

UNIVERZA V MARIBORU
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Peter Farkaš

**Uporaba navitja z odcepom za široko področje vrtljajev
asinhronskega motorja**

Diplomska naloga

Maribor, julij 2010



UNIVERZA V MARIBORU



FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO,
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO
2000 Maribor, Smetanova ulica 17

Diplomska naloga visokošolskega strokovnega študijskega programa

Uporaba navitja z odcepom za široko področje vrtljajev asinhronskega motorja

Študent: Peter Farkaš

Študijski program: visokošolski strokovni, Elektrotehnika

Smer: Močnostna elektrotehnika

Mentor: doc. dr. Miralem Hadžiselimović

Somentor: prof. dr. Ivan Zagradišnik

Maribor, julij 2010

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Miralemu Hadžiselimoviću in somentorju prof. dr. Ivanu Zagradišniku za pomoč in vodenje pri opravljanju diplomske naloge. Prav tako velja zahvala prof. dr. Ivanu Zagradišniku, ki mi je omogočil uporabo opreme za potrebe diplomskega dela ter Mitji Hriberniku, dipl. inž. el. za pomoč pri opravljanju meritev v laboratoriju.

Posebna zahvala velja tudi staršem, ki so mi omogočili in me moralno podpirali skozi celoten študij.

Uporaba navitja z odcepom za široko področje vrtljajev asinhronskega motorja

Ključne besede: asinhronski motor, izkoristek, vrtilni moment, frekvenčno področje

UDK: 621.313.045(043.2)

Povzetek

Cilj diplomske naloge je analizirati prototip trifaznega asinhronskega motorja z ulomljenim koncentričnim statorskim navitjem izvedenim z odcepom. To navitje omogoča delovanje motorja v širokem področju vrtljajev in je lahko vezano v vezavi zvezda, trikot in trikot z odcepom. Tovrsten motor je napajan s pretvornikom kateri omogoča spreminjanje napajalne frekvence in posledično spreminjanje vrtljajev. S spremembo frekvence se spreminja tudi fluks. Fluks je konstanten le od frekvence nič in vse do nazivne frekvence oziroma do slabljenja polja v katerem se zmanjšuje z višanjem frekvence. V diplomskem delu je izmerjeno delovanje prototipa motorja za vse tri omenjene vezave. Za katero frekvenčno področje je določena vezava uporabna pa je rezultat meritev opravljenih v tem diplomskem delu.

Vso delo in meritve smo opravili v Laboratoriju za električne stroje (LABES) na fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru.

Usage of tapped stator winding for wide-speed range induction motor

Key words: induction motor, efficiency, torque, frequency area

UDK: 621.313.045(043.2)

Abstract

The aim of this diploma is to analyze the prototype of a three-phase induction motor with tapped stator winding used for wide-speed range. This type of stator winding is fractional concentric which can be used as star connection, delta and delta with a tap. This motor is supplied by a converter which enables the changing of the power frequency and consequently the rotating. With the change of the rotating also the flux changes. The flux is constant only from the frequency zero until up to the nominal frequency or until the weakening of the field in which it is decreasing with the increasing of the frequency. In the diploma there are measurements for a prototype motor for all three types of bindings. Which band is what most favorable to the binding operation is analyzed in this diploma.

All work and measurements were conducted at the Laboratory for Electrical Machines (LABES) Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, University of Maribor.

UPORABLJENI SIMBOLI

A_{Cu} (mm²) - presek žice

A_u (mm²) - presek statorskega utora

B (T) - gostota magnetnega pretoka

B_{max} (T) - maksimalna gostota magnetnega pretoka v zračni reži

D (m) - notranji premer statorske izvrtine

E_l, E_m, E_s, E_r (V) - inducirana napetost

f, f_N (Hz) - frekvenca

f_{Cu} - polnilni faktor

f_n - faktor navitja

f_p - pasovni faktor navitja

f_t - tetivni faktor navitja

H_{us} (mm) - višina statorskega utora

I_N (A) - nazivni tok motorja

I_s (A) - statorski tok

I_r (A) - rotorski tok

I_r' (A) - reducirana vrednost rotorskega toka

l (m) - celotna dolžina navitja ene faze

l_{Fe} (m) - dolžina statorskega paketa

l_{gl} (m) - dolžina glave paketa

l_v (m) - dolžina vodnika

M (Nm) - vrtilni moment

m - število faz

m_s - število faznih navitij statorja

m_r - število faznih navitij rotorja

n (min^{-1}) - vrtljaji

n_s (min^{-1}) - sinhronski vrtljaji

n_{sr} - prestavno razmerje med statorjem in rotorjem

p - število polovih parov

P_{iz} (W) - moč izgub

P_N (W) - nazivna moč motorja

P_r, P_m, P (W) - moč na gredi (mehanska moč)

$P_{t1}, P_{t2}, P_{t3}, P_{t4}, P_{t5}, P_{t7}, P_{t8}, P_{tair}$ (K) - merilna mesta za meritev nadtemperatur na različnih delih motorja

R (Ω) - upornost navitja

q - število utorov na pol in fazo

Q - število utorov

Q_p - število utorov na pol

R_{hl} (Ω) - upornost hladnega navitja statorja

R_t (Ω) - upornost toplega navitja statorja

R_r (Ω) - upornost navitja rotorja

R'_r (Ω) - reducirana vrednost rotorske upornosti

s - slip

t (s) - čas

U_s (V) - statorska napetost

U_r (V) - rotorska napetost

U'_r (V) - reducirana vrednost rotorske napetosti

U1 - začetek navitja prve faze

V1 - začetek navitja druge faze

W1 - začetek navitja tretje faze

U2 - konec navitja prve faze

V2 - konec navitja druge faze

W2 - konec navitja tretje faze

X - konec navitja na odcepu prve faze

Y - konec navitja na odcepu druge faze

Z - konec navitja na odcepu tretje faze

$X_{\sigma s}$ (Ω) - razsipana reaktanca statorja

$X_{\sigma r}$ (Ω) - razsipana reaktanca rotorja

$X'_{\sigma r}$ (Ω) - reducirana vrednost razsipane reaktance rotorja

X_m (Ω) - magnetilna (glavna) reaktanca

z - število vodnikov na fazo

z_u - število vodnikov na utor

α ($^\circ$) - električni kot med utori

α_{spl} - faktor sploščenja

η - izkoristek

ϑ_{hl} ($^\circ\text{C}$) - temperatura hladnega navitja

ϑ_{ok} ($^\circ\text{C}$) - temperatura okolice

τ_p (m) - polova delitev oboda rotorja

Φ (Vs) - magnetni pretok

ω (s^{-1}) - krožna frekvenca

KAZALO

1. Uvod	1
2. Predstavitev asinhronskega motorja	2
2.1 Splošen opis in nadomestno vezje asinhronskega motorja	2
2.2 Vpliv frekvence na vrtljaje	5
2.2.1 Obratovanje pri $U/f = \text{konst}$	6
2.3 Navitje z odcepom in vezave za uporabo v širokem področju vrtljajev ter faktor navitja	6
2.3.1 Vezave elektromotorja za področje visokih vrtljajev	7
2.3.2 Ulomljeno koncentrično navitje	9
2.3.3 Faktor navitja	10
3. Izračuni motorjev	13
3.1 Nazivni podatki testnega motorja	13
3.2 Izračun navijalnih podatkov in geometrije motorja	15
3.3 Analitični izračun	17
4. Meritve motorja in opis merilnega sistema	19
4.1 Opis merilnega sistema	19
4.2 Rezultati meritev v vezavi zvezda	21
4.2.1 S sinusnim izvorom	21
4.2.2 Meritev segrevanja s pretvornikom	23
4.2.3 Meritev obratovalnih karakteristik čez celotno frekvenčno področje	26
4.3 Rezultati meritev v vezavi trikot	29
4.4 Meritev rezultatov v vezavi trikot z odcepom (Δ -o)	30
5. Primerjava rezultatov	33
6. Zaključek	35
7. Literatura	36

8. Priloge

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Slika trifaznega asinhronskega motorja s kratkostično kletko	2
Slika 2.2: Nadomestno vezje asinhronskega motorja	3
Slika 2.3: Primer napajanja $U / f = \text{konst}$	6
Slika 2.4: Vezava elektromotorja za trajno delovanje v vezavi zvezda	7
Slika 2.5: Vezava elektromotorja za trajno delovanje v trikot vezavi	7
Slika 2.6: Vezava elektromotorja za preklop zvezda/trikot	8
Slika 2.7: Vezava elektromotorja za preklop zvezda/trikot z odcepom	8
Slika 2.8: Ulomljeno koncentrično navitje s korakom 1-7, 9	11
Slika 2.9: Fazorji napetosti dveh tuljav ene izmed faz	11
Slika 3.1: Testni trifazni asinhronski motor 2M 90 L4	13
Slika 3.2: Ulomljeno koncentrično navitje v razviti obliki za paket s 36 statorskimi utori	13
Slika 3.3: Koncentrično enoplastno navitje z odcepom (2/3 celotnega navitja)	14
Slika 3.2: Ulomljeno koncentrično navitje v razviti obliki za paket s 36 statorskimi utori	18
Slika 4.1: Merilni sistem	19
Slika 4.2: Meritev optimalne napetosti	21
Slika 4.3: Karakteristike vrtilnega momenta in toka	22
Slika 4.5: Tok v odvisnosti od napetosti v prostem teku	23
Slika 4.6: Spreminjanje upornosti bakrenega navitja v odvisnosti od temperature	24
Slika 4.7: Ekstrapolacija izmerjenih vrednosti s polinomom v času izklopa ($t = 0$ s)	25
Slika 4.8: Pozicija termočlenov na ohišju motorja	26
Slika 4.9: Izgube v vezavi zvezda (Y) v odvisnosti od frekvence	27
Slika 4.10: Karakteristika vrtilnega momenta v vezavi zvezda (Y) v odvisnosti od frekvence	28
Slika 4.11: Izkoristek v vezavi zvezda (Y) v odvisnosti od frekvence	28
Slika 4.12: Izgube v vezavi trikot (Δ) v odvisnosti od frekvence	29
Slika 4.13: Karakteristika vrtilnega momenta v vezavi trikot (Δ) v odvisnosti od frekvence	30

