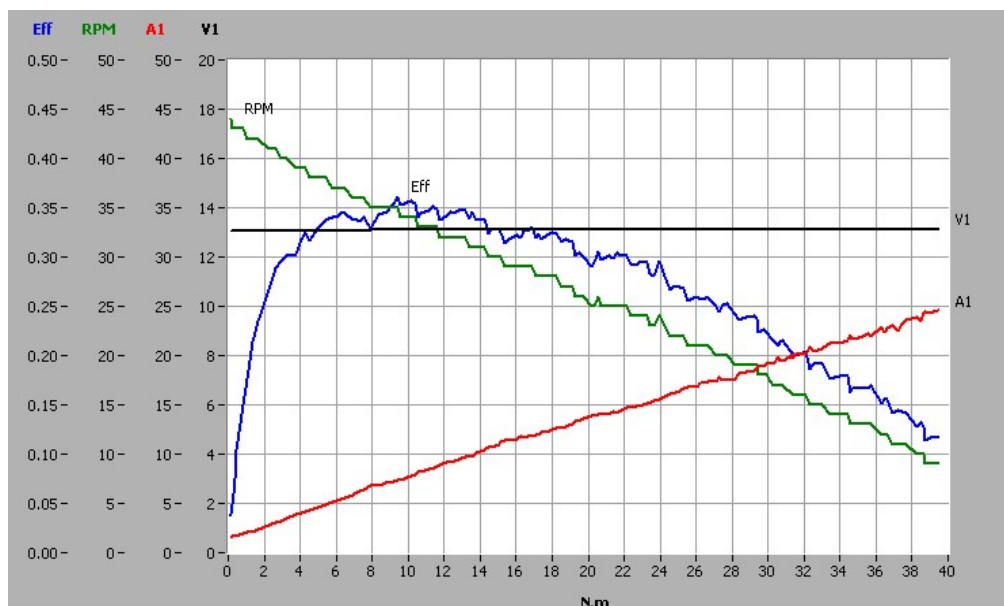
Motor je po celou dobu zatěžován konstantním momentem. Nepatrně se mění rychlost motoru vlivem zvyšující se teploty a také proud vlivem komutace. Špička trvající 1s na začátku měření je způsobena náběhem při zapnutí motoru, než se ustálí zatížení 10Nm. [6]



Obr. 5.10 Měření motoru s permanentními magnety při zatížení 10Nm. Zdroj: [6]

b) Měření momentu v přechodovém stavu

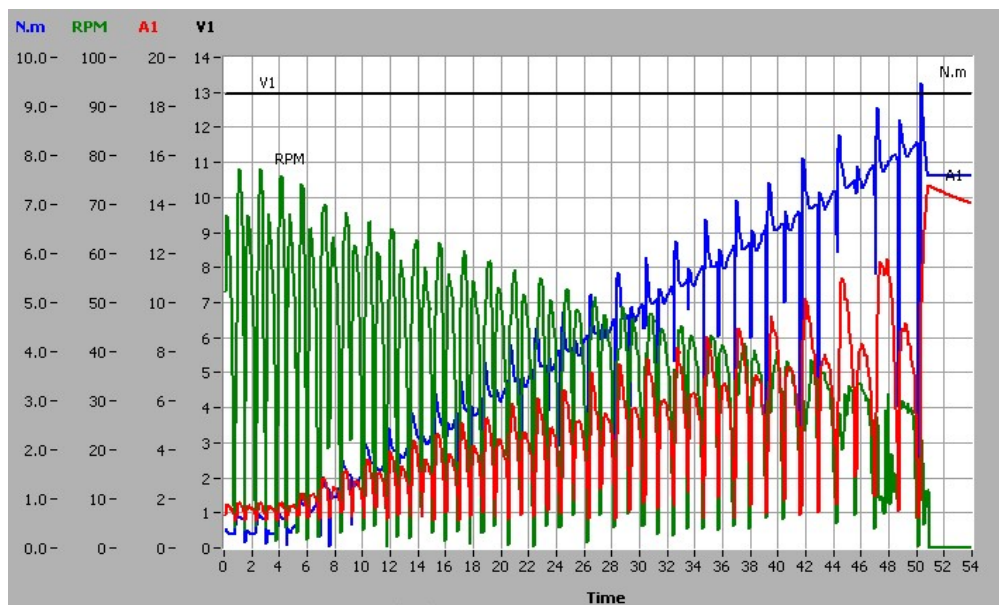
Moment motoru je měřen od 0Nm až po záběrový moment. Se zvyšujícím se momentem zatížení klesají otáčky motoru a lineárně vzrůstá odběr proudu. [6]



