

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za elektrotehniko

Andrej Potočnik

MEHANSKE IZGUBE V UNIVERZALNEM KOLEKTORSKEM MOTORJU

Diplomsko delo

Mentor: prof. dr. Danjel Vončina

Ljubljana, 2014

Zahvala

Zahvalil bi se rad mentorju prof. dr. Danjelu Vončini za mentorstvo in strokovne nasvete pri izdelavi zaključnega dela.

Zahvalil bi se rad tudi podjetju DOMEL d.d. za možnost sodelovanja pri meritvah, ter še posebej dr. Borisu Benedičiču za usmerjanje in nasvete.

Za moralno in finančno podporo tekom študija se zahvaljujem moji družini ter Maji.

Vsebina

1. UVOD	5
2. PREDSTAVITEV SESALNE ENOTE	6
3. IZGUBE V UNIVERZALNEM MOTORJU	9
3.1. Izgube v navitju	9
3.2. Izgube v železu	10
3.3. Mehanske izgube	11
3.3.1. Izgube v ležajih	11
3.3.2. Izgube zaradi ventilacije	12
3.3.3. Izgube zaradi trenja ščetk	14
3.4. Porazdelitev izgub v stroju	15
4. MERILNA POSTAJA RATITOVEC	17
4.1. Krmiljenje merilne postaje	17
4.2. Zunanji pogon samostojnega turbinskega stroja	17
4.3. Meritev navora in vrtilne hitrosti pogonskega motorja	18
5. OPIS MERILNE METODE	19
6. ANALIZA REZULTATOV	21
6.1. Porazdelitev mehanskih izgub serijske sesalne enote	21
6.2. Vpliv zračne reže na velikost izgub	22
6.3. Vpliv vrste ščetk na velikost izgub	23
6.4. Razlike v izgubni moči pri uporabi različnih vzmeti	25
6.5. Razlika v velikosti izgub med vstavljenim statorjem in brez njega	27
6.6. Razlike v velikosti izgub med različnimi ščetkami s tokom skozi rotor	27
6.7. Razlika v izgubah med tokom skozi rotor in brez njega	30
6.8. Idealni rotor	31
7. ANALIZA REZULTATOV	33

Seznam slik

Slika 1: Suha sesalna enota 463.3.270 [15]	6
Slika 2: Karakteristika sesalne enote 463.3.270-16	7
Slika 3: Shema rotorja.	12
Slika 4: Sile, ki delujejo na ščetko	15
Slika 5: Vpetje merjenega motorja.	18
Slika 6: Termočlen na ohišju ščetke.	19
Slika 7: Idealni rotor.	32

Seznam tabel

Tabela 1: Izmerjena karakteristika enote 463.3.270-16	7
Tabela 2: Porazdelitev izgub	16
Tabela 3: Porazdelitev izgub pri vrtilni hitrosti 30000 in 45000 min ⁻¹	22
Tabela 4: Vzmeti ščetk.	25
Tabela 5: Izgube pri različnih vrtilnih hitrostih, z različnimi vzmetmi.....	26

Seznam uporabljenih simbolov

Veličina / oznaka	Enota
moč	W
električni tok	A
upornost	Ω
vrtljna hitrost	min^{-1}
navor	Nm
izkoristek	$\%$
površina utora	S
specifična upornost	ρ
dolžina	l
masa	m
frekvenca	f
sila	F
premer	D
viskoznost	μ
polmer	r
temperatura	$^{\circ}C$
električna napetost	V
čas	t

Povzetek

Izgube predstavljajo velik problem na vseh področjih, tudi pri razvoju elektromotorjev. Vedno želimo imeti boljši izkoristek, zato je zmanjševanje izgub postala ena izmed glavnih nalog konstruktorjev električnih motorjev.

V diplomskem delu so predstavljene izgube v univerzalnem komutatorskem motorju, ki je pogonski del suhe sesalne enote, s poudarkom na meritvah mehanskih izgub. Predstavljen je način meritev, razčlenitev izgub po vzroku nastanka ter njihova analiza. To predstavlja osnovo, na katero se lahko opremo pri načrtovanju motorja z višjim izkoristkom.

Ključne besede: univerzalni motor, izgube, izkoristek, mehanske izgube

Abstract

Losses represent a major problem in all areas, including the development of electric motors. Customers always want to have electric motors with better efficiency, therefore reducing losses has become one of the main tasks of motor designers.

This thesis presents losses in the universal commutator motor which is used for dry suction vacuum cleaners, with an emphasis on the measurement of mechanical losses. Methods for determination of mechanical losses are presented and analysed. Laboratory measurement were provided to evaluate mechanical losses. On this basis a new design of motors with higher efficiency can be made.

Keywords: universal motor, losses, efficiency, mechanical losses

1. UVOD

Električni motorji pretvarjajo električno energijo v mehansko z interakcijo magnetnega polja in električnega toka v navitju.

Pomemben atribut električnih motorjev je njihov izkoristek, ki je definiran kot razmerje med oddano mehansko močjo na gredi in električno močjo, ki iz vira priteka v motor.

Izkoristek motorja je določen z notranjimi izgubami in se lahko poveča samo s spremembami v dizajnu motorja. Notranje izgube delimo na dva dela: fiksne izgube – neodvisne od bremena, ter variabilne izgube – odvisne od bremena.

Fiksne izgube sestavljajo izgube v železnem jedru, izgube zaradi trenja in izgube zaradi ventilacije. Izgube v železnem jedru dalje delimo na izgube zaradi histerezne zanke, ter izgube zaradi vrtničnih tokov. Spreminjajo se z materialom, iz katerega je jedro sestavljeno, z geometrijo motorja ter vhodno napetostjo. Izgube zaradi trenja in ventilacije povzročajo trenje ležajev, trenje ščetk ob komutator ter aerodinamične izgube, ki so povezane z ventilatorjem ter ostalimi vrtečimi se deli.

Variabilne izgube sestavljajo izgube v navitjih rotorja in statorja. V navitjih stroja se sprošča toplota, ki je odvisna od upornosti materiala in kvadrata električnega toka $P = I^2 R$.

V diplomski nalogi sem se posvetil predvsem mehanskim izgubam, saj jih za razliko od izgub v železnem jedru ter navitju rotorja in statorja ne moremo enostavno izračunati. Zanimala nas je njihova razporeditev ter možnosti za njihovo zmanjšanje.

Na začetku sem se posvetili izgubam na splošno, teoretičnemu opisu, vzrokom njihovega nastanka, njihovi razporeditvi ter posledicam le teh.

Kasneje smo na merilni napravi »Ratitovec« pomerili mehanske izgube v različnih pogojih. Rezultate sem prikazal s pomočjo grafov in tabel ter jih analiziral.

Cilj diplomske naloge je:

- ugotoviti porazdelitev mehanskih izgub v univerzalnem komutatorskem motorju,
- ugotoviti kako različni dejavniki vplivajo na njihovo velikost in
- ugotoviti ali obstajajo realne možnosti za njihovo zmanjšanje.

2. PREDSTAVITEV SESALNE ENOTE

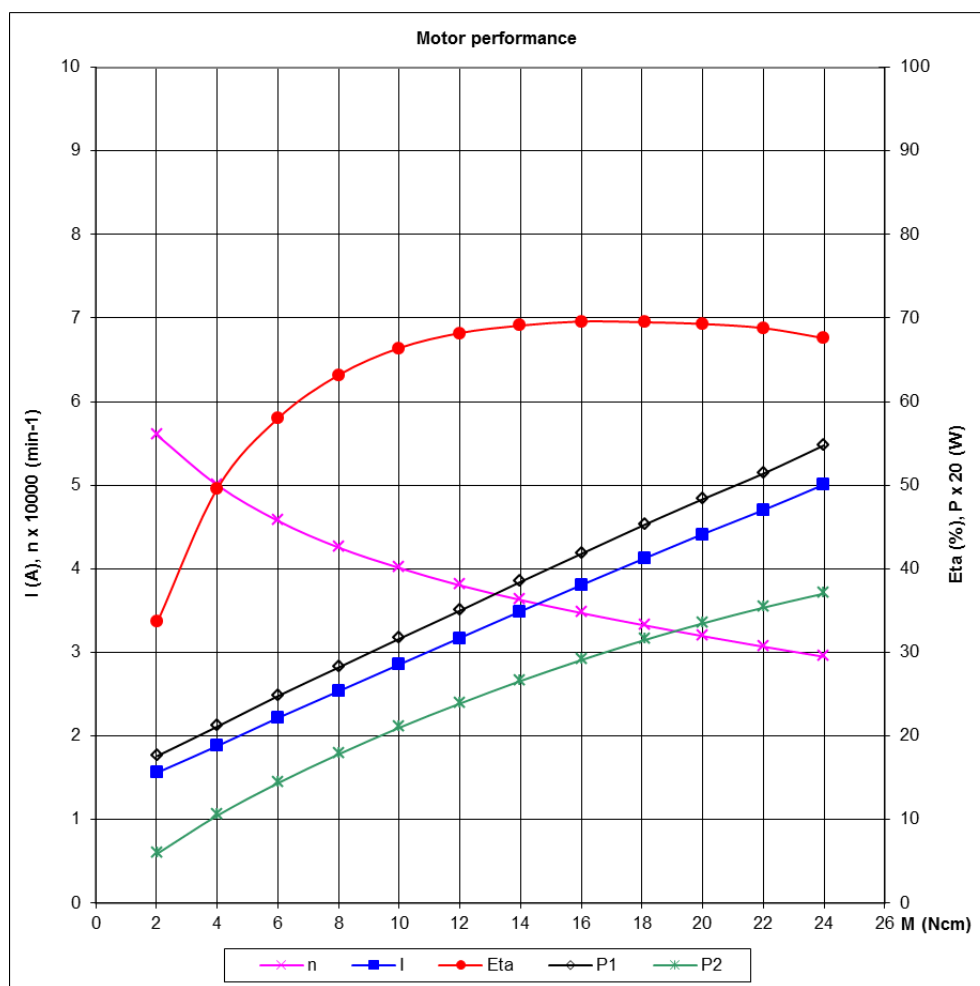
Mehanske izgube sem meril na sesalni enoti proizvajalca Domel d.d., z interno oznako 463.3.270. To so motorji za suho sesanje z visokim izkoristkom, moči 700 W pri napetosti 230 V s frekvenco 50 Hz. Te enote so primerne za vgradnjo v suhe sesalnike in so sestavljene iz univerzalnega komutatorskega motorja in ventilatorja. Rotor je podprt z dvema krogličnima ležajema, ker omogoča navpično ali vodoravno namestitev motorja. Prednosti vakuumskih motorjev s pretokom zraka so kompaktna oblika, zanesljivost in visoka učinkovitost. Uporablja se jih lahko za vse vrste sesalnih sistemov, kot so na primer vse vrste suhih gospodinjskih sesalnikov, industrijski sesalniki, razporejanje pošte (po ceveh), zobozdravstvena oprema, vpihavanje peletov in še v mnogo drugih aplikacijah.



Slika 1: Suha sesalna enota 463.3.270 [15]

Tabela 1: Izmerjena karakteristika enote 463.3.270-16

DOMEL [®]		MOTOR PERFORMANCE		14-feb-2013	
Code	: 463.3.270-16	Working order number	:	352336	
Voltage	: 226/50	Request number	:	00820113	
Motor no.	: 1	Direction of rotation	:	CW	
Comment	: measured with 4WB2.7				
I (A)	P1 (W)	M (Ncm)	n (min ⁻¹)	P2 (W)	Eta (%)
1,564	352,57	2,03	55940	118,92	33,70
1,880	422,41	4,00	50017	209,46	49,60
2,216	495,58	6,00	45742	287,31	58,00
2,537	564,32	8,01	42536	356,62	63,20
2,854	632,30	9,99	40123	419,58	66,40
3,171	699,29	11,98	38039	477,22	68,20
3,486	767,55	13,96	36305	530,74	69,10
3,806	835,90	16,00	34717	581,69	69,60
4,127	905,67	18,09	33237	629,64	69,50
4,413	966,27	19,99	31967	669,18	69,30
4,705	1028,22	22,01	30687	707,30	68,80
5,006	1094,97	23,98	29492	740,60	67,60



Slika 2: Karakteristika sesalne enote 463.3.270-16

V tabeli 1 in na sliki 2 je izmerjena karakteristika motorja brez turbokolesa v območju med 30000 in 55000 min⁻¹. Vidimo, da ima enota najvišji izkoristek 69,50 % pri 31967 min⁻¹, nato pa izkoristek s povečevanjem vrtilne hitrosti začne upadati in znaša 49,60 % pri 50017 min⁻¹. To pa pomeni, da se izgube povečujejo z naraščanjem vrtilne hitrosti.