Slika 4.14: Izkoristek v vezavi trikot (Δ) v odvisnosti od frekvence	30
Slika 4.15: Izgube v vezavi trikot z odcepom (Δ -o) v odvisnosti od frekvence	31
Slika 4.16: Karakteristika vrtilnega momenta v vezavi trikot z odcepom (Δ -o) v odvisnosti od frekvence	31
Slika 4.17: Izkoristek v vezavi trikot z odcepom (Δ -o) v odvisnosti od frekvence	32
Slika 5.1: Karakteristika izgub vseh treh vezav	33
Slika 5.2: Graf odvisnosti momenta od frekvence	33
Slika 5.3: Graf izkoristka čez celotno področje	34
Slika 5.4: Graf slipa v odvisnosti od frekvence	34

KAZALO TABEL

Tabela 3.1: Nazivni podatki testnega motorja Elkostroj 2M 90 L4	14
Tabela 4.1: Primerjava segrevanja glede na način hlajenja	25
Tabela 4.2: Primerjava rezultatov segrevanja zgoraj opisanih metod	26

1. Uvod

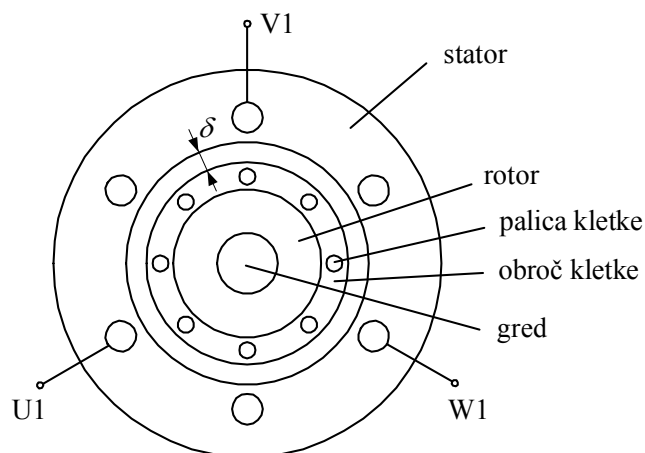
V diplomski nalogi bo izdelan in analiziran prototip trifaznega asinhronskega motorja z ulomljenim koncentričnim statorskim navitjem izvedenim z odcepom. Posebnost predlaganega navitja je, da je izvedeno z devetimi priključki, kar omogoča delovanje v vezavi zvezda, trikot in trikot z odcepom. Izvedene bodo meritve s pretvornikom v vseh treh vezavah v celotnem uporabnem področju vrtljajev. Izračunani bodo navijalni podatki pri znani geometriji statorskega in rotorskega paketa. Zaradi omejitev merilnih sistemov v laboratoriju in tudi izdelave rotorja asinhronskega motorja (balansiranje) bo prototip izdelan za nazivno frekvenco 33,3 Hz. Pri meritvah bo omejitev tudi maksimalni tok pretvornika, ki bo napajal prototip asinhronskega motorja. Na ustrezni merilni progi bodo izmerjene elektromehanske karakteristike v vseh treh vezavah na širokem področju vrtljajev. Iz karakteristik se bo ugotovilo, katera vezava je za katero področje vrtljajev najbolj primerna in s tem tudi frekvenca, pri kateri naj motor preklopi med vezavami. Meritve bodo opravljene v Laboratoriju za električne stroje.

2. Predstavitev asinhronskega motorja

V tem poglavju bo predstavljena teorija asinhronskega motorja za potrebe tega diplomskega dela. Za asinhronski stroj bo v nadaljevanju uporabljen izraz asinhronski motor, saj bo v diplomski nalogi analizirano delovanje asinhronskega stroja le v motorskem področju. Na začetku teorije je predstavljen splošni opis in načini spreminjanja števila vrtljajev asinhronskega motorja. Nato sledi podroben opis asinhronskega motorja, vpliv frekvence na vrtljaje le-tega ter vezave za uporabo v širokem področju vrtljajev.

2.1 Splošen opis in nadomestno vezje asinhronskega motorja

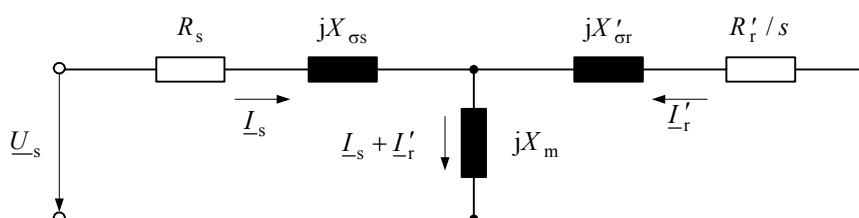
Asinhronski motor je sestavljen iz dveh delov, tj. statorskega in rotorskega dela. V statorskem delu je nameščeno primarno navitje, v rotorskem pa sekundarno navitje. Med statorjem in rotorjem je zračna reža δ , ki je tolikšna, da zagotovi varno vrtenje rotorja, kar pomeni, da imamo magnetni krog z zračno režo. Število faznih navitij statorja m_s in rotorja m_r je lahko različno. Tokovi, ki tečejo skozi statorska in rotorska navitja, ustvarjajo svoje m -fazne amper-ovoje in ker so ti tokovi izmenični, dobimo vrtilne amper-ovoje statorja in rotorja, ki ustvarjajo rezultirajoče vrtilne amper-ovoje [1]. Posledično vzbujajo vrtilni magnetni fluks, ki inducira napetosti v primarnem in sekundarnem navitju. Frekvenca rotorskih električnih veličin ni enaka frekvenci statorskih električnih veličin ker vrtilni fluks ne reže z enako hitrostjo palic statorskega in rotorskega kroga, ki se giblje glede na primarno navitje.



Slika 2.1: Slika trifaznega asinhronskega motorja s kratkostično kletko

Asinhronski motor ima rotorsko navitje v normalnem obratovanju kratko sklenjeno, kar pomeni kratek stik pri mirujočem rotorju. Ko se začne rotor gibati, se v sekundarnem navitju joulske izgube nižajo, na gredi stroja pa se povečuje mehanska moč. Vrtilni magnetni fluks stroja se vrti s sinhronskim številom vrtljajev n_s glede na mirujoči stator, rotor pa z vrtljaji $n < n_s$, torej asinhrono [1].

S spodaj prikazanim nadomestnim vezjem (slika 2.2) lahko asinhronski motor predstavimo na način, kjer sta statorski in rotorski tokokrog, ki sta dva električno ločena tokokroga, združena v enotno vezje. Rotorske veličine se reducirajo na stator, kar je označeno s črtico zgoraj.



Slika 2.2: Nadomestno vezje asinhronskega motorja

Reducirane veličine rotorskega navitja:

$$\underline{I}'_r = \frac{\underline{I}_r}{n_{sr}} ; \underline{U}'_r = n_{sr} \underline{U}_r \quad (2.1)$$

$$R'_r = n_{sr}^2 R_r ; X'_{\sigma r} = n_{sr}^2 X_{\sigma r} \quad (2.2)$$

kjer je:

- n_{sr} prestavno razmerje stator – rotor
- \underline{I}_r rotorski tok, \underline{I}'_r reducirana vrednost rotorskega toka,
- \underline{U}_r rotorska napetost, \underline{U}'_r reducirana vrednost napetosti,
- R_r upornost navitja rotorja, R'_r reducirana vrednost rotorske upornosti,
- $X_{\sigma r}$ razsipana reaktanca rotorja in $X'_{\sigma r}$ reducirana vrednost razsipane reaktance rotorja.

Napetostne enačbe, ki ustrezajo nadomestnemu vezju (slika 2.2):

$$\underline{U}_s = (R_s + jX_{\sigma s})\underline{I}_s + jX_m(\underline{I}_s + \underline{I}'_r) = (R_s + jX_{\sigma s})\underline{I}_s - \underline{E}_m \quad (2.3)$$

$$\frac{\underline{U}'_r}{s} = \left(\frac{R'_r}{s} + jX'_{\sigma r}\right)\underline{I}'_r + jX_m(\underline{I}_s + \underline{I}'_r) = \left(\frac{R'_r}{s} + jX'_{\sigma r}\right)\underline{I}'_r - \underline{E}_m \quad (2.4)$$

kjer je:

- $\underline{E}_m = \underline{E}_s = \underline{E}'_r$ inducirana napetost vrtilnega polja,
- \underline{I}_s statorski tok,
- \underline{U}_s statorska napetost,
- R_s upornost statorskega navitja,
- $X_{\sigma s}$ razsipana reaktanca statorja,
- X_m magnetilna reaktanca in
- s slip.

Pri kratkosklenjenem rotorju je člen \underline{U}'_r/s enak nič. Pri vrednosti slipa $s=0$ dobimo matematično nedefiniran izraz, zaradi tega enačbe (2.4) ne moremo uporabiti.