Obr.5.11 Měření motoru s permanentními magnety při zatížení 0-40Nm. Zdroj: [6]

c) Měření speciální

Při tomto měření může být motor zatěžován konstantním momentem nebo lze měřit i celkový průběh charakteristiky. Je však důležité, aby nastavení hardwaru a softwaru brzdícího zařízení bylo přizpůsobeno typu měřeného motoru, tak jako je to např. při měření kyvných motorů, kdy moment zatížení je v reverzačním bodě vypnut. [6]



Obr. 5.12 Měření kyvného motoru s permanentními magnety při postupném zatěžování od 0-9Nm. Zdroj: [6]

5.3 Nepřímé měření účinnosti

Účinnost lze snadno vypočítat z naměřených hodnot na dynamometru, jestliže naměříme otáčky motoru a proud při určitém napájecím napětí a zatěžovacím momentu. [4]

Účinnost vypočteme dle vzorce:

$$\eta = \frac{P}{P_d} = \frac{P_d - \Delta P}{P_d} [\%] \quad (25)$$

El.příkon určíme z napájecího napětí a proudu rotoru dle vzorce :

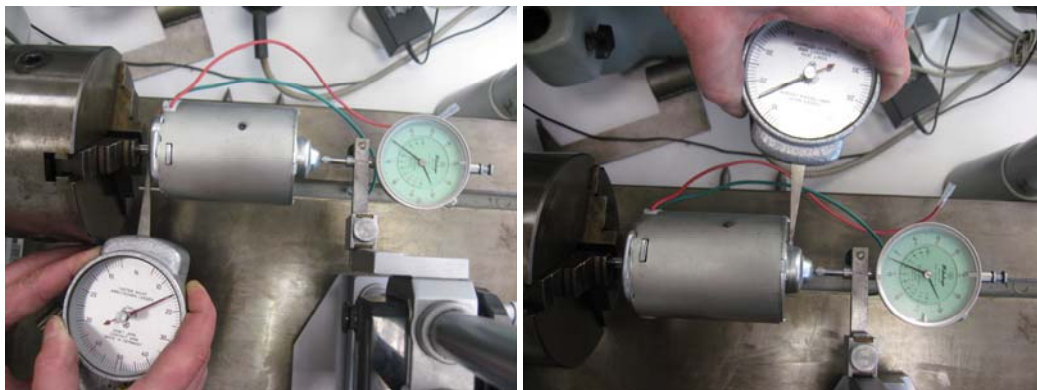
$$P_d = U \cdot I \text{ [W]} \quad (26)$$

Mechanický výkon určíme z otáčivé rychlosti a momentu na hřídeli motoru dle vzorce:

