

# Měření mechanických ztrát asynchronního stroje a porovnání s empirickým výpočtem

Lukáš Veg

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Fakulta elektrotechnická

Západočeská univerzita v Plzni

vegl@kev.zcu.cz

## Measurement of Mechanical Losses of an Asynchronous Machine and Comparison with Empirical Calculation

**Abstract** – The subject of this paper is measuring the mechanical losses of induction machines and further evaluation with empiric formulas. In the paper, two asynchronous machines are compared and measured. Then is calculated the deviance between the measured and calculated values. In the end of paper is discussed the influence on the total losses in machine and on the efficiency.

**Keywords** – Induction motors; Magnetic losses; Mechanical systems; Electromechanical systems; Mechanical variables measurement; Friction.

### I. ÚVOD

Ztráty mechanické ( $\Delta P_m$ ) se obvykle počítají jako součet ztrát třením v ložiskách a ventilačních. Ztráty v ložiskách závisí na druhu ložisek, tedy zda se jedná o ložiska valivá nebo kluzná. U valivých ložisek bude záležet na tvaru valivých elementů (kuličková, válečková, kuželíková, jehlová), na způsobu mazání, na rozměru ložiska, jeho zatížení a na otáčivé rychlosti. Ztráty v kluzných ložiskách budou závislé na typu ložiska (radiální nebo axiální), na způsobu mazání a rovněž na rozměrech, zatížení a otáčivé rychlosti. Ventilační ztráty jsou závislé na způsobu ventilace (bez ventilátoru, s ventilátorem), na chladícím médiu (vzduch, vodík nebo jiný plyn), na průtočném množství chladiva, jeho tlaku a rychlosti proudění.[1]-[5]

### II. VÝPOČET MECHANICKÝCH ZTRÁT POMOCÍ VZORCŮ Z DOSTUPNÉ LITERATURY A SROVNÁNÍ

Z výčtu všech parametrů, na kterých jsou závislé oboje ztráty lze usoudit, že jejich určení je značně komplikované. Proto se používá jednoduchých empirických vzorců dle kvalifikovaných odhadů získaných ze zkušenosti mnoha vyrobených a odzkoušených strojů. Dále uvedené vztahy pro velikost celkových mechanických ztrát (v ložiskách a ventilační) jsou podle [6]:

#### A. Asynchronní motory

s radiální ventilací:

$$\Delta P_m = (11 + i) \left( \frac{n}{1000} \right)^2 (10D_1)^3 \quad (1-a)$$

kde: i-počet radiálních ventilačních kanálů (stoj bez radiálních kanálů i=0)

$D_1$ -vnitřní průměr statoru  
 n-otáčivá rychlost  
 s axiální ventilací:

$$\Delta P_m = 0,65 \left( \frac{n}{100} \right)^2 (10D_e)^3 \quad (2)$$

kde  $v$  je obvodová rychlost rotoru:

$$v = \frac{\pi D_1 n}{60} = \frac{\pi \cdot 1,5750}{60} = 58,9 \text{ m/s} \quad (3)$$

anebo:

$$\Delta P_m = k \left( \frac{n}{1000} \right)^2 (10D_1)^4 \quad (4-b)$$

Kde  $k=1,3(1-De)$  pro  $2p=2$  a  $k=1$  pro  $2p>2$

### B. Synchronní stroje

-s vyniklými póly

$$\Delta P_m = 8p \left( \frac{n}{100} \right)^3 (10D_e)^3 \sqrt{L} \quad (5)$$

L-celková délka statoru  
 nebo lze použít vzorec

$$\Delta P_m = v^{2,5} \cdot D_1 \sqrt{l_e} = 58,9^{2,5} \cdot 1,5 \sqrt{0,518} = 28749 \text{ W} \quad (6)$$

-turboalternátory

$$\Delta P_m = 0,9 v^{2,5} D_r \sqrt{L}$$

kde  $D_r$  – průměr rotoru

Různé vzorce z různých publikací. Pro určení velikosti mechanických ztrát je v literatuře dostupných mnoho vzorců a návodů. Jejich problémem však je jejich neuniverzálnost. Většinou jsou totiž jen odhadovány v různých empirických vzorcích a s různými koeficienty. Např v [3] se vyskytují vzorce pro asynchronní motory:

$$\Delta P_m = K_T \left( \frac{n}{1000} \right)^2 (10D_e)^3 \quad (7-c)$$

U motorů s vnějším průměrem  $De$  menším než 0,25m je činitel  $K_t=5$  pro  $2p=2$ ;  $K_t=6$  pro  $2p$  větší než 4

A u motorů s vnějším průměrem  $De$  větší než 0,25m je  $K_t=6$  pro  $2p=2$  a  $K_t=7$  pro  $2p$  větší než 4.