Asinhronski motor, priključen na togo omrežje, ima vrtljaje rotorja n pri nazivni obremenitvi nekoliko manjše od sinhronskih vrtljajev n_s , zato uvedemo slip s , s katerim je mogoče izraziti zaostajanje rotorja za vrtilnim magnetnim poljem statorja, ki se vrti s sinhronskimi vrtljaji:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.5)$$

Vrtljaje asinhronskega motorja n lahko spreminjamo na različne načine, kar se vidi iz enačbe za vrtljaje ob upoštevanju da so sinhronski vrtljaji n_s določeni iz razmerja frekvence f in polovih parov p :

$$n = n_s (1 - s) = \frac{f}{p} (1 - s) \quad (2.6)$$

Torej lahko vrtljaje, glede na enačbo (2.6), spreminjamo s:

- Spremembo napajalne frekvence f
- številom polov p ,
- spreminjanjem slipa s .

V tej diplomski nalogi bo obravnavana sprememba vrtljajev s spreminjanjem frekvence.

2.2 Vpliv frekvence na vrtljaje

S spreminjanjem frekvence f spreminjamo sinhronske vrtljaje n_s v relativno širokem obsegu. S spreminjanjem frekvence f se posledično spreminja tudi magnetni pretok – fluks Φ in s tem momentna karakteristika asinhronskega motorja. V področju od 0 do nazivne frekvence f_n fluks pada, kar ni ugodno, zato hkrati s spremembo frekvence spreminjamo tudi statorsko napetost U_s .

Fluks lahko obdržimo nespremenjen ob ustrezni spremembi f in U , kar se da razbrati iz enačbe za inducirano napetost v statorskem navitju:

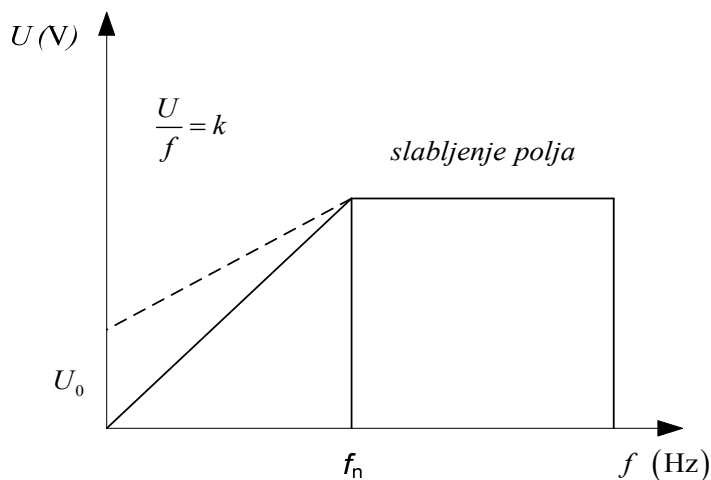
$$\begin{aligned} \rightarrow \Phi = \text{konst.} &\Leftrightarrow \frac{E}{f} = \text{konst.} \\ E = k f \Phi & \\ \rightarrow \Phi \approx \text{konst.} &\Leftrightarrow \frac{U}{f} = \text{konst.} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Direktno lahko spreminjamo le statorsko napetost U_s , na pa inducirane napetosti E ob istočasnem spreminjanju frekvence f . Zato zahtevata zgornji možnosti dva različna pristopa, tj. regulacijo oziroma krmiljenje [2].

Vsak asinhronski motor lahko obratuje tako na omrežju s frekvenco 50 Hz, kot omrežju s 60 Hz ali s pretvornikom še pri višjih frekvencah, vendar moramo hkrati s frekvenco premo sorazmerno povečevati tudi napetost, kar vidimo iz enačbe (2.7). Frekvenco lahko povečamo za desetkratnik nazivne vrednosti ali več, medtem ko izhodno napetost pretvornika lahko povečamo le do nazivne vrednosti pretvornika.

2.2.1 Obratovanje pri $U/f = \text{konst}$

Konstantno razmerje statorske napetosti in frekvence je omejeno samo na področje od 0 do nazivne frekvence. Fluks se v tem področju pri zmanjšanju frekvence f zmanjšuje, zmanjšuje se tudi inducirana napetost E , ker je statorski ohmski padec napetosti pri konstantnem vrtilnem momentu M skoraj konstanten v celotnem področju spreminjanja frekvence. Zaradi tega ima relativno večji vpliv pri nizkih frekvencah, kar pomeni večje zmanjšanje inducirane napetosti E in s tem tudi zmanjšanje fluksa Φ .



Slika 2.3: Primer napajanja $U/f = \text{konst}$.

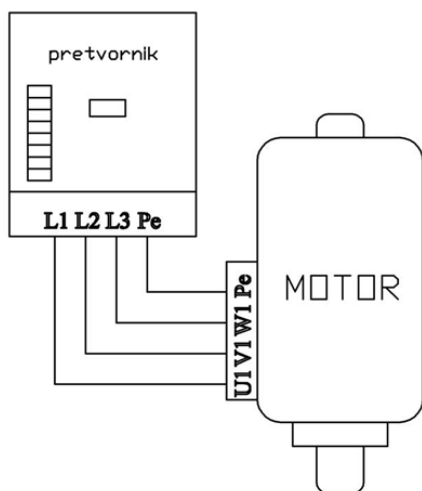
Če želimo obdržati približno konstantno vrednost fluksa, moramo kompenzirati statorski (ohmski) padec, kar naredimo z dodatnim povečevanjem napetosti U [2]. V frekvenčnem področju nad nazivno frekvenco statorske napetosti U ne spreminjamo, kar pomeni, da se fluks v tem območju zmanjšuje. To zmanjševanje fluksa imenujemo slabljenje polja.

2.3 Navitje z odcepom in vezave za uporabo v širokem področju vrtljajev ter faktor navitja

V tem poglavju bodo razložene osnovne vezave električnih motorjev za uporabo v širokem področju vrtljajev. Prav tako bo predstavljeno navitje z odcepom v izvedbi, ki je primerno za uporabo v širokem področju vrtljajev.

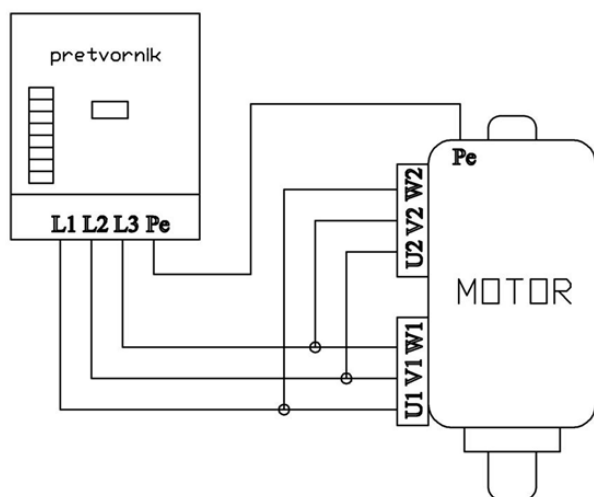
2.3.1 Vezave elektromotorja za področje visokih vrtljajev

Če uporabljamo elektromotor za velike razpone vrtljajev (npr. od nekaj sto vrtljajev do nekaj tisoč), uporabimo kontaktorje s katerimi preklapljammo med vezavami (npr. iz zvezde v trikot). Vezave, ki jih lahko uporabimo so predstavljene na naslednjih slikah.



Slika 2.4: Vezava elektromotorja za trajno delovanje v vezavi zvezda

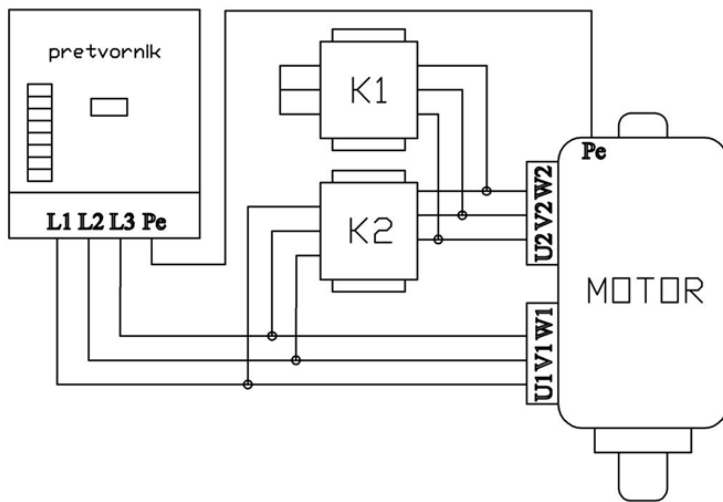
Priključki pretvornika (L1, L2, L3) so direktno povezani na začetke faz elektromotorja (U1, V1, W1). Konci navitij so povezani v zvezdo.



Slika 2.5: Vezava elektromotorja za trajno delovanje v trikot vezavi

To vezavo uporabljamo za trajno delovanje motorja v trikot Δ vezavi. Prva faza je priklopljena na začetek navitja prve faze U1 in konec navitja tretje faze W2, druga faza na

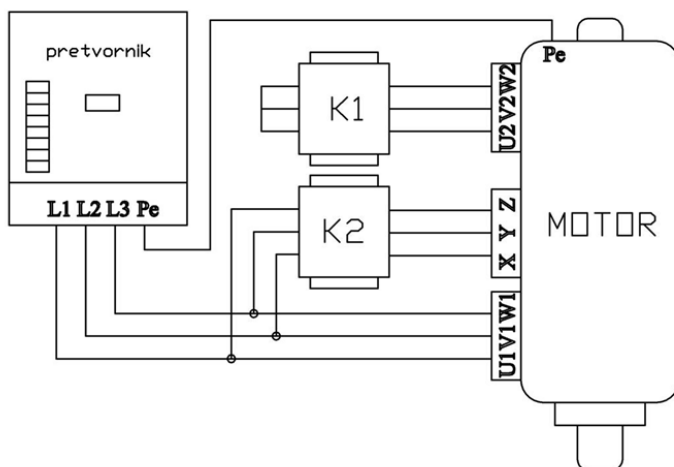
začetek navitja druge faze V1 in konec navitja prve faze U2, tretja faza pa na začetek tretjega navitja W1 in konec drugega navitja V2.