$$P_M = M \cdot \omega = M \frac{n\pi}{30} \text{ [W]} \quad (27)$$

5.4 Měření mechanické vůle

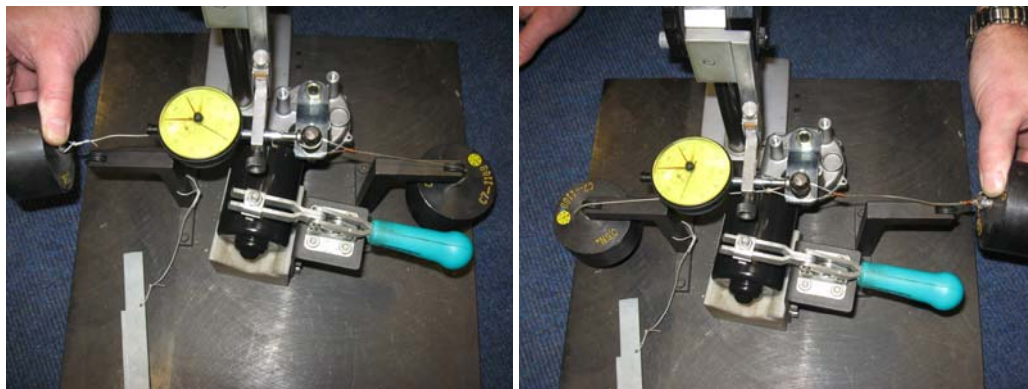
Měření vůle (radiální i axiální) je dáno specifickými požadavky, které vycházejí z konstrukce a velikosti motorů. Např. u malých stejnosměrných motorků bez převodové skříně je obvykle požadováno měřit pouze axiální vůli. Požadované parametry vycházejí z katalogových hodnot použitého ložiska, které jsou použité na výrobním výkrese. Při samotném měření axiální vůle se motor uchytí za výstupní hřídel do prizmatka a poté se šneková hřídel zatíží siloměrem v osovém směru specifikovanou silou postupně v jednom a druhém směru. Úchylkoměrem se potom odečte výchylka v každém směru a výsledná axiální vůle je součet naměřených odchylek v obou dvou směrech. [6]



Obr.5.13 Měření axiální vůle na stejnosměrném motoru bez převodové skříně.

Zdroj: [6]

Při měření radiální mechanické vůle u malých, ale i velkých stejnosměrných motorů s převodovou skříní se měří především zubová vůle v převodové skříní. Využívá se metody kdy se výstupní hřídel motoru zatíží definovaným momentem a úchylkoměrem se odečte naměřená výchylka. [6]



Obr.5.14 Měření radiální vůle na stejnosměrném motoru s převodovou skříní.

Zdroj: [6]

5.5 Měření momentu setrvačnosti

Moment setrvačnosti u stejnosměrných motorů je vytvářen točivou součástí motoru (rotorem) a u motorů s převodovou skříní i ozubeným kolem, který je s rotorem přes pastorek přímo spojen. Moment setrvačnosti lze vypočítat pomocí vzorce: [3]

$$J = \frac{1}{2} m r^2 = \frac{\rho \pi}{2} l r^2 \quad [\text{kg m}^2] \quad (28)$$

kde m [kg] je hmotnost rotujícího tělesa, l [m] je délka rotujícího tělesa, r [m] je poloměr rotujícího tělesa a ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je hustota rotujícího tělesa.

Pro měření momentu setrvačnosti existují několik metod měření:

- a) Měření pomocí tělesa se známým momentem setrvačnosti zavěšeným na elastickém závěsu
- b) Měření pomocí bifilárního závěsu
- c) Stanovení momentu setrvačnosti z doběhové zkoušky a okamžitých ztrát

a) Měření pomocí tělesa se známým momentem setrvačnosti zavěšeným na elastickém závěsu.

Při této metodě se měří frekvence kmitů (f_1) [Hz] tělesa se známým momentem setrvačnosti J_1 zavěšeného na elastickém závěsu. Velikost tohoto momentu setrvačnosti by měla být podobná s velikostí měřeného momentu. Po provedení měření se známým momentem setrvačnosti zavěsíme na stejně dlouhý elastický závěs těleso s neznámým momentem setrvačnosti a měříme opět frekvence kmitů (f_2) [Hz]. [3]

Neznámý moment setrvačnosti J_2 poté lze vypočítat dle vztahu

$$J_2 = J_1 \left[\frac{(f_1)^2}{(f_2)^2} - 1 \right] \quad [\text{kg m}^2] \quad (29)$$

b) Měření pomocí bifilárního závěsu

Při tomto měření setrvačnosti se měřené těleso zavěsí na dvě nitě nebo provázky o délce l vzdálené od sebe $2r$. Následně uvedeme těleso do krouticích kmitů a měříme frekvenci.

[3]

Neznámý moment setrvačnosti J_2 poté lze vypočítat dle vztahu :

$$J_2 = \frac{\rho \cdot m \cdot r^2}{(2\pi f)^2 l} \quad (30)$$

Pro přesnost měření je třeba dodržet podmínku $\frac{l}{2r} \geq 10$.