3. IZGUBE V UNIVERZALNEM MOTORJU

Izgube v univerzalnem motorju delimo na izgube v železnem jedru, izgube v navitjih ter mehanske izgube. Izgube v železnem jedru zajemajo izgube zaradi histerezne zanke in vrtilnih tokov, predvsem v rotorskem jedru in v nasičenih delih statorja. Izgube v bakru so posledica joulskih izgub v navitjih statorja in rotorja. Ti dve vrsti izgub lahko zmanjšamo z optimizacijo geometrije rotorja in statorja. Mehanske izgube so prav tako odvisne od geometrije motorja, ki vpliva predvsem na izgube zaradi ventilacije, ter od vgrajenih sestavnih delov. Na mehanske izgube vpliva izbira ležajev, ščetk in vzmeti ščetk.

3.1. Izgube v navitju

Izgube v navitju rotorja in statorja v enem utoru računamo po enačbi:

$$P_{CuUtor} = I^2 \cdot R = J^2 \cdot A \cdot \rho \cdot l_{ovoj} \quad [18] \quad (3.1)$$

$$J = \frac{I \cdot N}{A} \quad (3.2)$$

J gostota električnega toka

I električni tok

N število ovojev

A površina utora

ρ specifična upornost bakra

l_{ovoj} dolžina ovoja navitja

Skupne izgube v navitju motorja so tako:

$$P_{Cu} = \sum_{n=0}^N P_{CuUtor,i} \quad [18] \quad (3.3)$$

3.2. Izgube v železu

Zaradi nelinearnih magnetnih karakteristik je izračun izgub v železnem jedru manj natančen. Izgube v železnem jedru delimo na dva dela: izgube zaradi histerezne zanke in izgube zaradi vrtničnih tokov. Za izračun izgub zaradi histerezne zanke je uporabljena empirična Steinmetzova enačba.

$$P_h = k_h \cdot B^n \cdot f \cdot m \quad [18] \quad (3.4)$$

k_hspecifične histerezne izgube

Bmaksimalna gostota magnetnega pretoka

ffrekvenca

m masa

n eksponent med 1,6 in 2,0 (odvisen od materiala)

Izgube zaradi vrtničnih tokov izračunamo po enačbi:

$$P_v = k_v \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot m \quad [18] \quad (3.5)$$

k_e histerezna konstanta materiala pri 50 Hz

Frekvenca gostote magnetnega pretoka v statorju je 50 Hz (frekvenca napajalne napetosti), medtem ko je frekvenca v rotorju mnogo višja, ker je odvisna od hitrosti vrtenja motorja. Če se motor vrti s hitrostjo 50000 min⁻¹, je glavna rotorska frekvenca toka 833 Hz. Ker so vrtnične izgube odvisne od kvadrata frekvence, histerezne izgube pa naraščajo linearno s frekvenco, večino izgub v rotorskem jedru povzročijo vrtnični tokovi. Ker so vrtnične izgube odvisne od kvadrata gostote magnetnega pretoka in če histerezne izgube v rotorju zanemarimo, lahko izgube v železnem jedru rotorja izračunamo po enačbi (3.5). Za izračun izgub v železnem jedru statorja pa izgube zaradi vrtničnih tokov in histerezne izgube seštejemo. Izgube v železnem jedru statorja so približno petkrat manjše od izgub v železnem jedru rotorja. Skupne izgube v železnem jedru motorja tako lahko izračunamo po enačbi:

$$P_{Fe} = k_e \cdot B^2 \cdot f_{rot}^2 \cdot m_{rot} + k_e \cdot B^2 \cdot f_{stat}^2 \cdot m_{stat} + k_e \cdot B^2 \cdot f_{stat} \cdot m_{stat} \quad [18] \quad (3.6)$$

3.3. Mehanske izgube

Ko se motor vrti, se pojavi trenje, ki ga mora stroj premagati. Za premagovanje tega trenja potrebuje neko energijo, kar se pokaže na dodatnem segrevanju. Mehanske izgube so odvisne od hitrosti vrtenja stroja in so neodvisne od bremena. Za neko podano hitrost so praktično konstante. Delimo jih na:

- izgube v ležajih,
- izgube zaradi ventilacije in
- izgube zaradi trenja ščetk.

3.3.1. Izgube v ležajih

V osnovi obstaja sedem različnih virov izgub v ležajih. To so izgube, ki se v ležajih pojavijo v normalnih obratovalnih pogojih. Vzroki teh izgub so:

- elastična histereza pri vrtenju,
- drsenje zaradi deformacije kontaktnih elementov in/ali geometrije ležaja,
- vrtenje kroglic,
- žiroskopsko tečajno gibanje kroglic,
- drsenje med kletko in kroglicami ali med kletko in ležajnimi obroči,
- viskozno trenje zaradi gibanja maziva in
- trenje tesnila.

Tukaj niso zajete izgube, ki se pojavljajo med prehodnimi pojavi. Prve štiri vrste izgub so odvisne predvsem od sil, ki delujejo na ležaj. Ker deformirajo kontaktno površino in ležajne kroglice, povzročajo trenje. Te izgube s skupnim imenom poimenujemo »kotalno trenje«. Izraz »drsno trenje« pa uporabljamo za poimenovanje izgub, ki jih povzroča kletka in se jih pogosto zanemarja. Te izgube so odvisne predvsem od geometrije in mase kletke. Dobro mazivo je bistvenega pomena za zmanjševanje izgub, ker vpliva tudi na kotalno trenje. Zadnja vrsta izgub nastane zaradi tesnil in je odvisna predvsem od hitrosti vrtenja ležaja. Ker pa izračun vseh teh izgub zahteva veliko časa ter uporabo kompleksnih formul, lahko za hitrejši izračun uporabimo enačbo (3.7).

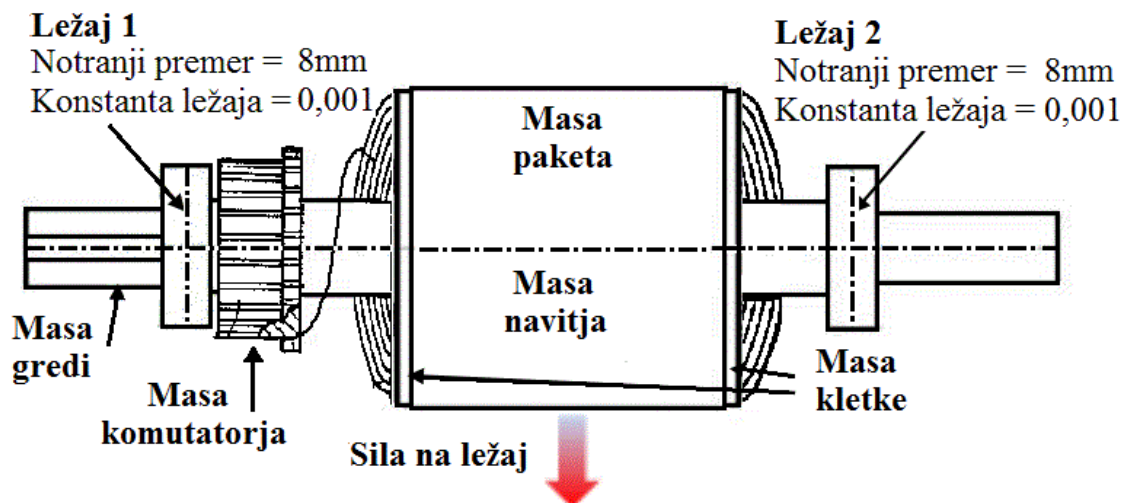
$$W_b = 0,5 \cdot \omega \cdot \mu \cdot F \cdot D_b \text{ [8]} \quad (3.7)$$

ω mehanska hitrost rotorja

μ konstanta trenja ležaja (0,001 - 0,005)

F sila, ki deluje na ležaj

D_bnotranji premer ležaja



Slika 3: Shema rotorja.

Na sliki 3 je prikazana zgradba rotorja z označenimi mehanskimi deli, ki povzročajo izgube. Masa je izračunana glede na volumen in gostoto različnih uporabljenih materialov. Trenje se pojavi v obeh ležajih. Sila, ki deluje na ležaja, se lahko izračuna iz mase rotorja po enačbi (3.8):

$$F = m \cdot g \text{ [8]} \quad (3.8)$$

Kjer je m masa rotorja, g pa gravitacijski pospešek ($9,81 \text{ m/s}^2$)

3.3.2. Izgube zaradi ventilacije

Izgube ventilacije so povezane s premagovanjem trenja med gibljivimi deli stroja in zrakom znotraj motorja za namene hlajenja. To so toplotne izgube, ki nastanejo zaradi gibanja zraka med rotorjem in statorjem. Izgube ventilacije so odvisne od obratovalnih pogojev, in so večje

v motorjih z višjo vrtilno hitrostjo, kar zmanjša izkoristek motorja. Izgube ventilacije so funkcija vrtilne hitrosti gredi in lastnosti zraka, kot je temperatura, pritisk, gostota in dvig temperature pri stenah statorja in rotorja. Izgube zaradi ventilacije, ki nastanejo v reži med rotorjem in statorjem s homogenim laminarnim tokom (brez aksialnega toka), lahko izračunamo iz naslednjih enačb (3.9, 3.10, 3.11, 3.12)

Izgube ventilacije:

$$W = C_d \cdot \pi \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot r^4 \cdot \lambda \quad [13] \quad (3.9)$$

C_dkoeficient trenja za turbulentni tok

ρgostota zraka [kg/m^3]

rradij rotorja [m]

λdolžina rotorja [m]

Hitrost vrtenja gredi:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \quad [13] \quad (3.10)$$

nvrtilna hitrost rotorja [min^{-1}]

Reynoldsovo število:

$$\text{Re} = \omega \cdot r \cdot \frac{\rho}{\mu} \cdot \phi \quad [13] \quad (3.11)$$

μkinematska viskoznost hladilnega medija [m^2/s]

ϕreža med rotorjem in statorjem [m]

Reynoldsovo število je brezrazsežno število, s katerim v mehaniki tekočin označimo tok tekočin. Je kriterij podobnosti, s katerim lahko napovemo ali bo tok tekočine laminaren ali turbulenten. Za tok tekočine po ceveh se ocenjuje, da je laminaren pri $\text{Re} < 2300$ in turbulenten pri $\text{Re} > 2300$ [20].

Koeficient trenja za turbulentni tok:

$$\frac{1}{\sqrt{C_d}} = 2,04 + 1,768 \cdot \ln(\text{Re} \cdot \sqrt{C_d}) \quad [13] \quad (3.12)$$

Enačba 3.12 ne more biti izračunana eksplicitno za koeficient trenja kot funkcija Reynoldsovega števila, zato učinek Reynoldsovega števila na koeficient trenja ni očiten.

V primeru, ko hladilni medij potuje skozi rezo, se za določanje boljše ocene uporabi teoretična razmerja in testna potrjevanja, ki upoštevajo kombinacijo aksialnega in rotacijskega toka. Prav tako je treba upoštevati hrapavost zob na statorju ter izgube zaradi oblike rotorja.

3.3.3. Izgube zaradi trenja ščetk

Izgube zaradi trenja ščetk so odvisne od vrtilne hitrosti motorja, sile s katero ščetke pritiskajo na komutator, geometrije ščetke in od koeficienta trenja med ščetko in komutatorjem.

$$W = v_k \cdot k_t \cdot P \cdot g \quad (3.13)$$

Wizgube zaradi trenja ščetk

v_khitrost vrtenja komutatorja

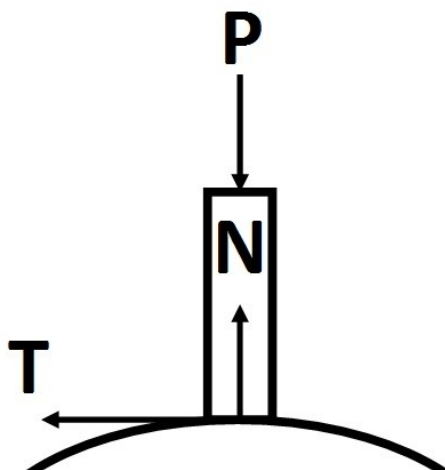
k_tkoeficient trenja

Psila ščetke na komutator (odvisna od geometrije ščetk in sile vzmeti)

ggravitacijski pospešek

Koeficient trenja k_t je odvisen od tangencialne sile zaradi trenja F_T in nasprotne sile F_N :

$$k_t = \frac{T}{N} \quad (3.14)$$



Slika 4: Sile, ki delujejo na ščetko.