Slika 2.6: Vezava elektromotorja za preklp zvezda/trikot

Vezavo uporabljamo za preklapljanje med vezavo zvezda Y in vezavo trikot Δ . Pri tej vezavi uporabimo dva kontaktorja (K1, K2). Povezana sta vzporedno na koncih navitij (U2, V2, W2). V vezavi zvezda Y je vklopljen kontaktor K1, kontaktor K2 je razklopljen. Pri preklopu v vezavo trikot se kontaktor K1 razkrene, istočasno se vklopi kontaktor K2.

Kontaktor K1 je na vходу vezan v vezavo zvezda Y, kontaktor K2 pa na priključke pretvornika (L1, L2, L3). Prav tako so na priključke pretvornika povezani začetki navitij elektromotorja (U1, V1, W1).



Slika 2.7: Vezava elektromotorja za preklp zvezda/trikot z odcepom

Vezavo uporabljamo za preklapljanje med vezavo zvezda Y in vezavo trikot z odcepom Δ -o. Pri tej vezavi uporabimo dva kontaktorja (K1, K2). Kontaktor K1 je povezan s konci celotnega navitja (U2, V2, W2), kontaktor K2 pa je zvezan na odcep (X, Y, Z). V vezavi zvezda Y je vklopljen kontaktor K1, kontaktor K2 je razklopljen. Pri preklopu v vezavo trikot z odcepom Δ -o se kontaktor K1 razklopi, istočasno se vklopi kontaktor K2. Kontaktor K1 je na vhodu vezan v vezavo zvezda Y, kontaktor K2 pa na priključke frekvenčnega pretvornika (L1, L2, L3). Prav tako so na priključke pretvornika povezani začetki navitij elektromotorja (U1, V1, W1) [5].

Torej v nadaljevanju bo predstavljeno ulomljeno koncentrično navitje izvedeno z odcepom, ki omogoča prevezavo Y/ Δ -o, skladno s sliko 2.8.

2.3.2 Ulomljeno koncentrično navitje

Ulomljeno koncentrično navitje je koncentrično navitje, ki je deloma enoplastno in deloma dvoplastno[1]. Prednost teh navitij je predvsem v krajših glavah, faktor navitja pa je le minimalno manjši kot pri premerskem navitju. To navitje omogoča, tako kot navadno koncentrično navitje, strojno vlaganje navitja, zaradi česa se je tudi uveljavilo.

Izračun faktorja navitja pri tem navitju ni mogoče izračunati s pomočjo standardnih enačb. Standardne enačbe veljajo le za normalna enoplastna ali dvoplastna pasovna navitja.

Splošno velja za vsako skrajšano simetrično ulomljeno koncentrično navitje $q \geq 2$ enačb

$$f_n = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^n z_i \cos\left((2i-1)\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.8)$$

kjer je $n = \frac{q+1}{2}$, če je q liho število in $n = \frac{q}{2}$, če je q sodo število ter z vsota vseh vodnikov v utorih: $z = z_1 + z_2 + \dots + z_n$. Ni potrebno poznati števila vodnikov, pač pa le % polnitve posameznega utora glede na utor z največ vodniki.

Zmanjšanje faktorja navitja je nepomembno, bistvena prednost takšnega navitja je skrajšanje glav. Prav tako je manjša vsebina višjih harmonskih komponent magnetnega polja kot za premersko navitje.

2.3.3 Faktor navitja

Faktor navitja je enak produktu pasovnega in tetivnega faktorja navitja [1].

$$f_n = f_p f_t \quad (2.9)$$

Enačba za pasovni faktor navitja:

$$f_p = \frac{\sum_{\text{geom.}} E}{\sum_{\text{arit.}} E} \quad (2.10)$$

Pri enoplastnem navitju je tetivni faktor $f_t = 1$. Velja pa zgornja enačba tako za enoplastno kot dvoplastno navitje, vendar le za osnovno harmonsko komponento induciranih napetosti v navitju. Ker pa vsebuje magnetno polje tudi višje harmonske komponente, ki povzročijo inducirane napetosti višjih harmonskih komponent, uporabimo razširjeno obliko enačbe.

$$f_{pv} = \frac{\sin\left(q \frac{\alpha_v}{2}\right)}{q \sin \frac{\alpha_v}{2}} \quad (2.11)$$

$$f_{tv} = \sin\left(\frac{\tau_t \pi}{\tau_{pv} 2}\right) = \sin\left(v \frac{\tau_t \pi}{\tau_p 2}\right) = \sin\left(v \frac{Y_Q \pi}{Q_p 2}\right) \quad (2.12)$$

Širina pola za ν -ti harmonik je enaka:

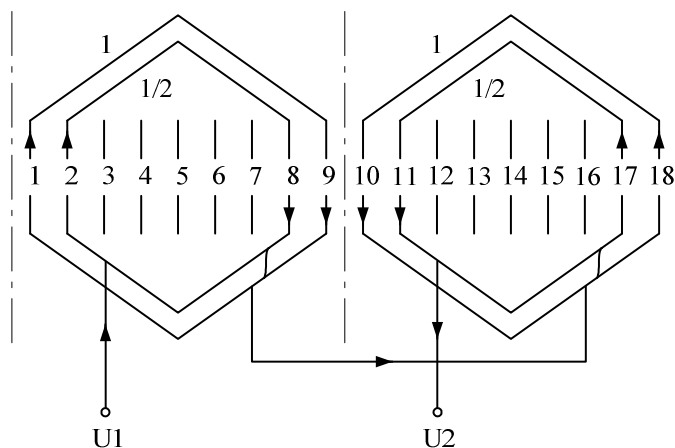
$$\tau_{pv} = \frac{\tau_p}{\nu} \quad (2.13)$$

S tetivljenjem navitja deloma eliminiramo določene harmonske komponente inducirane napetosti, saj ob ustreznem skrajšanju tuljav enačba da drugačno vrednost tetivnega faktorja za osnovno harmonsko komponento kot npr. za peto.

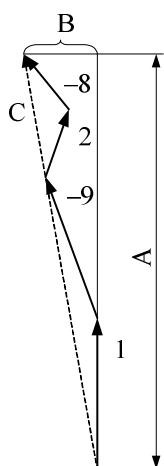
Splošen izraz za faktor navitja katerekoli harmonske komponente:

$$f_{nv} = f_{pv} f_{tv} \quad (2.14)$$

Faktorja navitja pa ni mogoče izračunati po zgornjih enačbah v primeru, ko imamo opravka z nesimetričnimi navitji, kjer navitja v posameznih fazah niso enaka ali v primeru simetričnih navitij, ko navitja niso ne enoplastna, ne dvoplastna, pač pa kombinirana. Eno takšnih navitij je tudi ulomljeno koncentrično navitje, ki je opisano v poglavju 2.3.2.



Slika 2.8: Ulomljeno koncentrično navitje s korakom 1-7, 9



Slika 2.9: Fazorji napetosti dveh tuljav ene izmed faz

Da izračunamo faktor navitja seštejemo fazorje utorskih napetosti dveh tuljav katere koli izmed faz. Fazor prvega utora s faznim položajem 0° seštejemo s fazorjem devetega utora, ki zaostaja za prvim utorom za $-8 \cdot 20^\circ = -160^\circ$ in v kompleksni ravnini prehiteva prvi utor

za 20° . Vsoti prištejemo polovični fazor drugega utora, ki za prvim utorom zaostaja za -20° in potem še polovični fazor osmega utora, ki zaostaja za prvim -140° in prehiteva v tuljavi kazalec utora št.1 za $-140^\circ + 180^\circ = 40^\circ$.

Da dobimo geometrijsko vsoto naredimo sinusno in kosinusno projekcijo kazalcev. Nato uporabimo Pitagorov izrek.

Kosinusna projekcija:

$$A = 1 \cos 0^\circ + 1 \cos 20^\circ + 0,5 \cos(-20^\circ) + 0,5 \cos 40^\circ = 2,793 \quad (2.15)$$

Sinusna projekcija:

$$B = 1 \sin 0^\circ + 1 \sin 20^\circ + 0,5 \sin(-20^\circ) + 0,5 \sin 40^\circ = 0,492 \quad (2.16)$$

Geometrijska vsota:

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} = 2,836 \text{ enote} \quad (2.17)$$

Aritmetična vsota je enaka $1+1+0,5+0,5 = 3$ enote. Za osnovni harmonik faktor navitja

izračunamo po enačbi

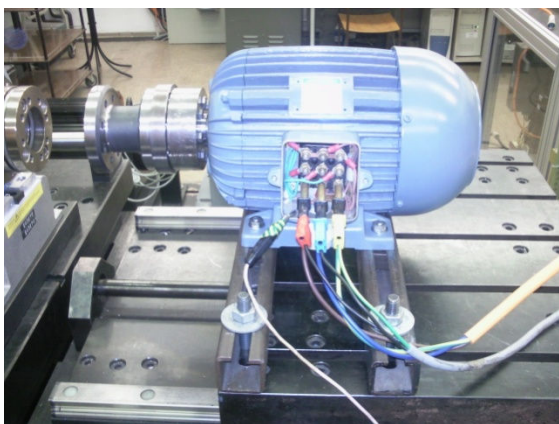
$$f_n = \frac{\sum_{\text{geom.}} \Theta}{\sum_{\text{arit.}} \Theta} = \frac{2,836}{3} = 0,945 \quad (2.18)$$