Mechanické ztráty motorů s vnějším ofukováním ( $0,1 \leq De \leq 0,5$ )m

$$\Delta P_m = K_T \left( \frac{n}{10} \right)^3 D_e^4 \quad (8)$$

$K_t=1$  pro  $2p=2$  a  $K_t=1,3(1-De)$  pro  $2p \geq 4$

U motorů s radiální ventilací středního a velkého výkonu jsou mechanické ztráty

$$\Delta P_m = 1,2 \cdot 2 p t_p^3 \cdot (n_{vk} + 11) 10^3 =$$

Kde  $vk$  je počet radiálních ventilačních kanálů, jestliže kanály nejsou, je  $n_{vk}=0$

U motorů s axiální ventilací jsou mechanické ztráty dány vztahem

$$\Delta P_m = K_T \left( \frac{n}{1000} \right)^3 (10D_v)^3 \quad (9-d)$$

Kde  $D_v$  je vnější průměr ventilátoru (m) ve většině konstrukcí je možné uvažovat  $D_v \approx De$

$K_t=2,9$  pro motory s  $De \leq 0,25$ m

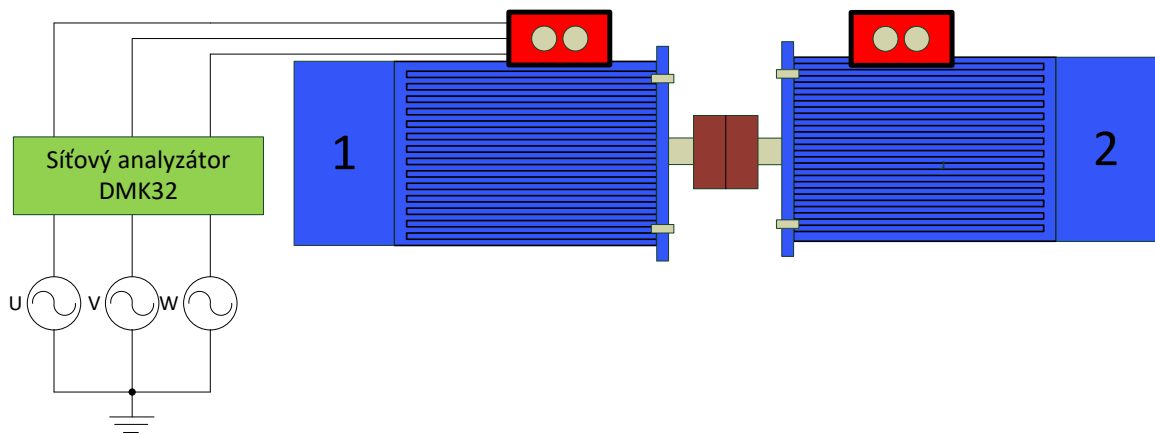
$K_t=3,6$  pro motory s  $De=0,25$  až 0,5m.

U motorů velkého výkonu ( $0,5m < De < 0,9m$ ) jsou mechanické ztráty

$$\Delta P_{mech} = K_T (10D_e)^3$$

Hodnoty činitele jsou pak:

- $2p=2$   $K_T=3,65$
- $2p=4$   $K_T=1,5$



**Obrázek I.** Schématický náčrt uspořádání a měření

- 2p=6  $K_T=0,7$
- 2p=8  $K_T=0,35$
- 2p=10  $K_T=0,2$
- 2p=12  $K_T=0,2$

V některých případech je třeba určit mechanické ztráty v ložiskách odděleně od celkových mechanických ztrát, v tomto případě můžeme použít těchto empirických rovnic. [6]:

$$\Delta P_{f1} = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot v_1 \cdot \frac{G}{d_1} \quad (10)$$

kde G-zatížení na ložisko (kg)

D1-průměr čepu hřídele

V1-obvodová rychlost na průměru čepu hřídele

## II. DETAIL K MĚŘENÉMU MOTORU

V našem případě se jedná o dva přírubové stroje na společně konstrukci. Tyto budou změřeny, nejprve každý zvlášť a následně spojeny pružnou spojkou. Bude provedeno měření na určení mechanických ztrát (kde tyto budou obsahovat i ztráty druhého stroje)

## III. VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA ASYNCHRONNÍCH STROJÍCH

Měřený motor byl připojen na třífázovou čtyřvodičovou síť, kterou bylo možné považovat v jistých mezích za souměrnou a vyváženou. Protože DMK 32 pracuje v přímém zapojení pouze do proudu 5 A, byly použity kalibrované transformátory proudu Metra Blansko, typ TL 20 v tř. p. (třída přesnosti) 0,05. Chyba měření může být v nejhorším případě při uvažování plného rozsahu proudu 0,0275A. V případě napětí 2V a chyba v nejhorším případě celkového výkonu je pak 2,75W. Tyto chyby jsou schopny ovlivnit výsledky.