Sila F_N ki jo ustvarja vzmet ščetke je manjša, če je ščetka nagnjena. Trenje nima stalne vrednosti. Odvisno je vrste ščetke, hitrosti, stanja komutatorja in od prostorskih pogojev. Tako torej ni mogoče podati točne vrednosti koeficienta k_t , podamo lahko le oceno, kar je dovolj za večino izračunov.

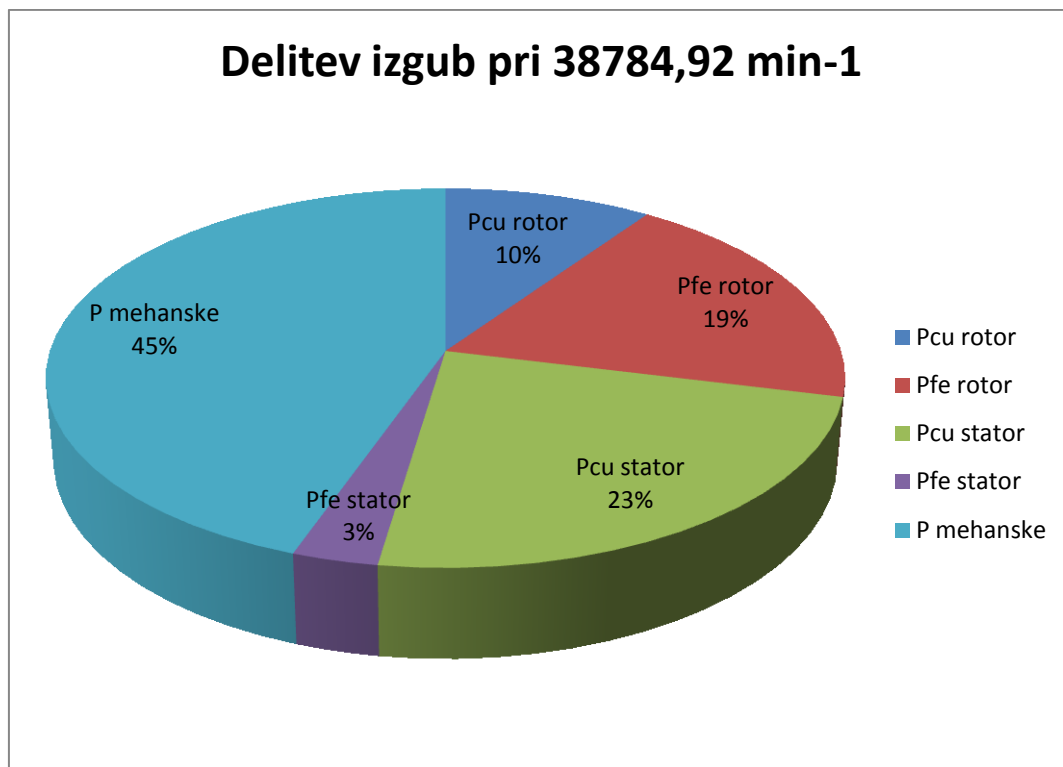
3.4. Porazdelitev izgub v stroju

V tabeli 2 in na grafu 1 je predstavljena porazdelitev izgub v sesalni enoti 463.3.207-16 na podlagi simulacij pri hitrosti vrtenja 38784 min^{-1} . Podatki so pridobljeni iz programa, ki so ga v podjetju Domel razvili za lastne potrebe. Ker je program prilagojen predvsem za izračun zračnih karakteristik sesalnih enot z različnimi turbinami, izračunani podatki lahko odstopajo od realnih. Iz dobljenih podatkov lahko razberemo količino izgub po vrsti nastanka, vendar moramo upoštevati možnost napak.

Mehanske izgube pri vrtilni hitrosti $38784,83 \text{ min}^{-1}$ predstavljajo kar 45 % vseh izgub v motorju, z naraščanjem le te pa se ta delež še povečuje. To dokazuje, da mehanske izgube predstavljajo velik problem in bi njihovo zmanjšanje močno pripomoglo k dvigu izkoristka.

Tabela 2: Porazdelitev izgub

$n \text{ (min}^{-1}\text{)}$	$P_{\text{cu rotor}} / W$	$P_{\text{fe rotor}} / W$	$P_{\text{cu stator}} / W$	$P_{\text{fe stator}} / W$	P_{mehanske} / W
38784,92	22,55	44,89	54,94	7,14	104,24



Graf 1: Porazdelitev izgub

4. MERILNA POSTAJA RATITOVEC

Same meritve mehanskih izgub smo izvajali na merilni postaji »Ratitovec«. Postaja je bila razvita in izdelana v sodelovanju podjetij Domel d.d. in Turboinštitut d.d.. Postaja omogoča dva načina meritev, pri katerih je fluid okoliški zrak:

- meritev karakteristik sesalne enote kot celote in
- meritev karakteristik samostojnega turbinskega stroja z zunanjim pogonom.

Merilna postaja je sestavljena iz vstopne cevi, glavnega rezervoarja, ter sistema za nastavljanje pretoka z merilnimi zaslonkami. Na izstopu iz rezervoarja sta dva priključka za pritrditev sesalne enote. Spodnji priključek služi za merjenje karakteristik turbinskega stroja, zgornji pa za merjenje karakteristik celotne enote. Spodnji priključek je preko merilnika navora in vrtilne hitrosti povezan s pogonskim motorjem, ki se krmili s frekvenčnim pretvornikom. Za potrebe mojih meritev sem uporabil samo merilnik navora ter pogonski motor. Karakteristične veličine postaje so opisane v prilogi 1.

4.1. Krmiljenje merilne postaje

Krmiljenje merilne postaje vršimo iz kontrolnega mesta, ki je ločeno od preizkuševališča in omogoča stalni nadzor nad postajo. Preko namiznega računalnika ter lastnega programa zajemamo in obdelujemo merjene veličine iz vseh senzorjev ki so nameščeni na sami postaji. Program podatke iz senzorjev sproti shranjuje na trdi disk.

4.2. Zunanji pogon samostojnega turbinskega stroja

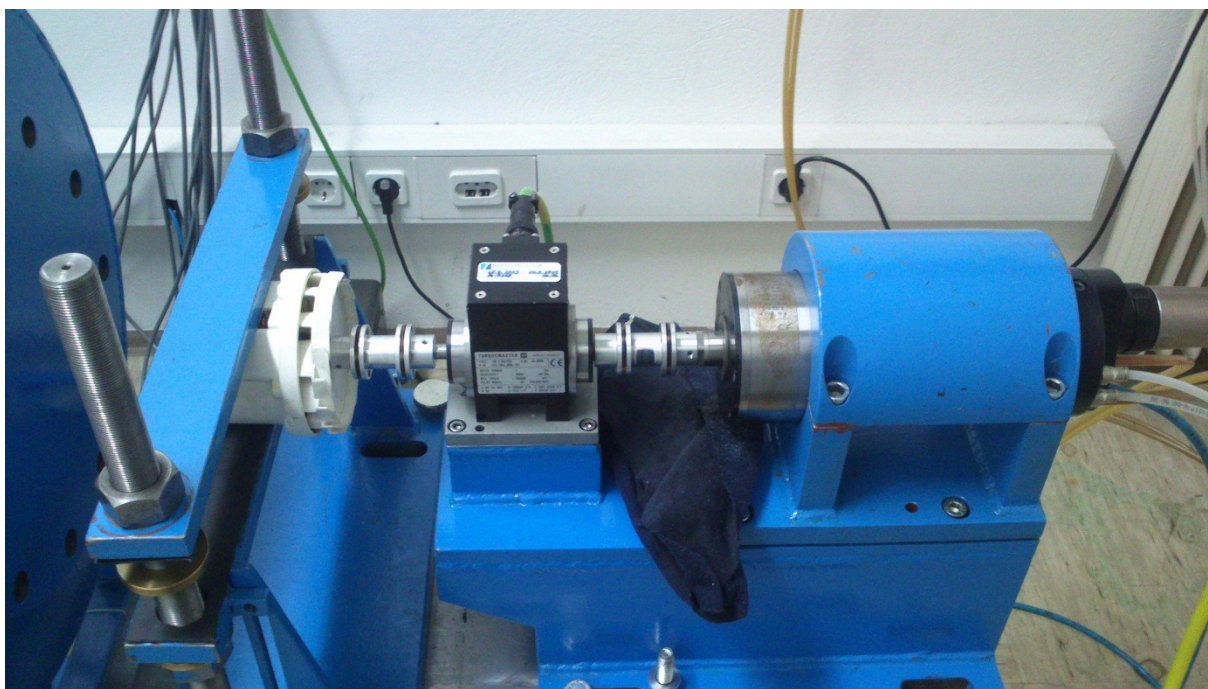
Za zunanji pogon je uporabljen je visokofrekvenčni motor HSX 100 – 60000/5, proizvajalca GMN Paul Muller Industrie. V pogon je integriran asinhronski motor s kratkostično kletko, z vgrajenim vodnim hlajenjem sprednjih ležajev in statorja. Motor je nameščen med dve skupini ležajev, ki so optimizirani za mazanje z oljno-zračno meglo. Pogon se krmili s spreminjanjem napetosti in frekvence preko frekvenčnega pretvornika REFU 316F-06. Vrtilna hitrost je funkcija nastavljene frekvence: $n = 60 \cdot f$. Frekvenčni pretvornik krmilimo

preko krmilne plošče, kjer lahko spreminjamo frekvenco napetosti in s tem nastavljamo vrtilno hitrost pogonskega motorja.

4.3. Meritev navora in vrtilne hitrosti pogonskega motorja

Na merilni postaji Ratitovec je uporabljen merilni pretvornik TORQUEMASTER TM204/HS proizvajalca Magtrol. Merilni pretvornik omogoča meritev dinamičnega in statičnega navora z informacijo o smeri delovanja, meritev vrtilne hitrosti in zaznavanje smeri vrtenja.

Merilnik deluje na principu napetostnega transformatorja, ki se mu spreminja sklopni faktor. TM204/SH ima merilni doseg navora do 1 Nm, maksimalna vrtilna hitrost gredi je 50000 min^{-1} (pogonski motor ima $n_{\text{max}} = 60000 \text{ min}^{-1}$), ter razred točnosti 0,1. Merilnik je napajan s +24 V, izhodni signal navora je od 0 V do $\pm 10 \text{ V}$. Vrtilna hitrost je podana kot zaporedje pravokotnih impulzov določene frekvence. Frekvenco tega signala merimo s števcem, ki se nahaja na merilni kartici. Primer vpetja enote na motor preko merilnika navora je prikazan na sliki 5.



Slika 5: Vpetje merjenega motorja.

5. OPIS MERILNE METODE

Meritve mehanskih izgub so bile izvedene na štirih različnih motorjih na merilni postaji Ratitovec. Ker je bila predhodno na teh motorjih že pomerjena karakteristika, sem najprej na vseh motorjih zamenjal ščetke z novimi, z oznako Hg25i, ter namestil nove vzmeti ščetk, ter tako zagotovil verodostojnost meritev. Nato sem motorje odnesel v merilni laboratorij, kjer so z utekavanjem motorjev poskrbeli, da so ščetke pravilno nalegale na komutator. Ker na motorjih ni bilo montiranih turbin, ki med drugimi skrbijo tudi za hlajenje motorja, je treba zaradi segrevanja motorja paziti na vrednost napajalne napetosti in čas priklopa. Utekavanje je tako trajalo 30 sekund pri 60 % nazivne napetosti. Zaradi segrevanja enote med meritvami sem na vodila ščetk namestil termočlene tipa J, ki so nam omogočili spremljanje temperature (slika 6).



Slika 6: Termočlen na ohišju ščetke.

Meritve so se izvajale v območju vrtilne hitrosti med 30000 min^{-1} in 50000 min^{-1} s korakom meritev 3000 min^{-1} , meritev pri vsakem koraku je trajala 90 sekund, z vzorčenjem vsako sekundo. Ker je bil merjen navor enote na spodnjem področju ločljivosti merilnika navora smo vsako meritev izvedli dvakrat, ter tako zagotovili verodostojnost meritev.

Pri vseh štirih motorjih smo pomerili mehanske izgube pri naslednjih pogojih:

- komplet motor (ščetke Hg25i, standardna vzmet) in
- motor z odklopljenimi ščetkami (meri se samo izgube zaradi trenja in ventilacije).