3. Izračuni motorjev

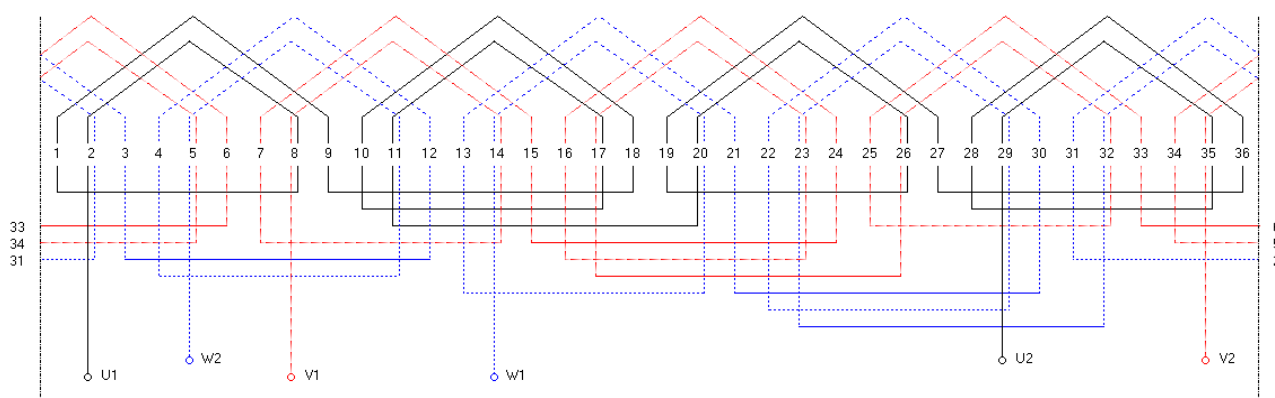
V nadaljevanju so predstavljeni nazivni podatki testnega motorja, izračun navijalnih podatkov in geometrije motorja ter analitični izračun.

3.1 Nazivni podatki testnega motorja

V okviru diplomske naloge smo uporabili motor proizvajalca Elkostroj, tip 2M 90 L4, nazivne moči 0,75 kW, višine gredi 90 mm in nazivne napetosti 400 V pri frekvenci 33,3 Hz za področje visokih vrtljajev. V statorski paket, ki ima 36 utorov, je vstavljeno trifazno ulomljeno koncentrično navitje s odcepom, prikazano na sliki 3.2 in 3.3.

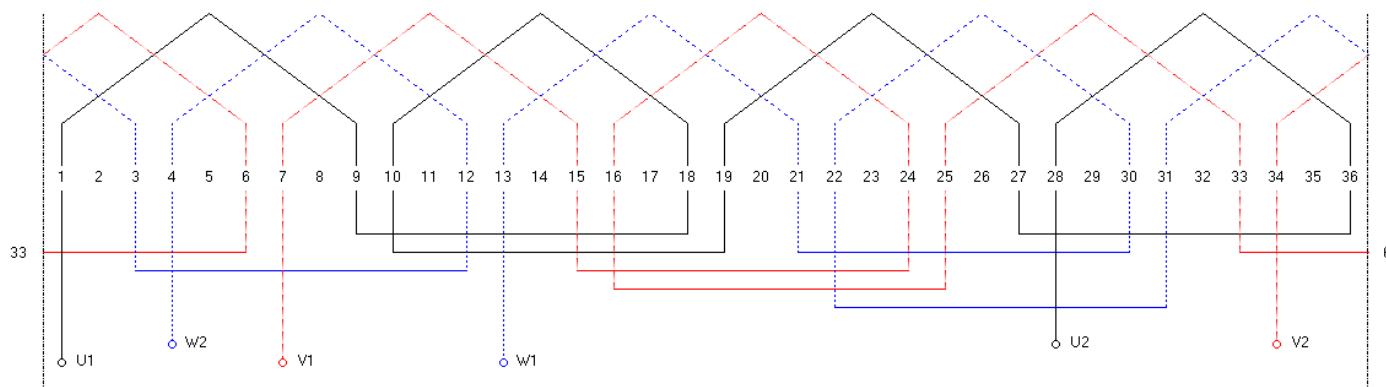


Slika 3.1: Testni trifazni asinhronski motor 2M 90 L4



Slika 3.2: Ulomljeno koncentrično navitje v razviti obliki za paket s 36 statorskimi utori

Za vezavo zvezda Y se uporablja celotno navitje. Ko želimo povišati frekvenco f se od nazivne točke napetost več ne povišuje in da se izognemo slabljenju polja (poglavje 2, slika 2.3) uporabimo le del navitja, ki je vezano v vezavo trikot. Ker je trikot zvezan na odcepu ga imenujemo trikot z odcepom (Δ -o). Prikazan je na spodnji sliki 3.3.



Slika 3.3: Koncentrično enoplastno navitje z odcepom (2/3 celotnega navitja)

Nazivni in ostali podatki testnega trifaznega asinhronskega motorja so prikazani v tabeli 3.1.

Tabela 3.1: Nazivni podatki testnega motorja Elkostroj 2M 90 L4

Proizvajalec: ELKOSTROJ	
Tip	2M 90 L4
Serijska številka	T 14536
Nazivna napetost U_N	Y/400 V
Nazivni tok I_N	2 A
Nazivna moč P_N	0,75 kW
Faktor delavnosti $\cos \varphi$	0,72
Nazivna frekvenca f_N	33,3 Hz
Nazivno število vrtljajev n_N	930 min ⁻¹
Razred izolacije	IP 54
Nazivni vrtilni moment M_N	7,7 Nm

3.2 Izračun navijalnih podatkov in geometrije motorja

V tem poglavju bo predstavljen obravnavan motor. Za izračun so potrebni naslednji podatki: nazivna napetost $U_N = D/Y 230/400 \text{ V}$, frekvenca $f = 33,3 \text{ Hz}$, število faz $m = 3$, število polov $2p = 4$, število statorskih utorov $Q = 36$, notranji premer statorske izvrtine $D = 81,50 \text{ mm}$, dolžina statorskega paketa $l_{Fe} = 86 \text{ mm}$, inducirana napetost $E_s = 378,8 \text{ V}$, $B_{\max} = 0,7149 \text{ T}$ in $\alpha_{\text{spl}} = 1,361$.

Na začetku izračunamo število utorov na pol in fazo q :

$$q = \frac{Q}{2p m} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3 \quad (3.1)$$

in število utorov na pol Q_p :

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{36}{4} = 9 \quad (3.2)$$

ter širino tuljave Y_Q , ki je za primer enoplastnega navitja enako številu utorov na pol:

$$Y_Q = Q_p = 9 \quad (3.3)$$

Ker je navitje ulomljeno koncentrično, torej delno enoplastno in delno dvoplastno je korak navitja zapisan:

korak : 1 – 7,9

In izračunan povprečni korak:

$$\overline{\text{kor}} \Rightarrow \frac{0,5 \cdot 7 + 1 \cdot 9}{1,5} = 8,33 \quad (3.4)$$

Izračun faktorja navitja (razloženo v poglavju 2.3.3) glede na sliko navitja v razviti obliki (slika 3.2):

$$A = 1 \cos 0^\circ + 1 \cos 20^\circ + 0,5 \cos(-20^\circ) + 0,5 \cos 40^\circ = 2,793 \quad (3.5)$$

$$B = 1 \sin 0^\circ + 1 \sin 20^\circ + 0,5 \sin(-20^\circ) + 0,5 \sin 40^\circ = 0,492 \quad (3.6)$$

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} = 2,836 \text{ enote} \quad (3.7)$$

$$f_n = \frac{\sum_{\text{geom.}} \Theta}{\sum_{\text{arit.}} \Theta} = \frac{2,836}{3} = 0,945 \quad (3.8)$$

Sledi izračun dolžine loka enega pola τ_p :

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 81,50 \cdot 10^{-3}}{4} = 64,01 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.9)$$

in rezultat vstavimo v enačbo za določitev magnetnega pretoka $\hat{\Phi}$:

$$\Phi_g = \bar{B} \tau_p I_{Fe} = \frac{B_{\max}}{\alpha_{\text{spl}}} \tau_p I_{Fe} = \frac{0,7149}{1,361} \cdot 64,01 \cdot 10^{-3} \cdot 86 \cdot 10^{-3} = 2,89 \text{ mVs} \quad (3.10)$$

S pomočjo transformatorske enačbe lahko izračunamo število ovojev ene faze N_s :

$$N_s = \frac{E_s}{4,44 f_n f \Phi_g} = \frac{378,8}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 0,945 \cdot 33,33 \cdot 2,89 \cdot 10^{-3}} = 541,130 \text{ ov} \quad (3.11)$$

Potrebujemo presek statorskega utora A_u , ki ga lahko glede na obliko izračunamo po enačbi:

$$\begin{aligned} A_u &= \frac{1}{2} \pi (R_1^2 + R_2^2) + (H_u - R_1 - R_2)(R_1 + R_2) = \\ &= \frac{1}{2} \pi (3^2 + 2,050^2) + (15,8 - 3 - 2,05)(3 + 2,05) = 75,02 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Izračunamo število vodnikov na fazo z :

$$z = 2N_s = 2 \cdot 541,130 = 1082,26 \text{ ov} \quad (3.13)$$

in število vodnikov na utor z_u :

$$z_u = \frac{m z}{Q} = \frac{3 \cdot 1082,26}{36} = 90,18 \quad (3.14)$$

Število vodnikov mora biti celo število, zato izberemo $z'_u = 90$ vod. S poznanim polnilnim faktorjem navitja $f_{Cu} = 0,35$ v nadaljevanju izračunamo presek žice A_{Cu} in debelino žice d_{Cu} :

$$A_{Cu} = \frac{f_{Cu} A_u}{z_u'} = \frac{0,35 \cdot 75,02}{90} = 0,2917 \text{ mm}^2 \quad (3.15)$$

$$d_{Cu} = \sqrt{\frac{4A_{Cu}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,2917}{\pi}} = 0,61 \text{ mm} \quad (3.16)$$