Zdroj: [3]

c) Stanovení momentu setrvačnosti z doběhové zkoušky a okamžitých ztrát

Při tomto měření se motor postupně roztáčí a pro vhodně volenou otáčivou rychlost se stanoví ztrátový příkon. Poté se otáčivá rychlost zvýší nad jmenovitou hodnotu (asi 120%) a stroj se odpojí. Jeho rychlost klesá v závislosti na čase. Pokud je motor nabuzen stejným proudem, při kterém byl stanoven ztrátový výkon, známe brzdny výkon, daný ztrátami naprázdno a mechanickými ztrátami. [5]

Pro dané rychlosti můžeme stanovit moment setrvačnosti motoru na základě vztahu:

$$\Delta P_n = M\omega = J \frac{d\omega}{dt} = J \frac{\pi}{30} \frac{dn}{dt} \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (31)$$

kde ΔP_n [W] jsou výkonové ztráty

$$\text{Z toho po úpravě je moment setrvačnosti: } J = \Delta P_n \frac{900}{\pi^2} \frac{1}{n \frac{dn}{dt}} \quad [\text{kg m}^2] \quad (32)$$

6. Speciální měření

6.1 Měření hluku

Měření hluku patří k standardním měřením na stejnosměrných motorech a to jak z důvodu subjektivních požadavků ze strany zákazníka na co nejnižší hladinu hluku, která se měří v decibelech [dB], tak hlavně z důvodu požadavků hygienických norem. [5]

Akustický tlak – p [Pa] je vlastně střídavý tlak akustického vlnění. Jedná se o lokální odchylky od středního barometrického tlaku. Vztažná hodnota je $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Jedná se o minimální hodnotu zdravého lidského orgánu sluchu. [5]

Akustický výkon – P [W] je poměr energie přenášené v časovém intervalu Δt k tomuto intervalu. [5]

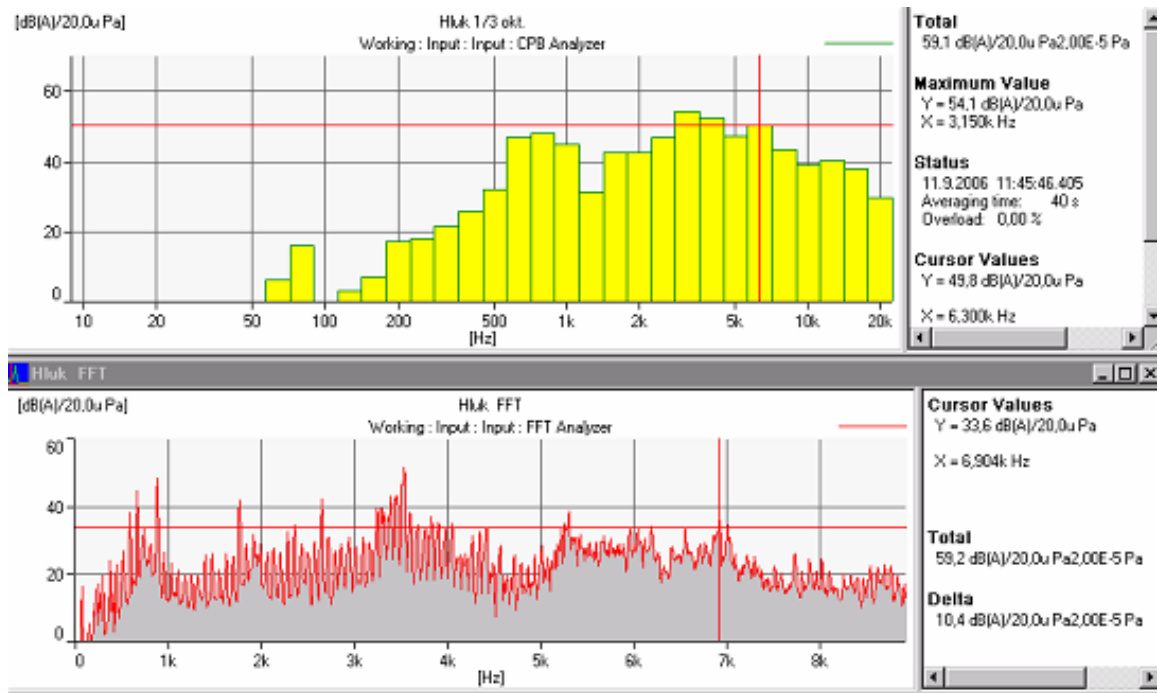
Pro měření akustického výkonu platí tento vztah: $P = I \cdot S$ (33)

kde I [$W \cdot m^{-2}$] je intenzita zvuku, což je poměr toku akustické energie v daném směru kolmém k ploše S [m^2]. [5]