Pri enem od motorjev smo pomerili izgube še s ščetkami: X13Ag, X89 in X89Ag. Pri ščetkah X13Ag smo pomerili še izgube z različnimi silami vzmeti. Na tem motorju smo pomerili tudi navorno karakteristiko z odstranjenim statorjem, ter pri vzbujanju rotorskega tokokroga z enosmernim tokom 2 A.

Največjo težavo pri meritvah sta predstavljali uporaba merilnika navora na njegovi spodnji meji ločljivosti, ter merjenje pri zelo visokih vrtilnih hitrostih. Meritve smo izvedli v območju med 30000 min^{-1} in 48000 min^{-1} , s korakom med območji 30000 min^{-1} . Ker postanejo meritve nad 45000 min^{-1} zelo spremenljive, sem za analizo uporabili meritve v območju med 30000 min^{-1} in 45000 min^{-1} .

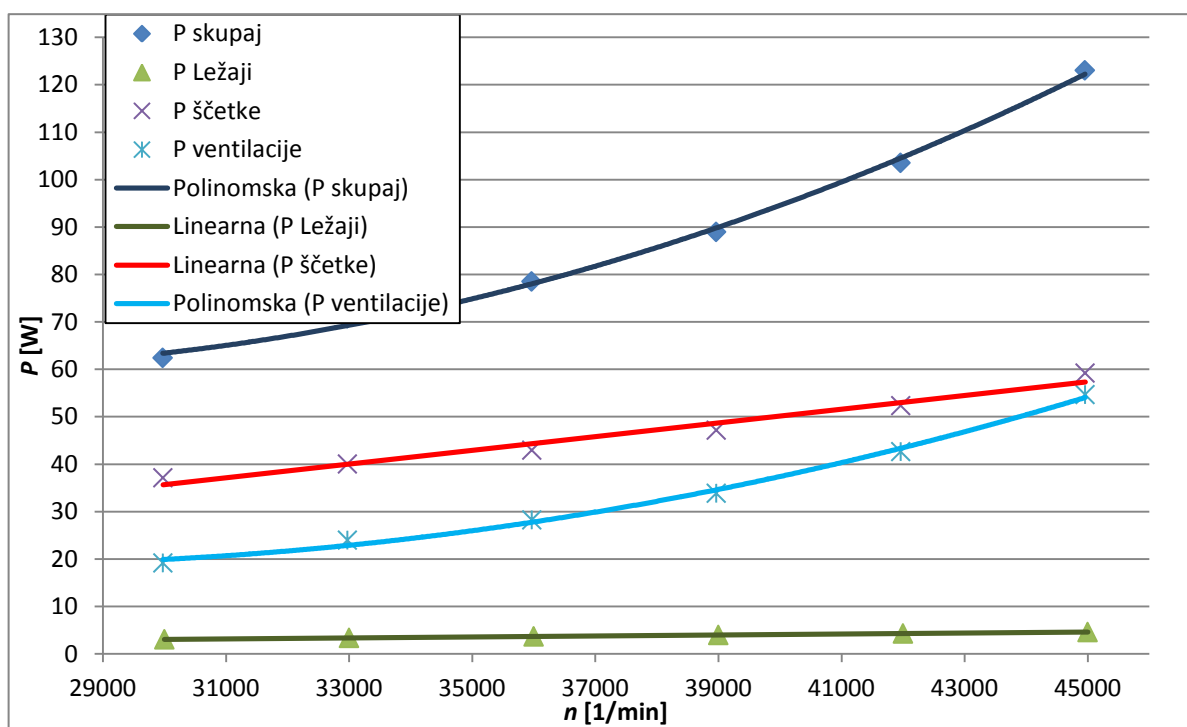
6. ANALIZA REZULTATOV

6.1. Porazdelitev mehanskih izgub serijske sesalne enote

Mehanske izgube razdelimo na tri dele:

- izgube ventilacije,
- izgube zaradi trenja ščetk in
- izgube zaradi trenja ležajev.

Na grafu 2 je prikazana porazdelitev mehanskih izgub v enoti 463.3.270-16 z zračno režo 0,4 mm in pločevino debeline 0,35 mm, izračunanih z enačbami iz poglavja 3. Vidimo, da izgube zaradi trenja ščetk in trenja ležajev naraščajo linearno, izgube ventilacije pa s kvadratom vrtilne hitrosti. Vidimo tudi, da preko celotnega merilnega območja vrtilne hitrosti, največji del izgub tvorijo izgube zaradi trenja ščetk.

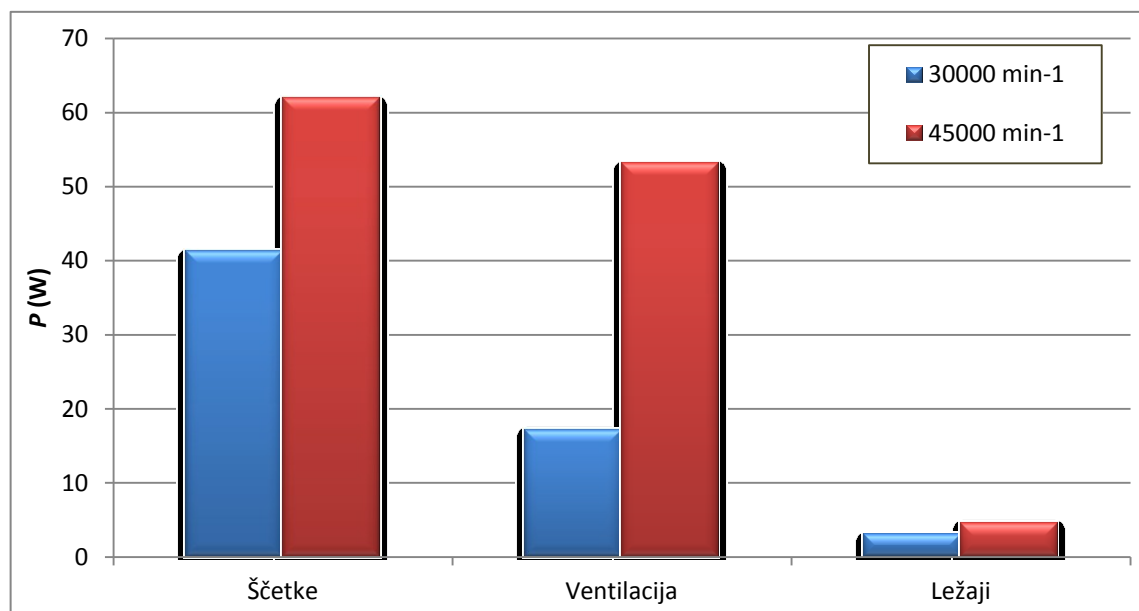


Graf 1: Izgube v odvisnosti od vrtilne hitrosti.

V tabeli 3 in na grafu 3 je prikazana porazdelitev mehanskih izgub enote po sklopih pri 30000 in 45000 min^{-1} . Vidimo, da do vrtilne hitrosti 45000 min^{-1} večino mehanskih izgub tvori trenje ščetk.

Tabela 3: Porazdelitev izgub pri vrtilni hitrosti 30000 in 45000 min⁻¹.

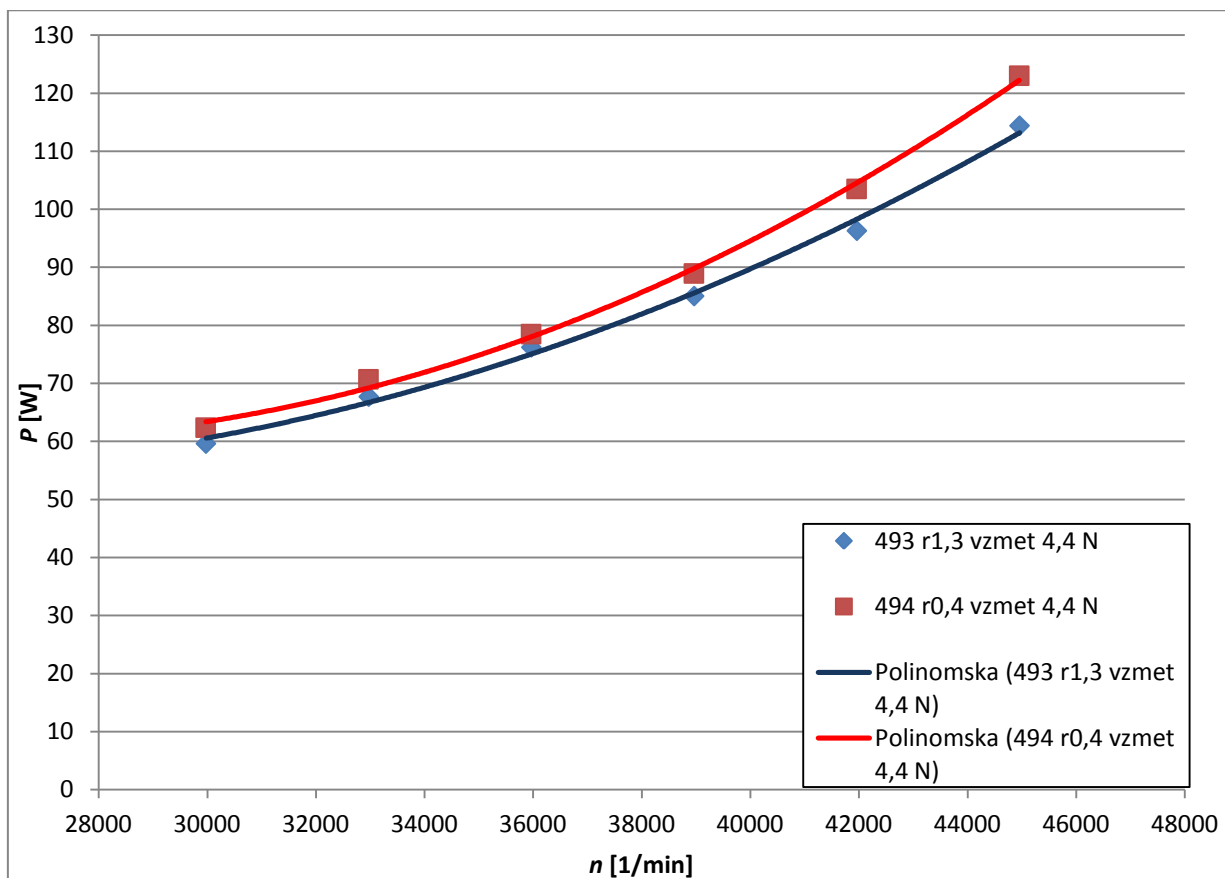
	30000 min ⁻¹	45000 min ⁻¹
Ščetke	41,28 W	61,92 W
Ventilacija	17,19 W	53,17 W
Ležaji	3,06 W	4,59 W



Graf 2: Porazdelitev mehanskih izgub pri vrtilni hitrosti 30000 in 45000 min⁻¹.

6.2. Vpliv zračne reže na velikost izgub

Testirane enote so imele različno zračno režo. Enota 463.3.270-12 ima zračno režo 1,3 mm, enota 463.3.270-16 pa zračno režo 0,4 mm. Razlika med enotama je tudi v debelini rotorskih in statorskih lamel, ki na mehanske izgube ne vplivajo. Na grafu 4 je prikazana primerjava mehanskih izgub zaradi različne zračne reže. Vidimo lahko, da so izgube v enoti z zračno režo 0,4 mm višje preko celotnega območja vrtilne hitrosti in s hitrostjo naraščajo. Tako so pri vrtilni hitrosti 30000 min⁻¹ izgube višje za 2,8 W, pri 45000 min⁻¹ pa že za 8,6 W. Gledano zgolj z mehanskega vidika, pri 800 W enotah ta razlika pomeni 1,07 % nižji izkoristek pri enotah z manjšo zračno režo.



Graf 3: Mehanske izgube pri motorjih z različno zračno režo.

Na grafu 4 predstavljajo oznake:

493 r1,3 vzmet 4,4: motor z zračno režo 1,3 mm, pri uporabi vzmeti s silo 4,4 N,

494 r0,4 vzmet 4,4: motor z zračno režo 0,4 mm, pri uporabi vzmeti s silo 4,4 N.