Iz poznane dolžine statorskega paketa $l_{Fe} = 86 \text{ mm}$ in dolžine glave, ki jo izračunamo po formuli:

$$l_{gl} = (1 + 0,42izr) \tau_p \sqrt{\frac{Y_Q}{Q_p}} + 15 = (1 + 0,42) \cdot 64,01 \cdot \sqrt{\frac{7,33}{9}} + 15 = 97,03 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.17)$$

$$\bar{Y}_Q = \overline{kor} - 1 = 7,33 \quad (3.18)$$

lahko izračunamo dolžino enega vodnika l_v :

$$l_v = l_{gl} + l_{Fe} = 97,03 \cdot 10^{-3} + 86 \cdot 10^{-3} = 183 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.19)$$

Zaradi zaokrožitve števila vodnikov v utoru z_u' posledično zaokrožimo tudi število vodnikov faze $z' = 1082$ in z upoštevanjem dolžine vodnika l_v lahko izračunamo dolžino celotnega navitja ene faze l :

$$l = l_v z' = 183 \cdot 10^{-3} \cdot 1082 = 198 \text{ m} \quad (3.20)$$

in nadalje izračunamo fazno upornost navitja R_f :

$$R_f = \frac{\rho l}{A_{Cu}} = \frac{0,017544 \cdot 198}{0,2917} = 11,91 \Omega \quad (3.21)$$

Izračunani navijalni podatki se uporabijo v analitičnem izračunu, ki je na kratko opisan v nadaljevanju.

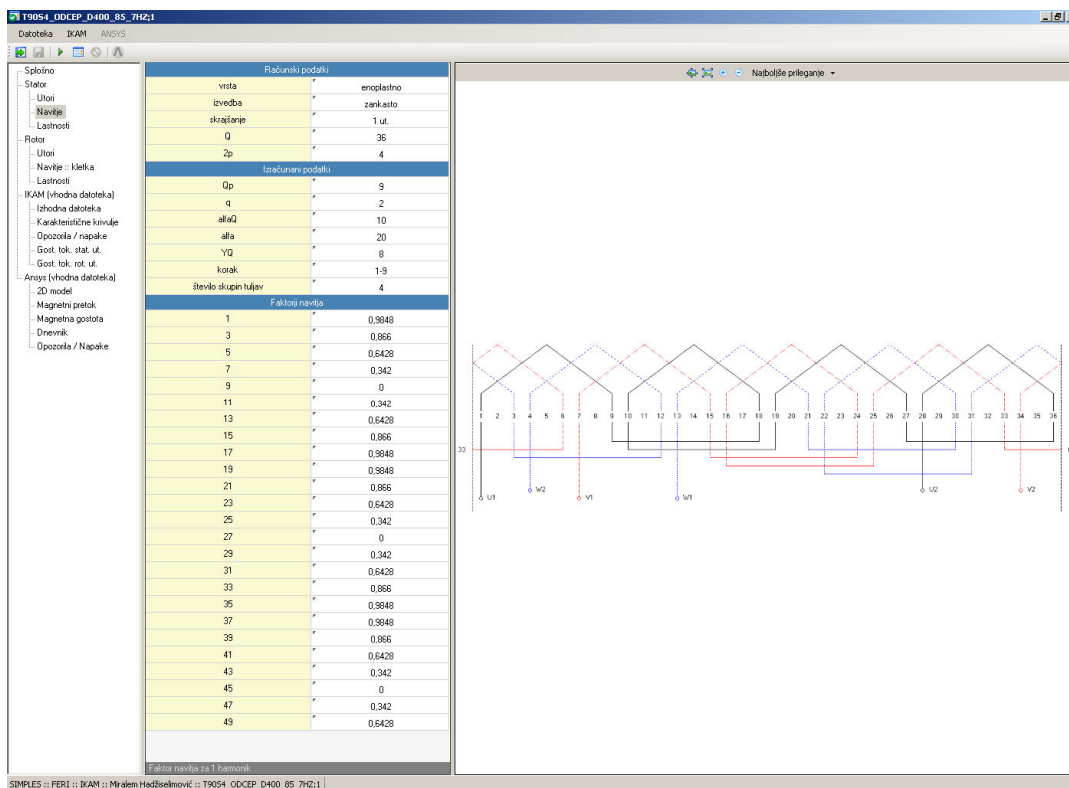
3.3 Analitični izračun

Za analitični izračun motorja se je uporabil programski paket emLook (slika 3.4), s katerim se računajo karakteristike motorjev. V programu izberemo vhodno datoteko, kjer so zapisani vsi podatki geometrije (statorski, rotorski paket, navitje) za izračun in zaženemo analitični izračun. S programom je možno izrisati tudi B-H krivuljo magnetnega materiala, krivuljo

vrtlnege momenta, rotorski in statorski utor. Pri računanju je omogočeno več vrst variranja, kjer lahko spreminjamo naslednje parametre:

- dolžino paketa
- vrtljaje
- pritisnjeno napetost
- slip
- vrtilni moment
- frekvenco
- notranji premer statorja (statorske izvrtine)
- zunanji premer statorja
- presek statorskega utora
- presek rotorskega utora

Z analitičnim izračunom smo preverili ustreznost prototipa testnega motorja in njegovo uporabo za delovanje v širokem področju vrtljajev. Tako smo se odločili izdelati dejanski motor, ki je bil tudi ustrezno izmerjen, kar je predstavljeno v naslednjem poglavju.



Slika 3.4: Okno programskega paketa emLook

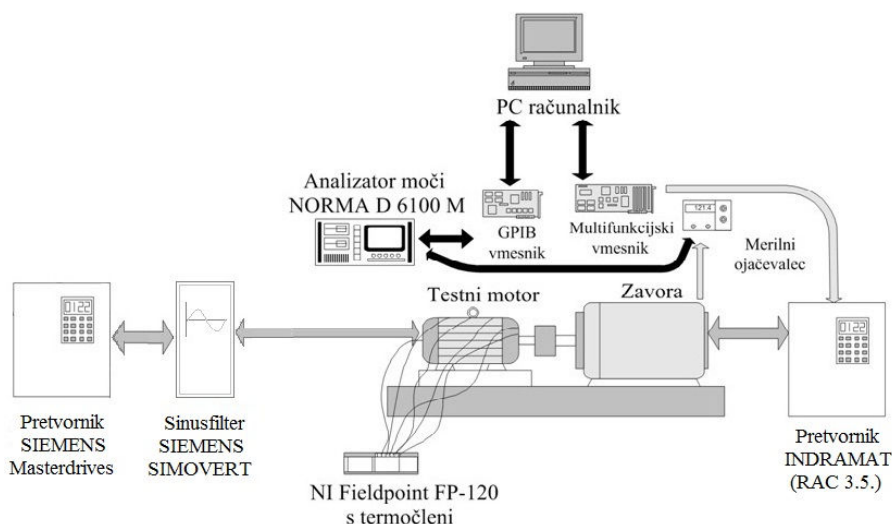
4. Meritve motorja in opis merilnega sistema

Za opravljanje meritev na testnem motorju je potrebno uporabiti ustrezen merilni sistem. Tako bo v tem poglavju predstavljen celoten opis merilnega mesta, načini preskušanja in predstavitev rezultatov meritev.

4.1 Opis merilnega sistema

V tem poglavju sledi celoten opis merilnega sistema in načini preizkušanja, ki so pomembni za analizo testnega motorja.

Merilni sistem za meritve je prikazan na sliki 4.1. Da smo lahko zagotovili spreminjanje napetosti in frekvence smo motor napajali s Siemensovim pretvornikom, tip Masterdrives MC. Pred motor smo vezali sinusni filter proizvajalca Siemens, tip Simovert, s katerim smo zmanjšali izgube v motorju in popačenje napetosti, ki je posledica pulzno širinske modulacije pretvornika. Aktivna zavora omogoča obremenitev merjenega motorja in je sestavljena iz asinhronskega stroja, senzorja vrtilnega momenta in merilca hitrosti vrtenja. Aktivna zavora je napajana s pretvornikom Indramat, tip RAC 3.5., ki omogoča spreminjanje vrtiljajev ali vrtilnega momenta na gredi testnega motorja. Pri meritvi segrevanja motorja smo v merilni sistem vključili tudi instrument (NI Fieldpoint FP-120) s termočleni, ki v notranjosti in na ohišju merijo temperaturo testnega motorja.