Pro měření intenzity zvuku platí vztah: $I = p \cdot v$ [$W \cdot m^{-2}$] (34)

Před začátkem samotného měření na stejnosměrném motoru je důležité nejdříve změřit hladinu hluku pozadí. Jestliže není v testovacích specifikacích uvedeno jinak, tak by hladina hluku měla být minimálně o 10dB nižší, než je hladina hluku naměřená na zkoušeném motoru. Nastavení mikrofону od měřeného motoru by mělo být vždy uvedeno v testovacích specifikacích. V případě, že není, umístí se mikrofon ve vzdálenosti 1m od motoru. Předpokládá se, že zvukové pole je dál už shodné s akustickým polem volným. Měření se provádí na frekvenci v rozsahu od 8Hz – 24kHz. [5]

Nejčastěji se pro měření hluku používá CPB analýza nebo FFT analýza. Na rozdíl od CPB analýzy, při které je měřené spektrum rozděleno do pevně daných pásem, probíhá FFT (Rychlá Fourierova transformace) spojitě v celém spektru. [5]



Obr.6.1 Porovnání měření hluku v CPB a FFT analýze při měření stejnosměrného stěračového motorku na zařízení PULSE. Zdroj: [6]

Při měření hluku je třeba zohlednit subjektivní vnímání lidským uchem. Z tohoto důvodu se používají používají váhové filtry A,B,C a další, které potlačují některé frekvence podle závislosti uvedených v požadovaných normách. Při měření hluku na stejnosměrných motorech se provádí většinou bud měření akustického tlaku nebo akustického výkonu. [5]



Pro měření hluku se používají ruční analyzátoři, které kromě měření hluku a také vibrací jsou schopny provést frekvenční analýzu nebo FFT analýzu. [5]

Obr.6.2 Analyzátor pro měření hluku a vibrací.

Zdroj: <http://mereni-a-analyza-signalu-hluku-a-vibraci.spectris.cz/>



Dále se pro měření hluku používá měřicí systém PULSE, což je analyzátor vyvinut na platformě osobního počítače. Velkou výhodou tohoto systému je možnost měřit v reálném čase a sledovat výsledky měření a analýzy ihned po změření. Dále umožňuje provedení více analýz současně, např. FFT analýzy a oktávové analýzy. [5]

Obr.6.3 Systém PULSE pro měření hluku a vibrací.