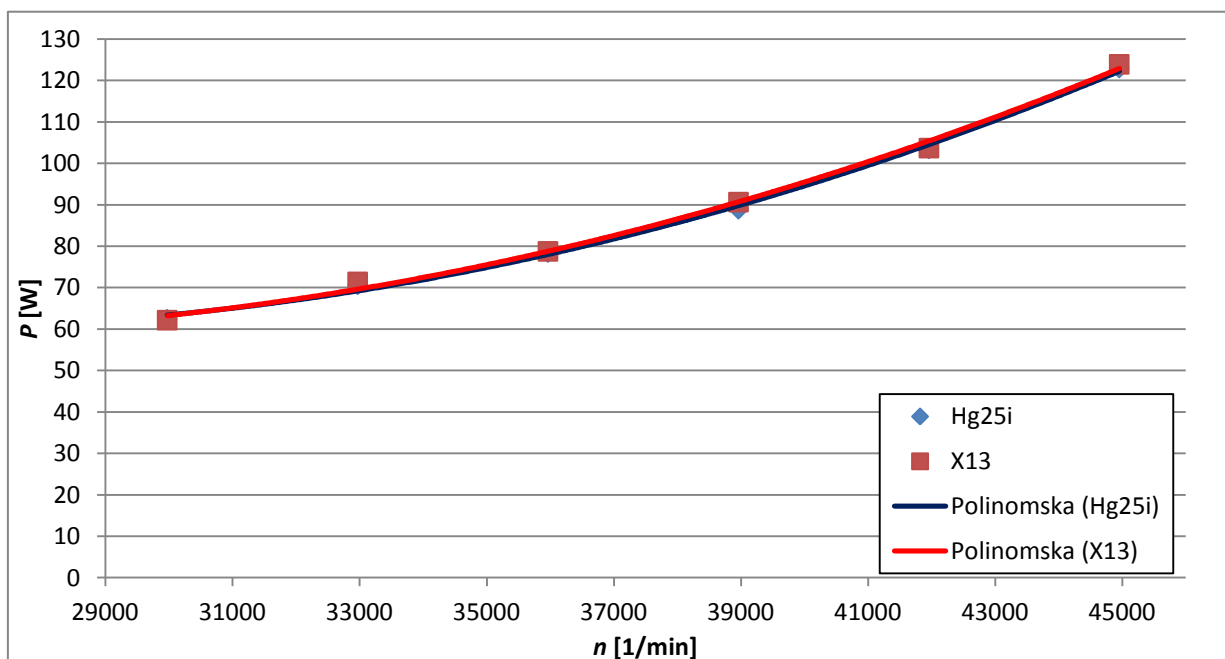
6.3. Vpliv vrste ščetk na velikost izgub

Vse nadaljnje meritve smo izvajali na enoti 463.3.270-16 z zračno režo 0,4 mm in pločevino debeline 0,35 mm.

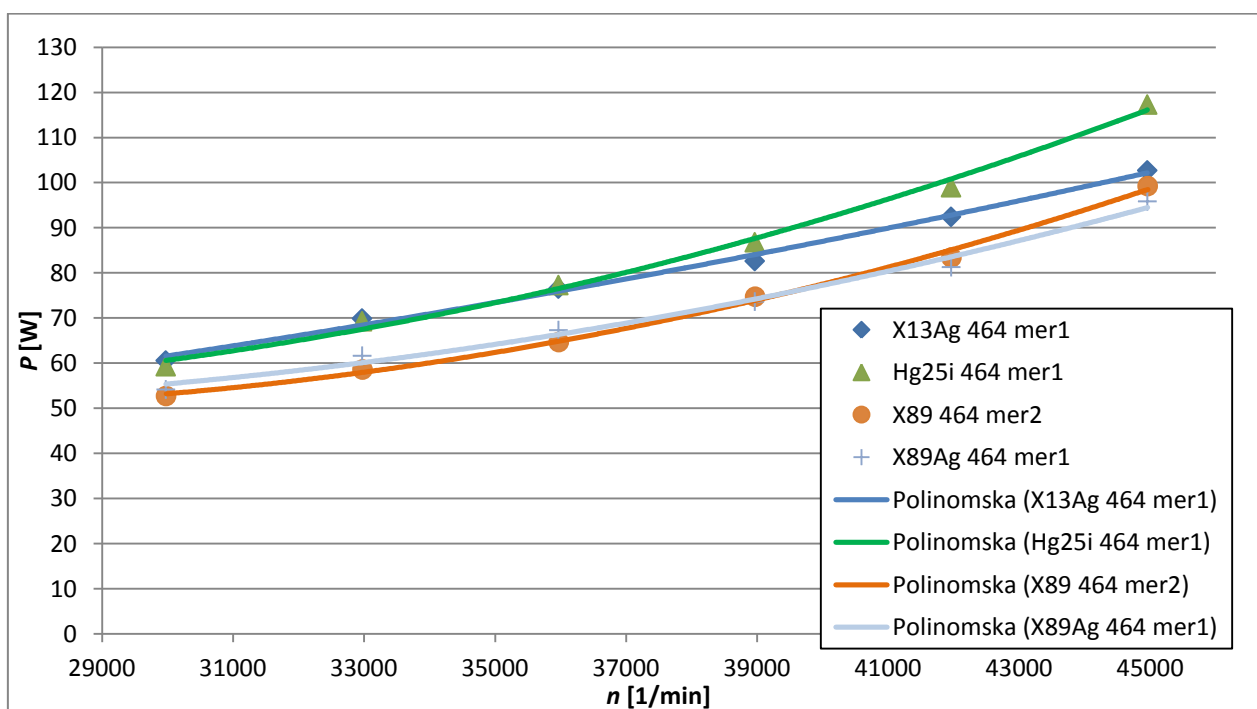
Na grafu 5 vidimo, da pri mehanskih izgubah ni razlik zaradi trenja med ščetko Hg25i in X13Ag pri uporabi vzmeti 463.1.261-2.

Na grafu 6 so prikazane razlike med ščetkami Hg25i, X13AG, X89 in X89Ag, z vzmetjo 464.1.261. Tu so mehanske izgube bolj odvisne od vrste ščetk. Najmanjše izgube so bile pri ščetki X89, sledijo jim ščetke X89Ag. Pri 30000 min^{-1} imata ščetki Hg25i in X13Ag za 5 W

večje izgube. Pri višjih vrtilnih hitrostih so mehanske izgube s ščetko X13Ag manjše, kot s ščetko Hg25i..



Graf 4: Mehanske izgube v motorju z različnimi ščetkami in z vzmetjo 463.1.261-2.



Graf 5: Mehanske izgube z različnimi ščetkami in z vzmetjo 464.1.261.

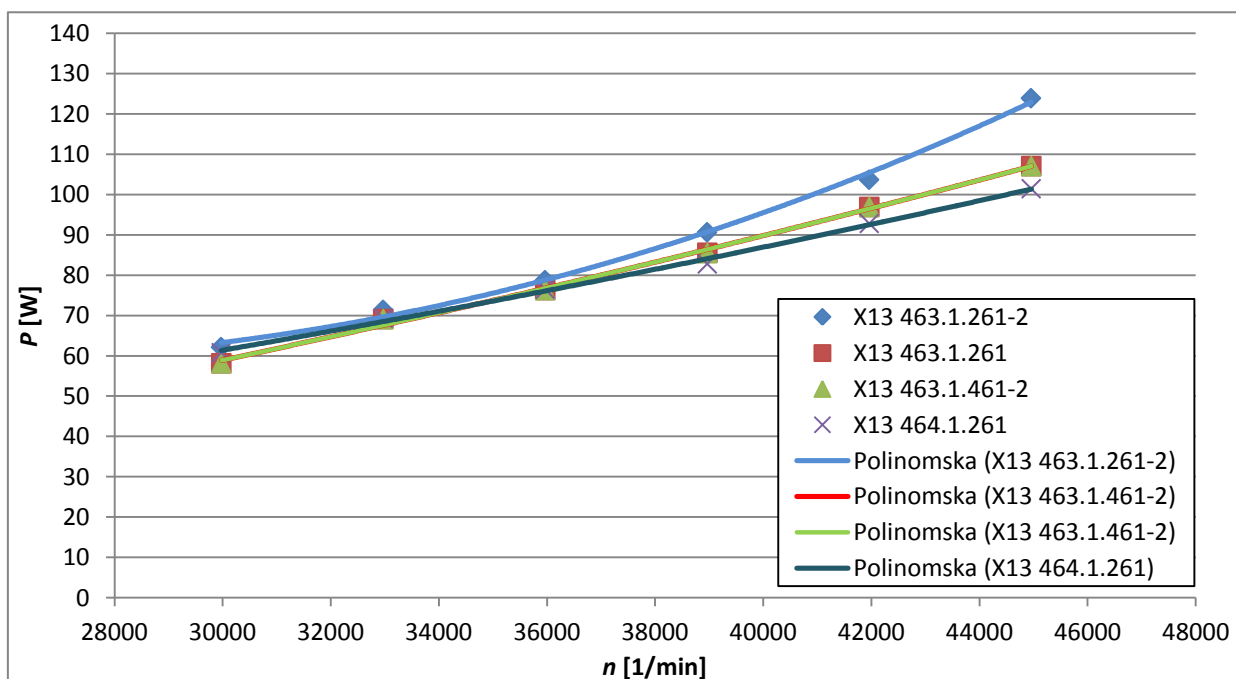
6.4. Razlike v izgubni moči pri uporabi različnih vzmeti

Sila, s katero vzmet pritiska ščetko na komutator, močno vpliva na mehanske izgube v motorju. Mehanske izgube se v motorju z uporabo vzmeti 263.2.261, ki je za 0,4 N šibkejša od standardne vzmeti za ta motor, pri 45000 min^{-1} zmanjšajo za približno 15 W. Z uporabo vzmeti 464.1.261, s silo 3,5 N, se izgube zaradi ščetk še dodatno zmanjšajo, vendar samo za 5 W.

Graf 7 kaže velikost mehanskih izgub glede na vzmet ščetke. Pri meritvah so bile uporabljene ščetke X13Ag, ter vzmeti iz tabele 4. Po pričakovanjih lahko vidimo, da so izgube višje pri uporabi močnejših vzmeti. Vidimo tudi, da se izgube povečujejo z naraščanjem vrtilne hitrosti.

Tabela 4: Vzmeti ščetk.

Vzmet	Sila	Opombe
463.1.261	4 N	
463.1.261-2	4,4 N	Standardna vzmet
463.1.461-2	4 N	
464.1.261	3,5 N	



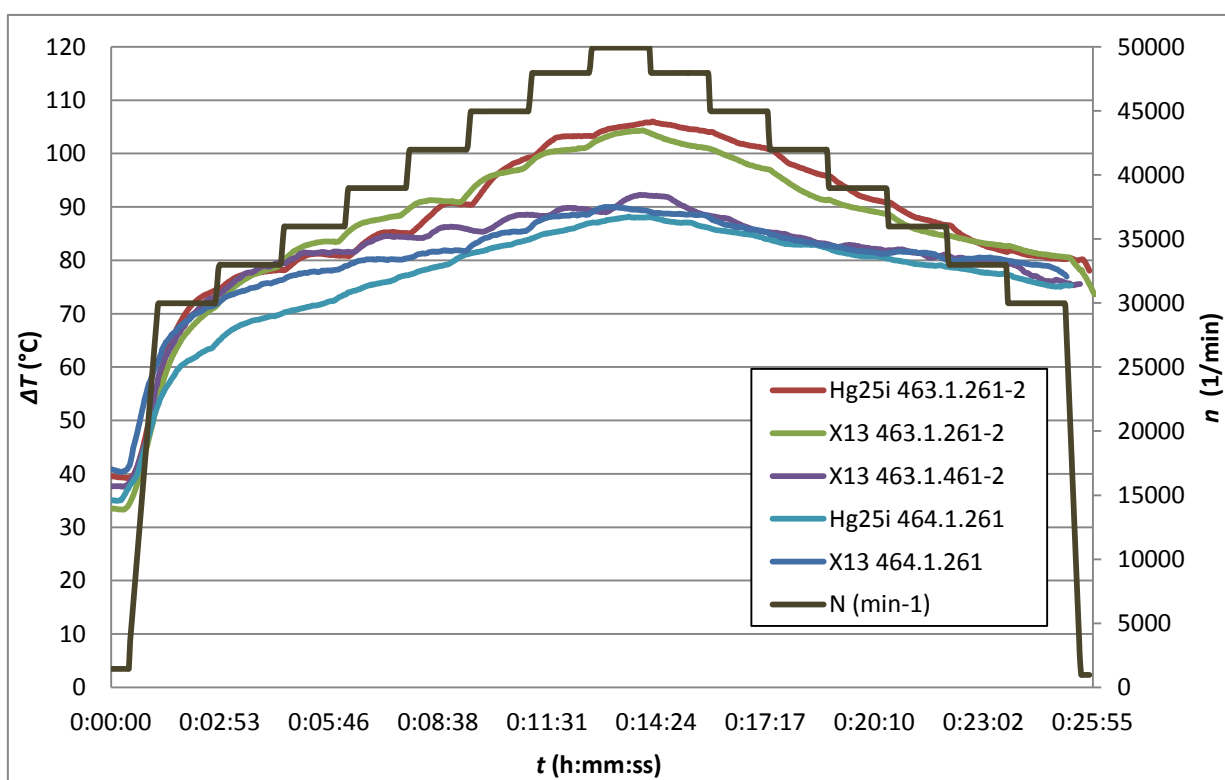
Graf 6: Mehanske izgube s ščetko X13, ter z različnimi vzmetmi ščetk (opis v tabeli 5).