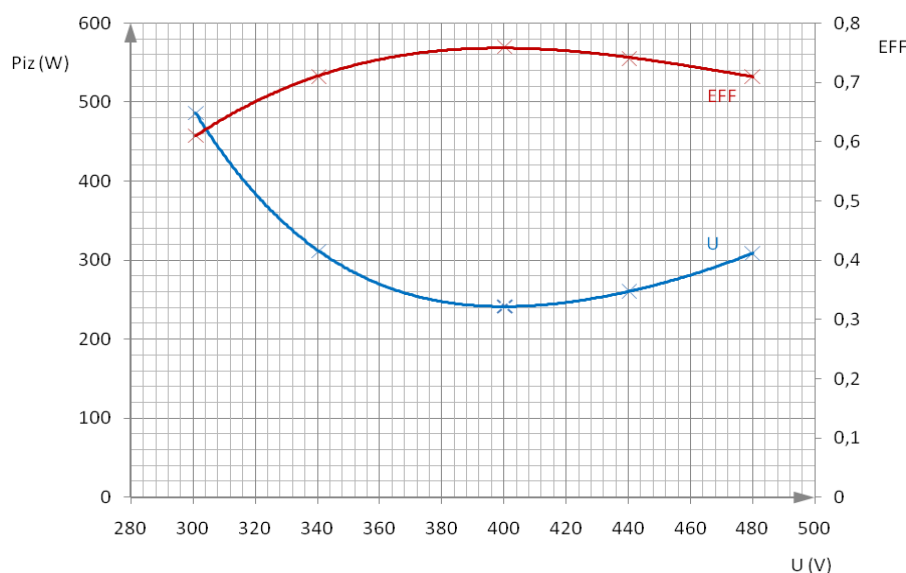
Slika 4.1: Merilni sistem

Z analizatorjem moči lahko merimo električne in mehanske veličine, kot so tok, napetost, moč, vrtljaji in vrtilni moment. Nadaljno analizo lahko opravimo s pomočjo osebnega računalnika skupaj s programskim paketom Motor.exe, ki predstavlja nadzorno enoto celotnega merilnega sistema. Analizator moči in drugi instrumenti so povezani preko GPIB vodila s osebnim računalnikom, kateri omogoča shranjevanje in analizo izmerjenih podatkov.

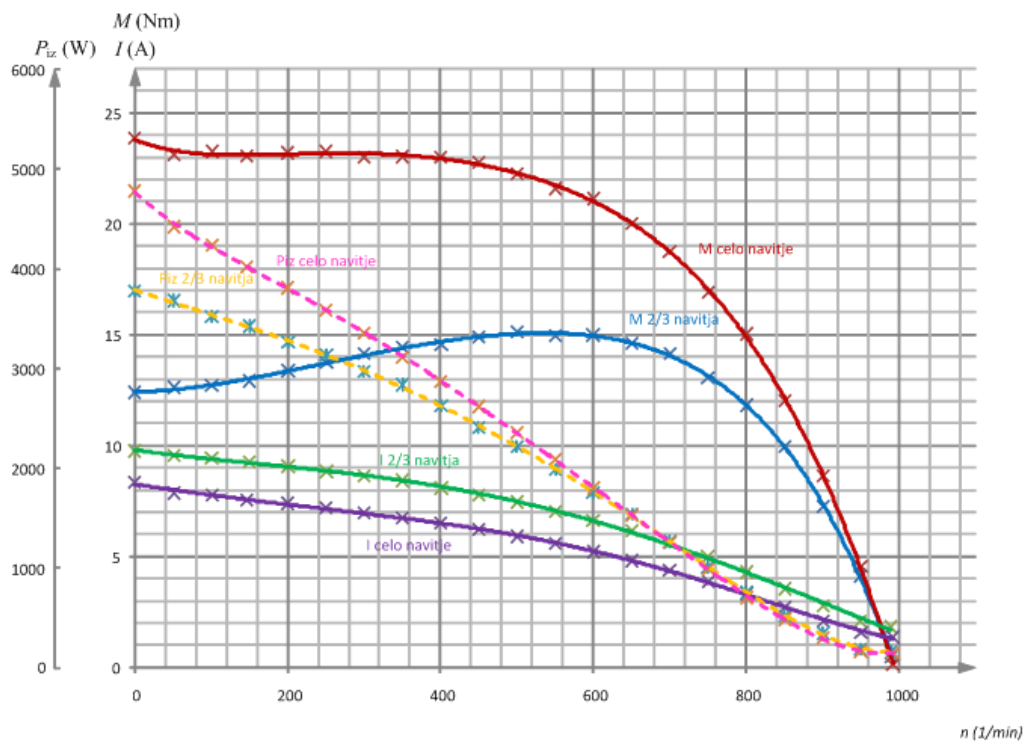
4.2 Rezultati meritev v vezavi zvezda

4.2.1 S sinusnim izvorom

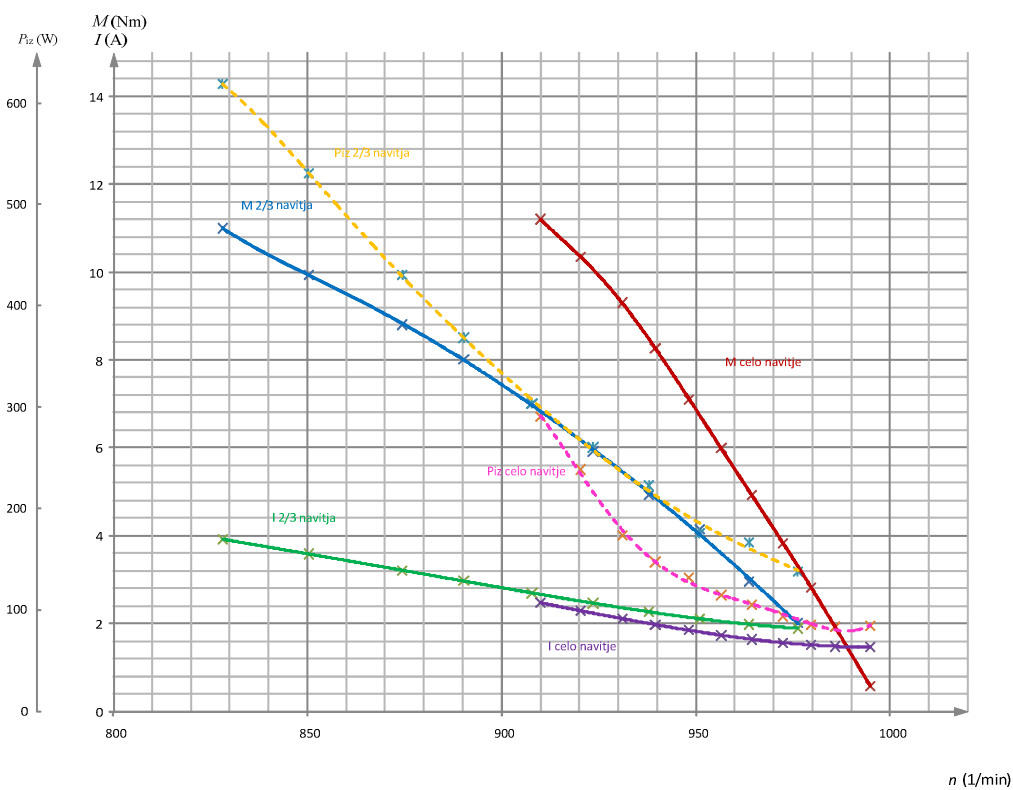
Meritev je bila opravljena na rotacijski elektrarni pri nazivni frekvenci testnega motorja 33 Hz in pri napetosti 400V. Po priklopu motorja na merilni sistem, ki je opisan v poglavju 4.1, smo kot prvo meritev opravili test optimalne napetost, s katero izmerimo napetost, pri kateri ima motor najmanjše izgube P_{iz} ter največji izkoristek η pri konstantni oddani moči na gredi motorja. Izvajali smo jo tako, da smo pri nazivni oddani moči priključili vir spremenljive napetosti konstantne frekvence ter jo spreminjali od 1,2 do 0,8 U_N . Izmerjene veličine izrišemo na graf ter pri najmanjših izgubah odčitamo vrednost napetosti (slika 4.2). Ugotovili smo, da je optimalna napetost 400 V. Kot drugi test smo naredili meritev momenta, pri kateri smo spreminjali vrtljaje, napetost pa držali konstantno. Meritev smo opravili na celotnem navitju, kakor tudi na odcepu. Na sliki 4.3 so prikazani odzivi vrtilnega momenta, izgub in toka. Opravili smo še meritev obremenitve testnega motorja, pri kateri smo po korakih spreminjali moment (slika 4.4) in meritev prostega teka motorja. Z meritvijo obremenitve dobimo vrednosti o nazivnem toku, izkoristku in mehanski moči. Prav tako smo izmerili na celotnem navitju in na odcepu.



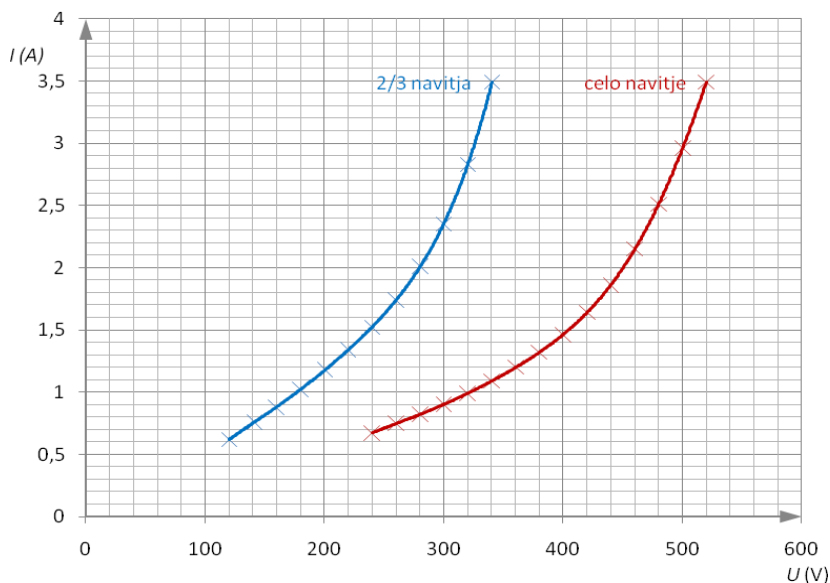
Slika 4.2: Meritev optimalne napetosti



Slika 4.3: Karakteristike vrtilnega momenta in toka



Slika 4.4: Vrtilni moment, tok in izgube v odvisnosti od frekvence pri meritvi obremenitve



Slika 4.5: Tok v odvisnosti od napetosti v prostem teku

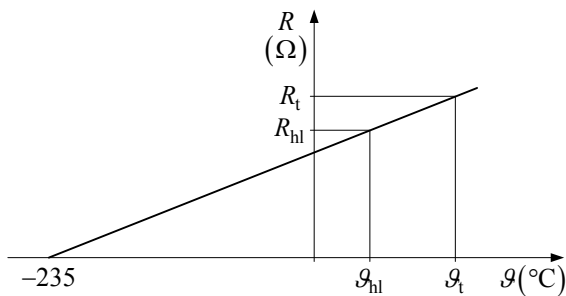
4.2.2 Meritev segrevanja s pretvornikom

Termični preizkus motorja opravimo iz razloga, da določimo izgube motorja, ki povzročajo segrevanje motorja. Iz meritve bomo določili zgornjo vrednost izgub, za katere bo še segrevanje navitja dopustno. Pri preizkusu motor priključimo na nazivno napetost in ga obremenimo z nazivno močjo. Meritev se opravlja dokler se ne doseže termično ravnovesje. Termično ravnovesje pa je stanje, ko se nadtemperature na motorju ne spremenijo za več kot 2 K na uro [3],[4].