Zdroj: <http://mereni-a-analyza-signalu-hluku-a-vibraci.spectris.cz/>

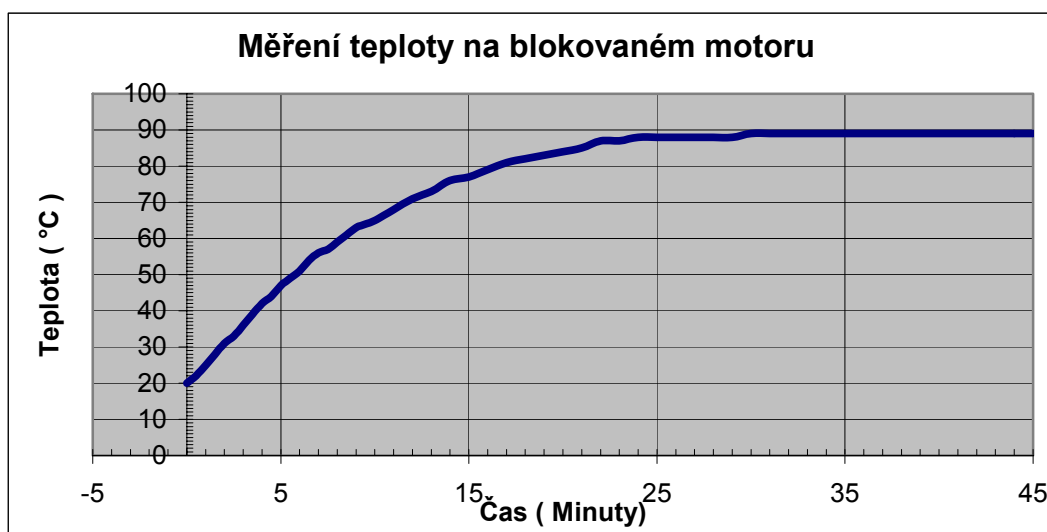
6.2 Měření teploty

6.2.1 Měření teploty termočlánky

Pro měření teploty se používají moderní teplotní senzory s rozsahem teplot od -200°C do $+200^{\circ}\text{C}$. Tyto senzory jsou většinou vyráběny na bázi molybdenu nebo platiny. Platinové senzory mají dokonce teplotní rozsah až do $+600^{\circ}\text{C}$. Pro měření vyšších teplot jsou stále používány termočlánky nikl-chrom/nikl-hliník (tzv. „K“) nebo železo/měď-nikl (tzv. „J“). Teplotní rozsah termočlánku typu K je -270°C do $+1370^{\circ}\text{C}$, přesnost 0,4% z naměřené hodnoty a rychlost odezvy je asi 2s. Při měření teploty je nutné zvolit dle požadované přesnosti a rychlosti změny teploty v čase měření vhodný snímač teploty. Např. pro rychlá sekundová měření nebudeme volit termočlánek typu K s rychlostí odezvy 2s. Dále je nezbytné dbát zvláště u termočlánků na připevnění snímače k měřené části motoru a to tak, aby teplota měřeného místa nebyla ovlivněna přívody ani konstrukcí termočlánku. Proto se například u termočlánků používá k připevnění snímače na měřený objekt tzv. krček, jehož délka se volí dle měřené teploty. Posledním krokem, který je potřeba pro provedení přesného měření, je vybrat správný přístroj. Vhodným přístrojem může být univerzální multimetr, který má kontakty ze stejného materiálu jako termočlánek typu K, takže nevznikají žádné přechody a tím falešná termonapětí. Většina multimetrů je vybavena sériovým rozhraním RS232 a je tedy možné propojit multimetr s počítačem a po nainstalování příslušného software lze nastavit vzorkování měření i ukládat naměřené hodnoty v závislosti na délce měření. [5]



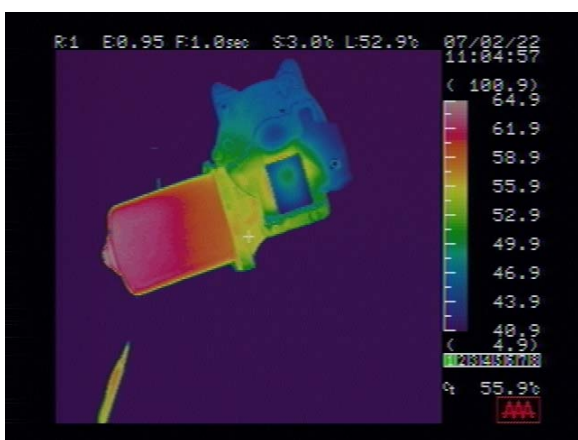
Obr.6.4 Propojení senzoru s multimetrem. Zdroj: [6]



Obr.6.5 Záznam teploty z měření teploty pomocí termočlánku připojeného přes R232.

Zdroj: [6]

6.2.2 Měření teploty termovizí



V případě požadavku na provedení měření teploty na motoru ve více místech, kdy je nutné lokalizovat např. největší zdroj teploty, je nevhodnější použít termovizi místo více snímačů. Měření pomocí termovize funguje na principu zachycení emitovaného záření v infračervené oblasti a dokonale znázorňuje prostorové rozložení teploty z povrchu objektu měření. [6]

Obr.6.6 Záznam teploty z měření termovizí na stejnosměrném motorku pro pohon stěračů.