Tabela 5: Izgube pri različnih vrtilnih hitrostih, z različnimi vzmetmi.

min^{-1} / vzmet	463.1.263-2	463.1.263	463.1.463-2	464.1.461
30000	62,18 W	58,18 W	58,18 W	60,81 W
39000	90,67 W	85,59 W	85,49 W	82,83 W
45000	123,93 W	107,07 W	107,07 W	101,48 W

Razlika med različnimi vrstami vzmeti se je pokazala tudi pri merjenju temperature na vodilih ščetk. Temperatura na vodilih ščetk je z menjavo standardne vzmeti (463.1.261-2) z drugo, ki je za 0,4 N šibkejša, pri vrtilni hitrosti 50000 min^{-1} padla s 105°C na 90°C, torej se je zmanjšala za približno 15°C. To je posledica manjšega trenja med ščetko in komutatorjem. Pri meritvah z vzmetjo 464.1.261 je bila temperatura le 2°C nižja od tiste pri vzmeti 463.1.261. Med ščetkami Hg25i in X13Ag pri doseženih temperaturah ni vidnih razlik.

Temperaturo sem meril na obeh vodilih ščetk. V grafu 8 je prikazana povprečna vrednost obeh izmerjenih temperatur.



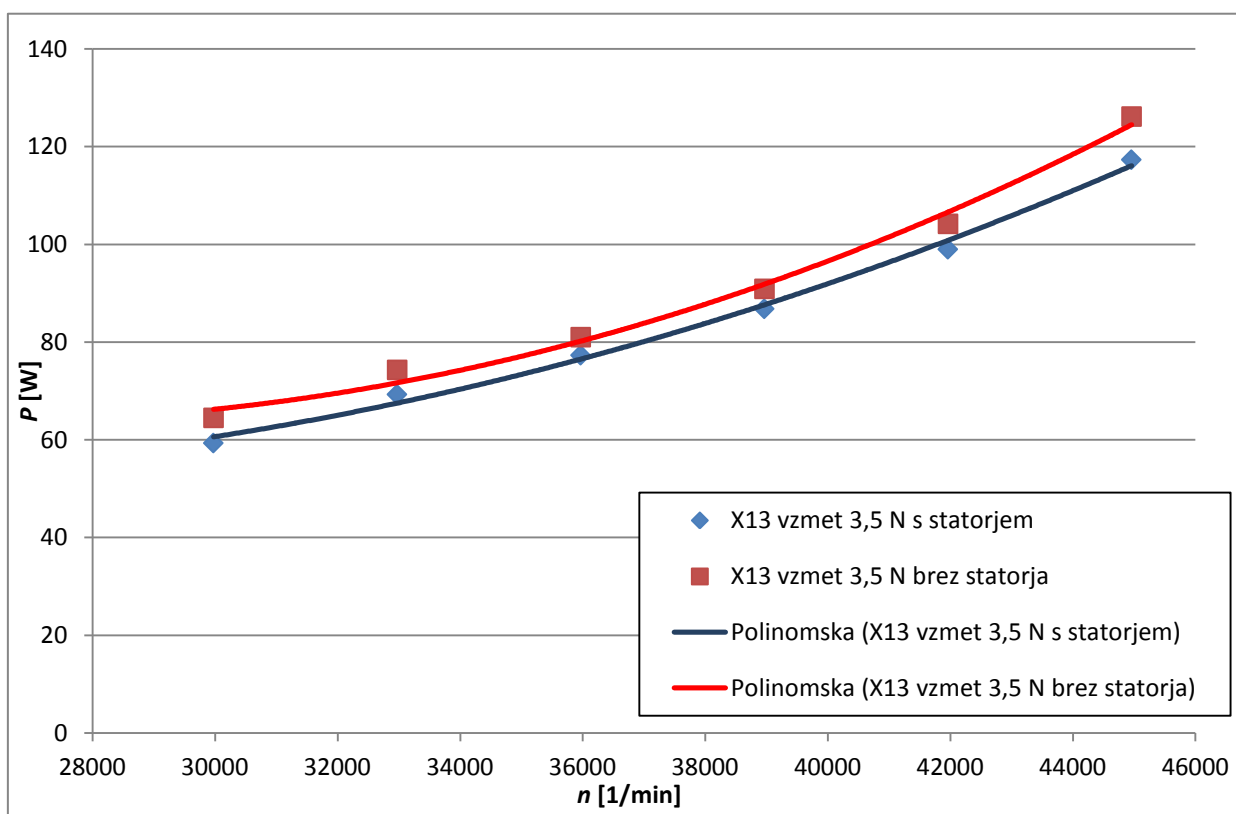
Graf 7: Spreminjanje temperature na vodilih ščetk s spreminjanjem hitrosti vrtenja.

6.5. Razlika v velikosti izgub med vstavljenim satorjem in brez njega

Na velikost izgub zaradi ventilacije vpliva notranja zgradba električnega motorja. Ker smo želeli izvesti kako tok zraka vpliva na izgube v sesalni enoti smo izvedli dve različni meritvi:

- z vstavljenim satorjem v sesalni enoti in
- brez vstavljenega satorja v sesalni enoti.

Na grafu 9 vidimo, da razlika v izmerjenih mehanskih izgubah med motorjem z vstavljenim satorjem in brez njega znaša približno 5 W preko celotnega območja vrtilne hitrosti. Skupne mehanske izgube v motorju brez satorja se zaradi upora zraka povečajo.



Graf 8: Primerjava izgub motorja z vstavljenim satorjem in brez njega.

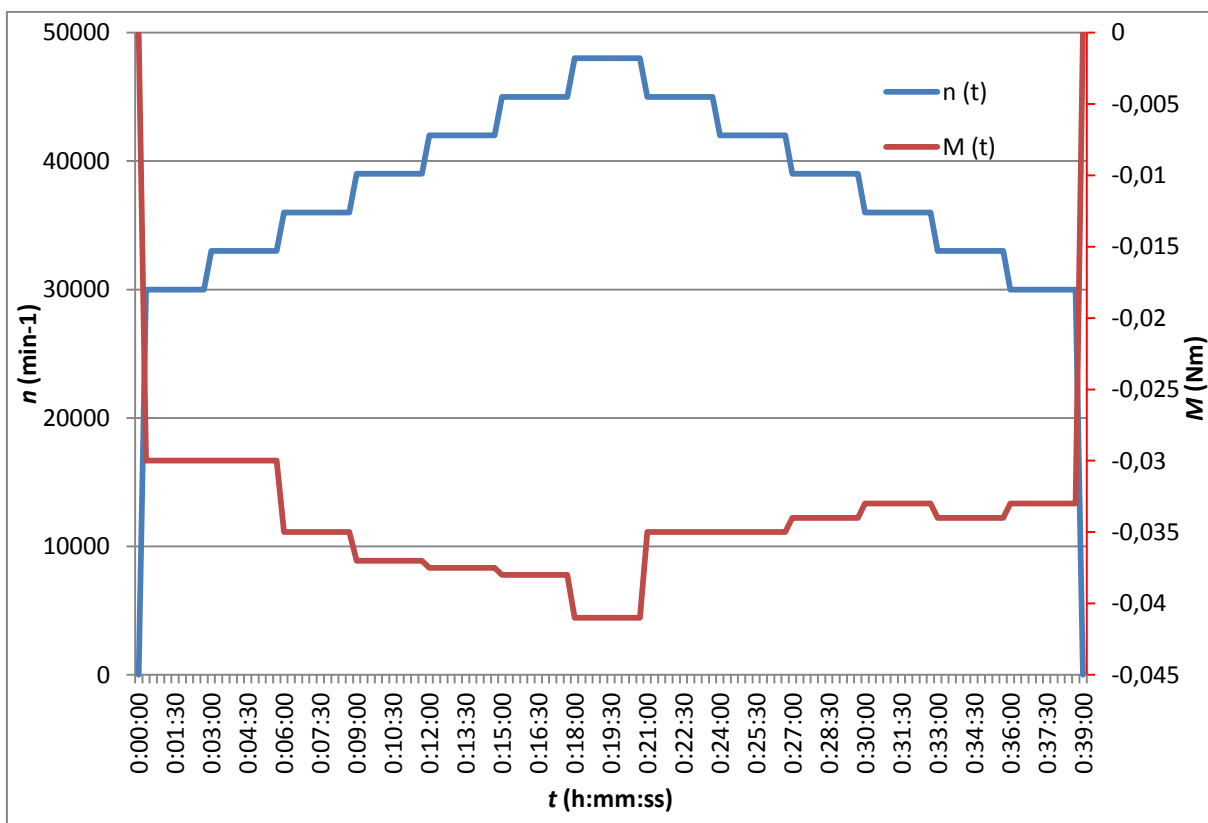
6.6. Razlike v velikosti izgub med različnimi ščetkami s tokom skozi rotor

Ker nas je zanimalo kako segrevanje ščetk vpliva na mehanske izgube smo rotorski tokokrog preko tokovnega napajalnika vzbujali z enosmernim tokom 2 A. Meritve pri toku skozi rotor so potekale pri odstranjenem satorju. Meritve so bile opravljene s ščetkami Hg25i in X13Ag

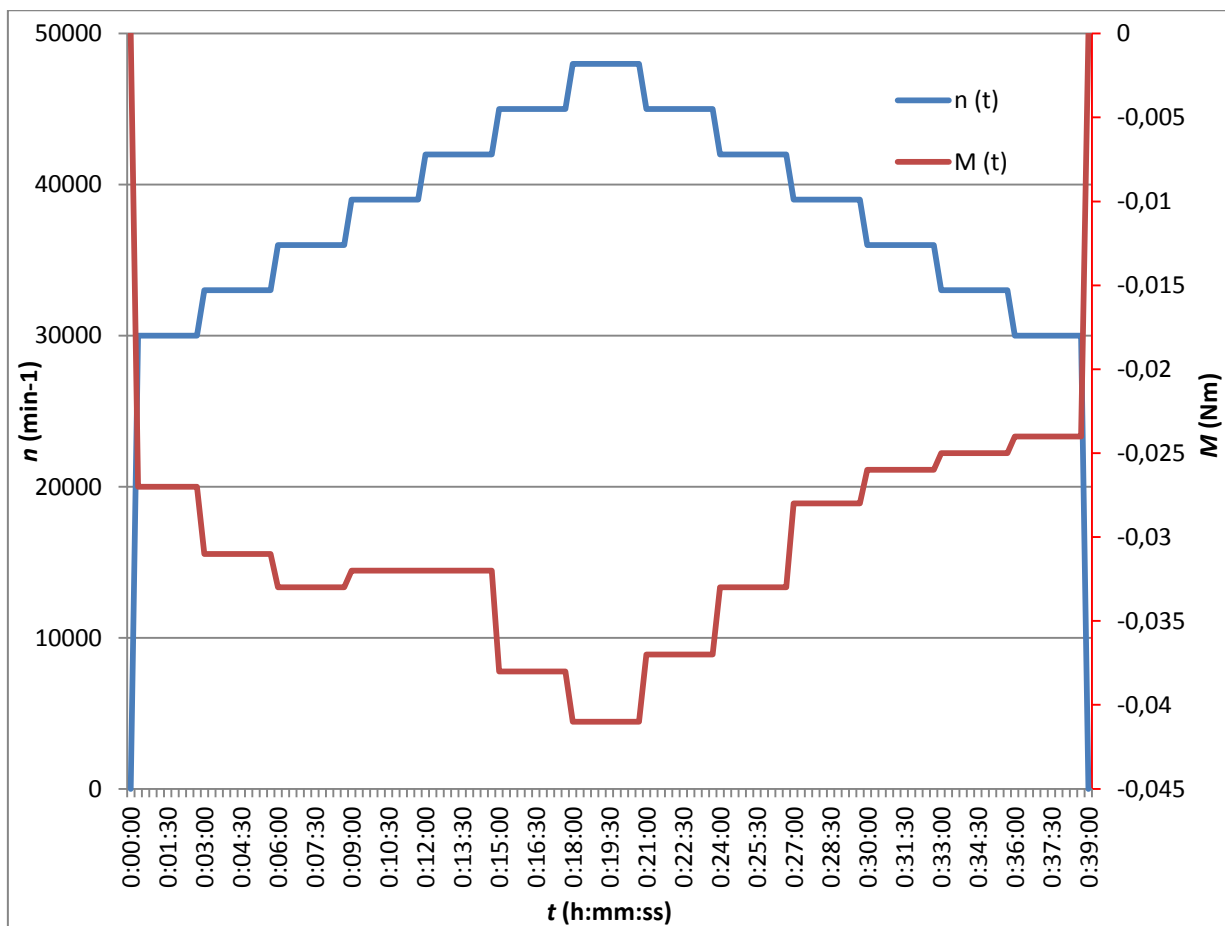
in z vzmetmi 463.1.261-2 (4,4 N) in 464.1.261 (3,5 N), pri ščetkah X89 in X89Ag pa samo z vzmetmi 464.1.261 (3,5 N).