TABULKA I. NAMĚŘENÉ MECHANICKÉ ZTRÁTY

Mechanické ztráty [W]		s druhým strojem 1		s druhým strojem 2		
měřený motor		samotný	s větrákem	bez větráku	s větrákem	bez větráku
1	s větrákem	34,85	<del>77,1</del>	<del>73,25</del>	71,05	67,45
1	bez větráku	33,4	<del>75,6</del>	<del>52,5</del>	60,7	44,25
2	s větrákem	43,75	77,1	73,25	<del>71,05</del>	<del>67,45</del>
2	bez větráku	36,2	75,6	52,5	<del>60,7</del>	<del>44,25</del>
Zprůměrované hodnoty z měření stroje			Zprůměrovaná velikost[W]			
větrák	Motor 1	1,45	3,85	23,1	9,5	Motor 1
	Motor 2	7,55	3,6	16,45	9,2	37,2
rotor	Motor 1	33,4	16,3	33,35	27,7	Motor 2
	Motor 2	36,2	36,2	10,85	27,8	37

V tabulce 1 je sumarizován přehled naměřených mechanických ztrát. Je zajímavé pozorovat změny hodnot mechanických ztrát, které závisí na daném měřeném stroji. Byly změřeny všechny dostupné kombinace strojů. A to nejprve oba motory samostatně, následně samostatně bez větráků pro lepší vyčíslení rotorových mechanických ztrát.

V průběhu vyhodnocení měření se ukázaly velké odchylky od předpokládaných hodnot. Po sumarizaci všech ztrát a jejich zprůměrování se ukázalo, že větráky mají v průměru ztráty okolo 9W (jak 1 tak I 2) a rotory jsou též podobné a jejich mechanické ztráty jsou zhruba 28W. Při porovnání s vypočtenými hodnotami z empirických vzorců vidíme, že tyto neodpovídají realitě. Při uvažování vztahu a) se jen blížíme k hodnotě mechanických ztrát pouze u rotoru bez ventilátoru. Chyba empirického vztahu je 46% při započtení maximální chyby měření a metody pak 42%. Oba dva motor vychází velice obdobně. Více odpovídající realitě je vztah c) kdy je chyba empirického vzorce oproti realitě pouze 34%.

Pro zlepšení přesnosti odhadu mechanických ztrát by bylo lepší volit činitel  $K_T$  4 pro stroje s  $D$  menším jak 0,25m pro  $2p \geq 4$  a 3 pro  $2p=2$ . Nejblíže realitě je vzorec d) u tohoto vztahu je odchylka pouze 12%, pakliže uvažujeme pouze rotor stroje. Vzhledem k podobnosti s vzorcem c) je opět potřeba změnit koeficient. Měření bylo opakováno pro větší stroj o výkonu 15kW( $2p=2$ ) a menší 3kW( $2p=4$ ), výsledky dané předpoklady potvrdili. Pro větší vyšší výpovědní schopnost upraveného empirického vztahu by bylo potřeba zahrnout širší škálu výkonů s různými počty pólů stroje.

#### IV. ZÁVĚR

V článku bylo popsáno měření mechanických ztrát asynchronního motoru a výsledky porovnány s empirickým výpočtem. Měření ukázalo na nepřesnost empirických vzorců. Bylo porovnáváno několik přístupů od různých autorů. Výsledky měření byly sumarizovány do tabulky a vyhodnoceny. Na základě těchto výsledků bylo doporučeno upravit koeficienty u empirických vztahů. Konkrétně u vztahu c) a d). V článku nebylo zmíněno porovnání změřených a vypočtených výsledků s výsledky simulací. U dvou typově stejných motorů, vyšly mechanické ztráty na ventilátoru a rotoru velice obdobně a tak lze předpokládat výsledek měření za správný.

#### PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2017-008 a projektu SGS-2015-038.

#### LITERATURA

- [1] BARTOS, Václav, CERVENY, Josef, HRUSKA, Josef, KOTLANOVA, Anna SKALA, Bohumil: Elektrické stroje /1. vyd.. Pilsen : 2006. ISBN 80-7043-444-9
- [2] BARTOS, Václav, SKALA Bohumil: Měření na elektrických strojích /1. vyd.. V Plzni : 2006. ISBN 80-7043-444-9
- [3] KOPYLOV, I. P. et al.: "Stavba elektrických strojů. 1. ", Prague: SNTL, 1988. 688 p. ISBN 04-532-88
- [4] BARTOS V. et al.: "Teorie elektrických strojů", 1. ed. Pilsen: University of West Bohemia, 2006. 230 p. ISBN 80-7043-509-7
- [5] CERVENY, J.: "Postup při elektromagnetickém návrhu synchronního stroje", Pilsen: University of West Bohemia, 2010
- [6] PETROV, G.N.: Elektrické stroje I. Prague:, 1980. ISBN 5143-21-045-80