Zdroj: [6]

7. Závěr

Měření a zkoušky stejnosměrných elektrických motorů představené v této práci patří ke každodenní technické praxi firem zabývajících se výrobou těchto zařízení. Měření elektrických i neelektrických parametrů stejnosměrných motorů je nejen součástí laboratorní diagnostiky, ale ve stále větší míře i součástí zkušebních zařízení integrovaných přímo do montážních linek. Vzrůstající nároky na jakost a spolehlivost výrobků, zejména v automobilovém průmyslu, nutí výrobce garantovat, že každý jednotlivý výrobek splňuje požadované parametry a navíc musí o této zkoušce existovat prokazatelný, zpětně dohledatelný záznam. Kombinací měřicích metod a principů popsaných v této práci s výpočetní technikou vznikají automatizované měřicí systémy schopné v zpracovávat naměřené veličiny v reálném čase.

Tato práce si klade za cíl představit přehledný výčet nejběžnějších měřicích metod pro zjišťování elektrických a neelektrických parametrů stejnosměrných motorů za normálních provozních podmínek. V navazujícím magisterském studiu bych rád toto téma dále rozvinul a zaměřil se na vliv okolního prostředí na změnu parametrů stejnosměrných elektrických motorů.

8. Použité značení parametrů s jednotkami

Regulační rezistor R_1 [Ω]

Spouštěcí rezistor R_{sp} [Ω]

Odpor vinutí kotvy R_a [Ω]

Budící proud I_B [A]

Proud kotvy I_{KM} , I_a [A]

Proud kotvy I [V]

Magnetický tok Φ . [Wb]

Rezistor pro sériové vinutí u kompaudního motoru R_s [Ω]

Rezistor pro derivační vinutí u kompaudního motoru R_d [Ω]

Budící proud sériového vinutí u kompaudního motoru I_{bs} [A]

Budící proud sériového vinutí u kompaudního motoru I_{ds} [A]

Svorkové napětí U , U_{SM} , U_S [V]

Vnitřní indukované napětí U_i [V]

9. Použité obrázky

Obr.2.1 Schematické zapojení derivačního motoru.

Obr.2.2 Schematické zapojení sériového motoru.

Obr.2.3 Schematické zapojení stejnosměrného kompaundního motoru.

Obr.2.4 Schematické zapojení stejnosměrného motoru s cizím buzením.

Obr.2.5 Schematické zapojení stejnosměrného motoru s permanentním magnetem.

Obr.3.1 Provozní hodnoty stejnosměrného motorku typu K6A1.

Obr.3.2 Graf z měření průběhu proudu a otáček v závislosti na zatěžovacím momentu.

Obr.3.3 Graf z měření průběhu otáček v závislosti na čase.

Obr.3.4 Přejížděvací charakteristika motoru.

Obr.4.1 Schéma zapojení voltmetru do stejnosměrného obvodu.

Obr.4.2 Schéma zapojení měření napětí s předřadným odporem.

Obr.4.3 Schéma zapojení ampérmetru do stejnosměrného obvodu.

Obr.4.4 Schéma zapojení měření proudu s bočníkem.

Obr.4.5 Analogový ampérmetr.

Obr.4.6 Digitální multimetr.

Obr.4.7 Zapojení při měření výkonu stejnosměrného proudu voltmetrem a ampérmetrem.

Obr.4.8 Zapojení při měření výkonu stejnosměrného proudu wattmetrem.

Obr.4.9 Přístroj pro měření izolačního odporu.

Obr.4.10 Zapojení ohmovou metodou při měření el. odporu pomocí voltmetru a ampérmetru.

Obr.4.11 Digitální osciloskop.

Obr.4.12 Proudová sonda zapojena do osciloskopu při měření stejnosměrného motoru.

Obr.4.13 Napěťová sonda zapojena do osciloskopu při měření na stejnosměrném motoru.

Obr.4.14 Záznam měřeného signálu proudu digitální osciloskop na stejnosměrném motoru.

Obr.4.15 Uspořádání zapojení dynamometru s měřicí jednotkou Model 6510e.

Obr.4.16 Měřicí jednotka Model 6510e.

Obr.4.17 Soubor naměřených hodnot na stejnosměrném motoru pře jednotku Model 6510e

Obr.5.1 Metoda měření mechanickým chronometrický otáčkoměrem.

Obr.5.2 Metoda kontaktního měření otáček digitálním otáčkoměrem.

Obr.5.3 Metoda bezkontaktního měření otáček digitálním otáčkoměrem.