Pri ščetki X13Ag je bila pri obeh vrstah vzmeti izmerjena temperatura na vodilu ščetke pri 50000 min^{-1} višja kot pri ščetki Hg25i. Temperatura s povečevanjem vrtilne hitrosti narašča hitreje pri ščetki X13Ag. Temperature so bile višje pri meritvah s standardnimi vzmetmi (4,4 N). Opazno je tudi večje nihanje temperature pri ščetki X13Ag v območju vrtilne hitrosti med 45000 in 50000 min^{-1} .

Pri primerjavi izmerjenega navora z različnimi ščetkami iz grafov 10 in 11 lahko vidimo, da izmerjeni navor s ščetko Hg25i enakomerno narašča, medtem ko pri ščetki X13Ag navor veliko bolj niha in ni opaznega naraščanja. Ker je bil merilnik navora uporabljen na svoji spodnji meji zaznavanja in so lahko že majhne motnje vplivale na rezultate, sem za prikaz rezultatov uporabil srednjo vrednost izmerjenega navora na vsakem merilnem področju.

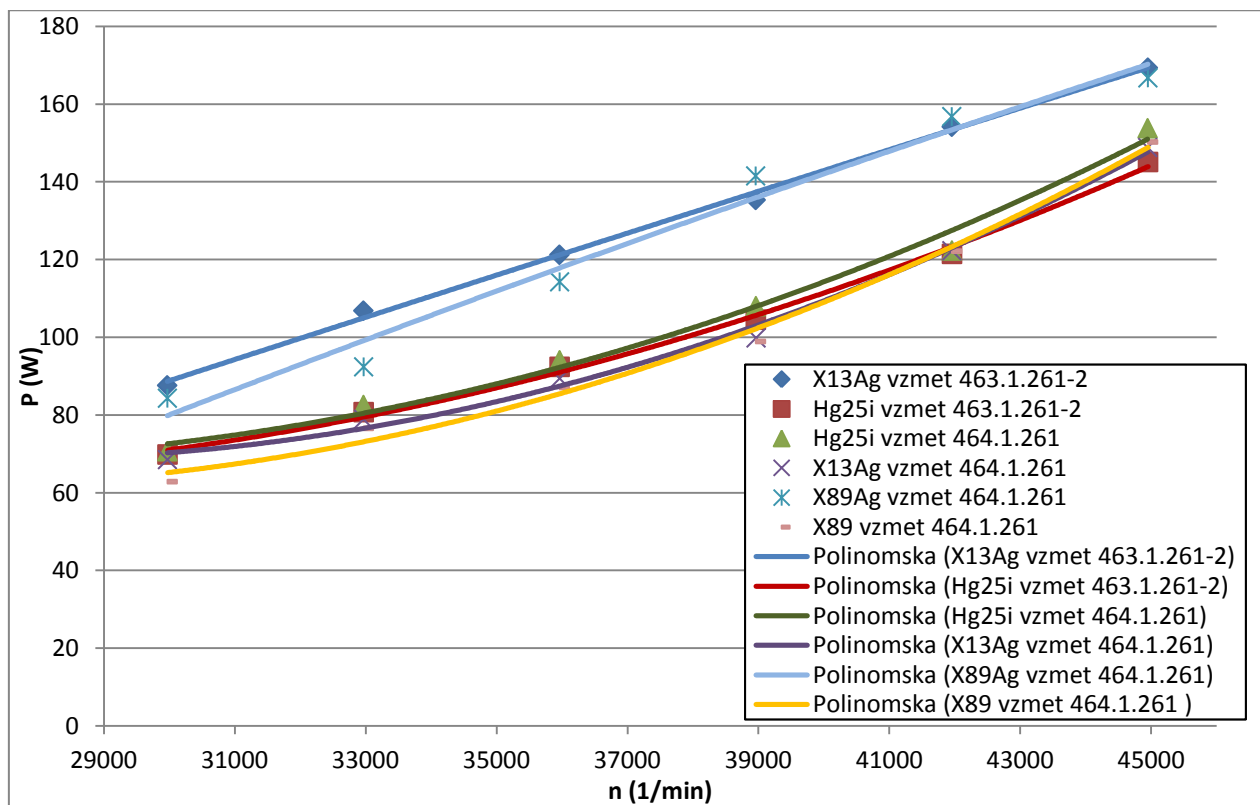


Graf 9: Navor pri toku skozi rotor 2 A, ščetka X13, vzmet 463.1.261-2.



Graf 10: Navor pri toku skozi rotor 2 A, ščetka Hg25i, vzmet 463.1.261-2.

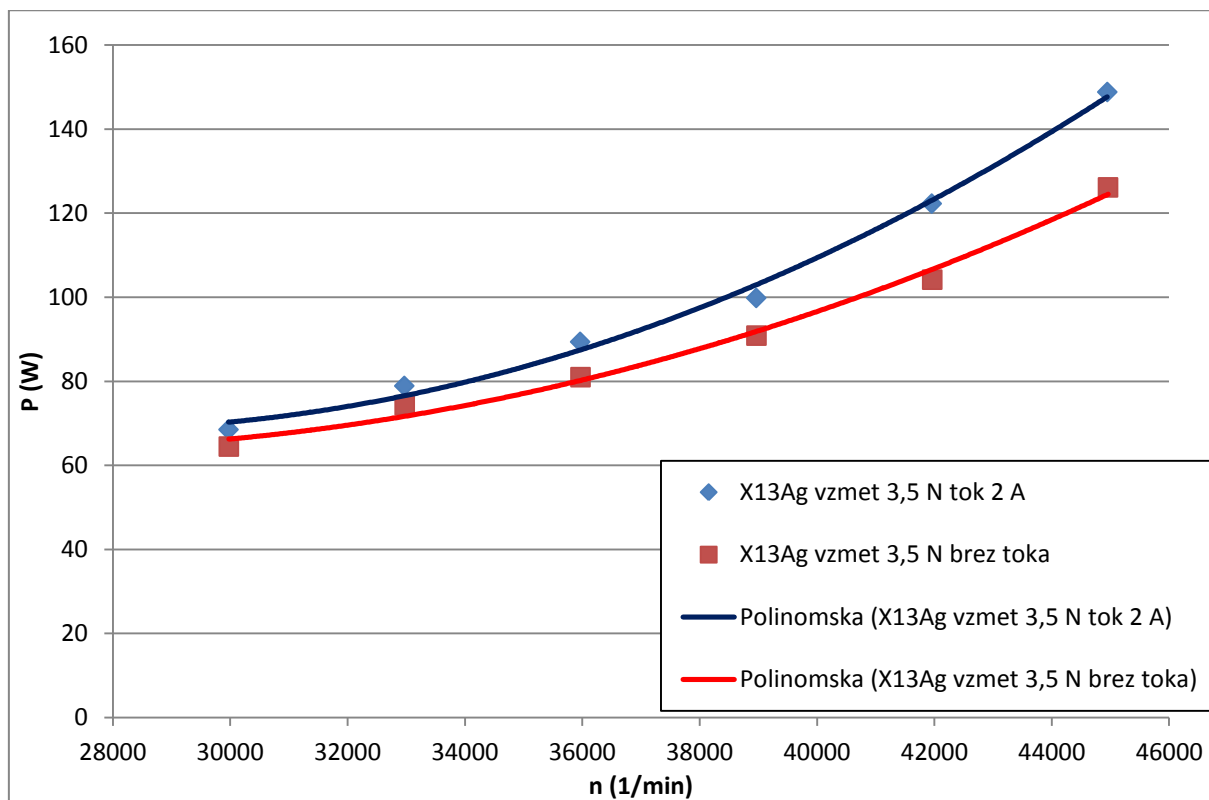
Na grafih 10 in 11 vidimo, da je pri meritvah z vzmetjo 4,4 N, izmerjena moč s ščetko X13Ag preko celotnega merilnega območja za 25 W višja. Pri uporabi vzmeti s silo 3,5 N je bila izmerjena moč s ščetko X13Ag preko celotnega območja merjene vrtilne hitrosti za 4 W nižja, od tiste, izmerjene pri ščetki Hg25i. Pri ščetkah Hg25i so bile izgube z uporabo šibkejših vzmeti višje kot pri standardnih. Pri ščetkah X13Ag so bile izgube z uporabo šibkejših vzmeti mnogo manjše. S ščetko X89Ag so bile pri vzmeti s silo 3,5 N izgube najvišje in so približno enake kot pri ščetki X13Ag s 4,4 N vzmetjo. Najmanjše izgube so bile pri meritvi s ščetko X89 in z vzmetjo s silo 3,5 N.



Graf 11: Izgube s tokom skozi rotor.

6.7. Razlika v izgubah med tokom skozi rotor in brez njega

Za te meritve je bil iz motorja odstranjen stator, rotorski tokokrog je bil preko tokovnega vira vzbujen z enosmernim tokom 2 A. Pri teh pogojih se mehanske izgube motorja povišajo. To lahko pripišemo povečanemu trenju ščetk zaradi višje temperature. Razlika izmerjenih izgub se proti motorju brez toka skozi rotor z višanjem vrtilne hitrosti povečuje. Izmerjene izgube narastejo s 4 W pri 30000 min^{-1} na 22 W pri 45000 min^{-1} .



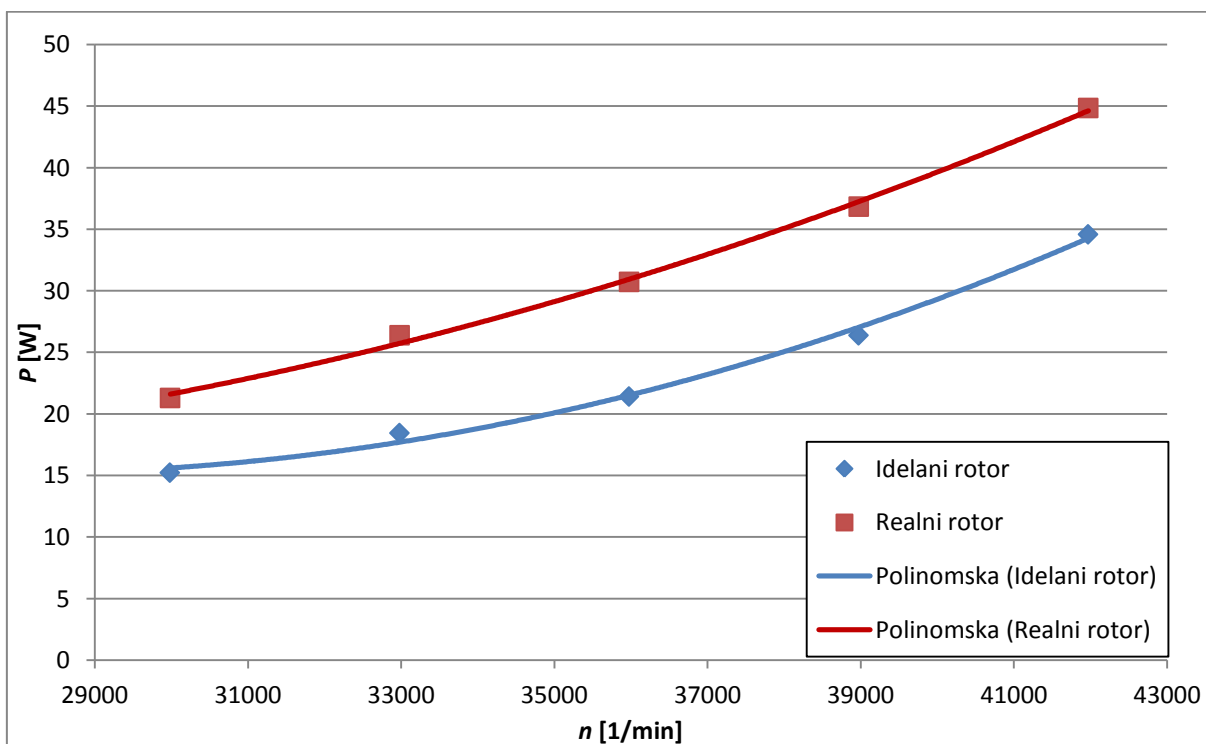
Graf 12: Razlika v velikosti mehanskih izgub pri toku skozi rotor in brez njega.

6.8. Idealni rotor

Za preizkus ene izmed možnosti za zmanjšanje mehanskih izgub motorja smo iz plastike postružili idealen rotor (slika 7). Z njim smo preverili, če in za koliko bi se mehanske izgube zmanjšale, če bi bil rotor povsem gladek, na primer zalit s plastiko. Na grafu 14 vidimo, da so mehanske izgube pri idealnem rotorju od 7 W pri 30000 min^{-1} do 14 W pri 42000 min^{-1} manjše napram realnemu. V grafu so prikazane meritve do 42000 min^{-1} , ker je pri višji vrtilni hitrosti rotor prišel v resonanco in so izgube narasle. Pri analizi je potrebno upoštevati tudi, da je bila masa idealnega rotorja petkrat manjša od mase realnega rotorja.



Slika 7: Idealni rotor.



Graf 13: Primerjava izgub med idealnim in realnim rotorjem.

7. ANALIZA REZULTATOV

Po vseh opravljenih meritvah in primerjavi rezultatov sem prišel do naslednjih ugotovitev:

Do vrtilne hitrosti 45000 min^{-1} največ mehanskih izgub prispevajo ščetke, zaradi trenja ob komutator.

Z manjšanjem sile vzmeti se mehanske izgube znižujejo. Najbolj opazna razlika je ob menjavi vzmeti iz vzmetne sile $4,4 \text{ N}$ na 4 N . Pri meritvah z vzmetmi z vzmetno silo $3,5 \text{ N}$ je bila ta razlika že manj opazna.

Med ščerkami Hg25i in ščerkami X13 z uporabo vzmeti s silo $4,4 \text{ N}$, ni zaznavnih razlik v izmerjenih izgubah. Razlike se pokažejo pri vzmeteh s silo $3,5 \text{ N}$. Tu imajo pri višji vrtilni hitrosti ščetke X13Ag manjše izgube proti ostalim. Pri teh vzmeteh so najmanjše izgube pri ščerkah X89 in X89Ag.

Pri motorjih z manjšo zračno režo so mehanske izgube višje zaradi povečanega vrtnčenja zraka. Mehanske izgube se zaradi turbulentnega toka zraka povišajo tudi, če motorju odstranimo stator.

Pri meritvah s tokom skozi rotor so se kot najboljše izkazale ščetke X89 z vzmetjo s silo $3,5 \text{ N}$. Sledijo jim ščetke X13Ag prav tako z vzmetjo s silo $3,5 \text{ N}$. Pri ščerkah Hg25i se izgube zaradi uporabe različnih vzmeti s silo $4,4 \text{ N}$ oziroma $3,5 \text{ N}$ pokažejo šele nad vrtilno hitrostjo 40000 min^{-1} , kjer so izgube pri uporabi vzmeti s silo $3,5 \text{ N}$ manjše. Kot najslabše so se izkazale ščetke X13Ag z vzmetjo s silo $4,4 \text{ N}$, in ščetke X89Ag z vzmetjo s silo $3,5 \text{ N}$.

Ko rotor vzbuja z enosmernim tokom 2 A pri odstranjenem statorju, mehanske izgube z višanjem vrtilne hitrosti zaradi segrevanja ščerk in s tem povečanega trenja ščerk naraščajo hitreje, kot pri motorju brez vzbujačnega toka.

Prednost ščerk X13Ag se pokaže pri uporabi šibkejših vzmeti s silo $3,5 \text{ N}$ in s tokom skozi rotor, kjer so izgube v območju med 30000 in 42000 min^{-1} najnižje. Vendar bi se lahko zaradi uporabe šibkejših vzmeti pojavile težave pri življenjski dobi motorja.

Pri meritvah z idealnim rotorjem se je izkazalo, da so mehanske izgube pri idealnem rotorju manjše za 7 W pri vrtilni hitrosti 30000 min^{-1} in za 14 W pri vrtilni hitrosti 42000 min^{-1} . To so premajhne razlike da bi iz njih lahko sklepali, da bi z idealnim rotorjem pridobili na izkoristku, zato ni smotrno nadaljevati testiranj v tej smeri.

Pri mehanskih izgubah bi izkoristek lahko izboljšali predvsem z izbiro ščetk in njihovih vzmeti, vendar pa s tem lahko negativno vplivamo na življenjsko dobo motorja, zato je potrebno biti pri izbiri pazljiv. Sam bi glede na opravljene meritve izbral vzmet s silo 3,5 N , ter ščetko X13Ag. Vendar bi bilo potrebno pred dejansko uporabo te kombinacije v serijskem motorju izvesti še meritve življenjske dobe, ter izmeriti zračno karakteristiko z različnimi turbo kolesi.

LITERATURA IN VIRI

- [1.] Miller, TJE. SPEED's Electric Machines with problems in solutions, CD-adapco, 2011
- [2.] User's Manual, "PC-WFC VERSION 2.7", CD-adapco, 2011
- [3.] Pfajfar, J. »Merilna postaja sesalnih enot«, Diplomsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 2002
- [4.] Tehnični opis opreme in navodila za obratovanje, "Merilna postaja za merjenje sesalnih enot", Turboinštitut, Ljubljana 2000
- [5.] Navodila za uporabo in vzdrževanje, "Naprava za avtomatizacijo ter zajem merilnih vrednosti iz merilne postaje DOMEL", Data Merilni Sistemi, Golnik 2000
- [6.] Operating instructions, "GMN High-frequency Spindels of Series TSSV, HS, HSP, HSX with Oil-Air Lubrication frequency, GMN, Nürnberg 1997
- [7.] Instruction manual, "Torquemaster TM 200 Series", Vibro-meter, Issue 4, January 1997
- [8.] Friction of ball-bearings (15. 4. 2013). SKF. Pridobljeno 15. 4. 2013, s <http://www.skf.com/us/products/bearings-units-housings/ball-bearings/principles/friction/power-loss-and-bearing-temperature/index.html>
- [9.] Croes, J., Iqbal, S., (26. 10. 2012). Literature survey: bearing losses. Pridobljeno 15. 4. 2013, s http://www.estomad.org/documenten/D2_1/D2_1%20Document%204%20%20Literature%20survey%20bearings.pdf
- [10.] Huynh, C., Zheng, L., Acharya, D., (10. 3. 2009). Losses in High Speed Permanent Magnet Machines Used in Microturbine Applications. Pridobljeno na 15. 4. 2013, s <http://www.calnetix.com/documents/7.pdf>
- [11.] Deshpande, M.V., Design and testing of electrical machines, Asoke K. Ghosh, New Delhi, 2010
- [12.] Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcová, V., Design of rotating electrical machines, John Wiley & Sons Ltd. West Sussex, 2008.
- [13.] Dutta, R., Chong, L., Rahman, F.M. (2013). Analysis and experimental verification of losses in a concentrated wound interior permanent magnet machine, Pridobljeno na 20. 4. 2013, s <http://www.jpier.org/PIERB/pierb48/12.12110715.pdf>
- [14.] Spletna stran Mitcalc, Lastnosti ležajev (18. 4. 2013) <http://www.mitcalc.com/doc/bearings/help/en/bearingskf.htm>

- [15.] Spletna stran Domel (20. 8. 2014)
<http://www.domel.com/sl>
- [16.] Spletna stran Lamar, Lastnosti ležajev (18. 4. 2013)
<http://www.ee.lamar.edu/gleb/power/Labs/Lab%2012%20-%20Universal%20motor.pdf>
- [17.] Koroušič-Seljak, B. , Papa, G. ,Benedičič, B., (2001), Improving the tehcnical Quality od a universal motor using an evolutionary approach. Pridobljeno 15.8.2014, s
<http://www-csd.ijs.si/applications/doptimel/Euromicro2001.pdf>
- [18.] Benedičič, B. , Kmecel, T., Papa, G., Korušič-Seljak, B., (2001), Evolutionary optimization of a universal motor. Pridobljeno na 15.8.2014, s <http://www-csd.ijs.si/applications/doptimel/IECON2001.pdf>
- [19.] Slavič J., Boltežar M., Mesuring the dynamic forces to identify the friction of a graphite-copper contact for variable temperature and current, Pridobljeno 17.5.2013 s:
<http://lab.fs.uni-lj.si/ladisk/data/pdf/Measuring%20the%20dynamic%20forces%20to%20identify%20the%20friction%20of%20a%20graphite-copper%20contact%20for%20variable%20temperature%20and%20current.pdf>
- [20.] Reynoldsovo število. Pridobljeno na 17.10.2014, s
http://sl.wikipedia.org/wiki/Reynoldsovo_%C5%A1tevililo

PRILOGA:

KARAKTERISTIČNE VELIČINE MERILNE POSTAJE RATITOVEC

Merilni pretvornik TORQUEMASTER TM204/HS

Torque output

- Max. range : ± 10 VDC $\equiv \pm 200$ % of M_n
- Output impedance : $\leq 500 \Omega$ (0 Hz to 5 kHz)
- Overvoltage protection : ± 33 VDC

BITE input

- Input impedance : $10 \text{ k}\Omega$
- Rest voltage of BITE control line : +6 VDC to +32 VDC
- Active voltage of BITE control line : $\leq +4$ VDC
- Overvoltage protection : ± 33 VDC

Measurement accuracy

The measuring range (MR) corresponds to the rated value of the physical quantity measured (M_n = rated torque)

- Zero calibration : $\leq \pm 0.1$ % of MR
- Sensitivity calibration : $\leq \pm 0.1$ % of MR
- Combined error at 100 % of M_n (1) : $\leq \pm 0.1$ % of MR
- Combined error at 200 % of M_n (1) : $\leq \pm 0.2$ % of MR

Temperature drift

- Temperature range 1 : +10 °C to +60 °C

Zero : < 0.1 % of MR / 10 K

Sensitivity : < 0.1 % of MR / 10 K

BITE signal : < 0.1 % of MR / 10 K

- Temperature range 2 : -25 °C to +80 °C

Zero : < 0.2 % of MR / 10 K

Sensitivity : < 0.2 % of MR / 10 K

BITE signal : < 0.1 % of MR / 10 K

Influence of speed on torque signal

- On zero : $\leq \pm 0.01$ % of MR / 1000 rpm
- On sensitivity : $\leq \pm 0.01$ % of MR / 1000 rpm

Frekvenčni pretvornik REFU 316F-06

REFU 316 -		06 F	12 F	18 F	30 F	50 F
1. Supply voltage V_N		3 AC 400 V $\pm 15\%$ 50 / 60 Hz				
2. Output voltage By $V_N = 400$ V		3 AC (0...360) V				
3. DC link voltage V_{dN}		DC 526 V				
4. Converter frequency f_U	Hz	0...3000				0...2000
5. Permissible rated motor output by S6 60% ($t_s = 2$ min.) S_{A6} by S1 100% (permanent) S_{A1}	kVA kVA	6 5	12 10	18 15	30 25	50 40
6. Max. power output S_{KB} (60 sec., 1:5)	kVA	7,5	15	22,5	37,5	60
7. Perm. rated motor output current by S6-mode I_{A6} by S1- mode I_{A1}	A A	10 8	20 16	30 24	50 40	80 64
8. Current limiting I_B	A	12	24	36	60	96
9. Load power factor		$\leq 0,9$ ind.				
10. Ambient temperature	$^{\circ}\text{C}$	0 to 40				
11. Noise level	dB(A)	< 62				
12. Line fuse (FF)	A	16	25	35	50	125
13. Weight of chassis	kg	32	40	41	56	96
14. Weight of cubicle unit	kg	100	110	111	128	190
15. Radio interfer. level VDE		0871-B / 0875 part 3-N			0875 part 3-G	

Visokofrekvenčni motor GMN HSX 100 – 60000/5

Speed max.	Bearing bore	Static stiffness		Torque	Output at max speed	Voltage at $f = 1000$ Hz	Current
Nmax [rpm]	W1 [mm]	Axial [N/ μm]	Raidal [N/ μm]	M [Nm]	[kW]	U [V]	I [A]
60000	25	53	53	0.8	5	350	13