Obr.5.4 Inkrementálního čidlo.

Obr.5.5 Metoda měření stroboskopem.

Obr.5.6 Tachodynamo.

Obr.5.7 Prášková brzda.

Obr.5.8 Vířivá brzda při měření charakteristiky motoru pro motorovou pilu.

Obr.5.9 Hysterézní brzda.

Obr.5.10 Měření charakteristiky na motoru s permanentními magnety při zatížení 10Nm.

Obr.5.11 Měření charakteristiky na motoru s permanentními magnety při zatížení 0-40Nm.

Obr.5.12 Měření charakteristiky kyvného motoru s permanentními magnety při zatížení 0-9Nm.

Obr.5.13 Měření axiální vůle na stejnosměrném motoru bez převodové skříně.

Obr.5.14 Měření radiální vůle na stejnosměrném motoru s převodovou skříní.

Obr.6.1 Porovnání měření hluku v CPB a FFT analýze.

Obr.6.2 Analyzátor pro měření hluku a vibrací.

Obr.6.3 Systém PULSE pro měření hluku a vibrací.

Obr.6.4 Propojení senzoru s multimetrem.

Obr.6.5 Záznam teploty z měření teploty pomocí termočlánku připojeného přes R232.

Obr.6.6 Záznam teploty z měření termovizí na stejnosměrném motoru.

10. Použitá literatura a prameny

- [1] POKORNÝ, K. et.al. *Elektrotechnika I.* 1.vydání. Praha: Česká zemědělská universita v Praze,2003. 172s. ISBN 978-80-213-1023-0
- [2] HLAVA,J. *Prostředky automatického řízení II.* 1.vydání. Praha:ČVUT Fakulta strojní,2000. 162s.
- [3] SLAVÍČEK, I. *Elektromotory a jejich řízení.* 1.vydání. Praha: Polytechnická knižnice,1968. 240s. ISBN 24-090-68
- [4] SKÁLA,B. a BARTOŠ,V. *Měření na elektrických strojích.* 2.vydání. Plzeň: Západočeská universita v Plzni,2006. 110s. ISBN 80-7043-447-3
- [5] SKÁLA,B. a ZÍŽEK,F. *Měření a zkoušení elektrických zařízení.* 1.vydání. Plzeň: Západočeská universita v Plzni,2004. 204s. ISBN 80-7043-306-X
- [6] KUSÝ, J. *Instrukce pro provedení měření na stěračových motorech.* 1.vydání. Praha: PAL International s.r.o,2005. 70s.
- [7] RAPPO, A. a RICHARD,L. *Instruction manual P/N 646.007E.* 10.vydání. Fribourg, Švýcarsko: Vibro-meter SA,1999. 80s.
- [8] RAPPO, A. a RICHARD,L. *Hysteresis dynamometers.* 3.vydání. Fribourg, Švýcarsko: Magtrol, Inc,2004. 74s.
- [9] HOFMANN, J. a URBANOVÁ,M. *Fyzika I.* 1.vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technická v Praze,2005. 172s. ISBN 80-7080-514-5
- [10] SROVNAL,V. et.al. *Elektrotechnická měření měřicí přístroje.* 1.vydání. Praha: nakladatelství INFORMATORIUM v Praze,2008. 140s. ISBN 978-80-7333-062-0
- [11] RAPPO, A. a RICHARD,L. *Manuál k jednotce MODEL 6510e.* 1.vydání. Fribourg, Švýcarsko: Magtrol, Inc,2002. 114s.
- [12] FAJTL,V., HAASZ, V. a SEDLÁČEK,M. *Elektrická měření.* 1.vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze,1994. 247s. ISBN 80-01-007561-0
- [13] GALAŠ,J. *Elektrotechnika pro přístrojovou techniku.* dotisk. Praha: České vysoké učení technické v Praze,1989. 212s.
- [14] TUMOVÁ,O. et.al. *Elektrická měření měřicí metody.* 2.vydání. Plzeň: Západočeská universita v Plzni,2005. 218s. ISBN 80-7043-412-0
- [15] BAREŠ, M. *Elektrotechnická měření.* 1.vydání. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera v Pardubicích,2006. 261s. ISBN 80-7194-910-8