Merjenje temperature navitja in drugih delov stroja lahko merimo po sledečih metodah:

- metoda merjenja upornosti,
- termometrijska metoda in
- metoda vgrajenih temperaturnih tipal.

V tej diplomski nalogi je uporabljena prva in tretja metoda. Temperatura navitja se pri metodi merjenja upornosti določi iz porasta ohmske upornosti navitja. Ohmsko upornost R_{hl} izmerimo na nepriključenem hladnem motorju pred meritvijo pri temperaturi okolice ϑ_{hl} . Po koncu meritve motor zavremo in spet izmerimo upornost navitja, ki se je segrelo do končne upornosti R_t .



Slika 4.6: Spreminjanje upornosti bakrenega navitja v odvisnosti od temperature

Iz zgornje slike (slika 4.2) lahko izpeljemo enačbo, po kateri izračunamo absolutno temperaturo navitja ϑ_t :

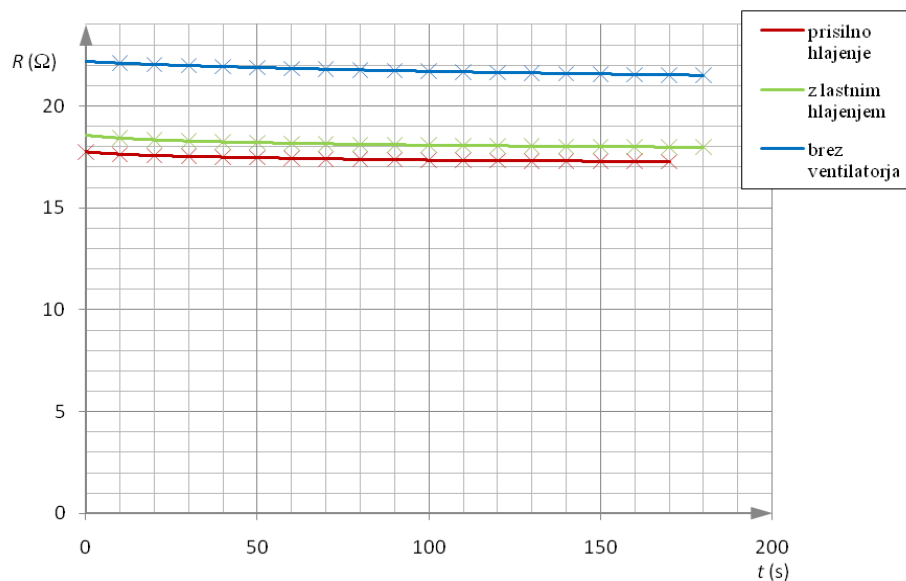
$$\vartheta_t = \frac{R_t}{R_{hl}}(\vartheta_{hl} + 235) - 235 \quad (4.1)$$

Standard [3],[4] priporoča, da se lahko upornost izmerjena v 30 sekundah po izklopu napajanja uporabi za določitev temperature stroja do 50 kW nazivne moči. Pri meritvi na našem testnem motorju smo po izklopu napajanja v 10 s izmerili upornost navitja. Iz ugotovitve, da se takoj po izklopu napajanja navitje motorja začne ohlajati, pomeni, da je temperatura izračunana po enačbi (4.1) manjša od dejanske v času izklopa napajanja ($t = 0$ s). Zato izmerimo upornost v intervalu 10 s od izklopa napajanja do zadnje merjene točke v času 180 s po izklopu.

Preizkus segrevanja smo opravljali na sledeče načine:

- brez ventilatorja,
- z lastnim ventilatorjem
- in prisilnim (tujim) hlajenjem.

Izmerjene vrednosti so prikazane na sliki 4.3.



Slika 4.7: Ekstrapolacija izmerjenih vrednosti s polinomom v času izklopa ($t = 0$ s)

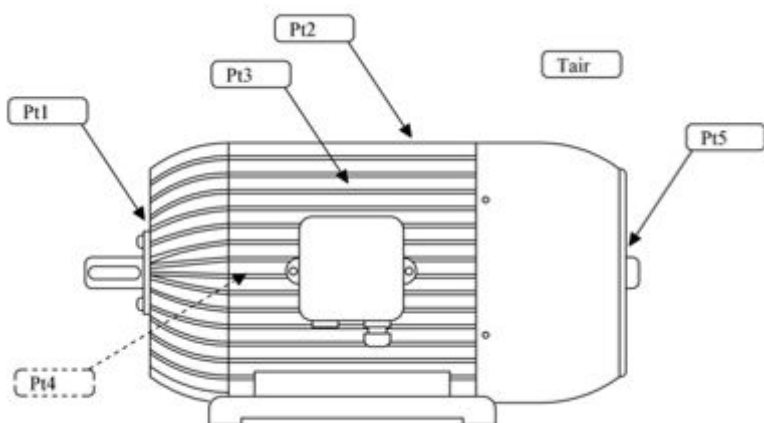
Pri drugem načinu določanja temperature navitja po metodi vgrajenih temperaturnih tipal pa smo uporabili instrument NI Fieldpoint FP-120, na katerega so priključeni termočleni. Instrument je povezan z osebnim računalnikom, ki je s pomočjo programskega paketa Motor.exe odčitaval izmerjene temperature vsakih 5 sekund in jih shranjeval v merilno datoteko z rezultati.

Tabela 4.1: Primerjava segrevanja glede na način hlajenja

	Pt1	Pt2	Pt3	Pt4	Pt5	Pt7	Pt8	Tair	P _{iz} (W)
brez ventilatorja (°C)	88,63	107,15	103,7	105,97	100,21	121	121	23,51	270
lastno hlajenje (°C)	47,91	47,45	48,32	47,45	38,51	60,55	61,55	21,7	270
prisilno hlajenje (°C)	34,56	34,31	36,4	35,15	30,64	49	49,63	22,3	570

Termočleni so bili razporejeni na ohišju motorja in v njegovi notranjosti (navitje) glede na sliko 4.8. Merilna mesta so bila:

- Pt1 - ohišje ležaja A stran
- Pt2 - na vrhu med rebri
- Pt3 - stran motorja nad omarico
- Pt4 - stran motorja med rebri
- Pt5 - ležajni ščit B stran
- Tair - okolica
- Pt7 - glava navitja prve faze
- Pt8 - glava navitja druge faze



Slika 4.8: Pozicija termočlenov na ohišju motorja

Na koncu segrevanja smo rezultate analizirali in izvedli primerjavo med obema metodama za temperaturo $\vartheta_{hl} = 20,5 \text{ }^\circ\text{C}$ statorskega navitja (tabela 4.2).

Tabela 4.2: Primerjava rezultatov segrevanja zgoraj opisanih metod

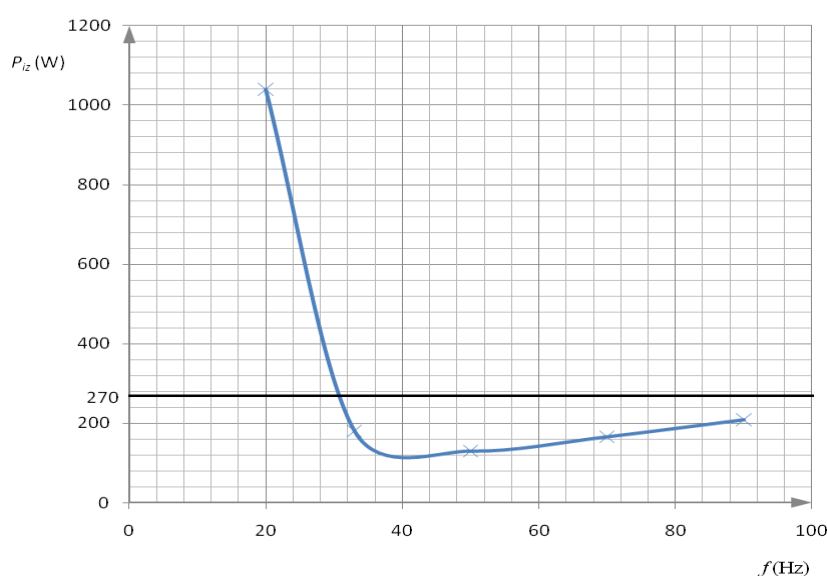
	metoda merjenja upornosti ($^\circ\text{C}$)	metoda vgrajenih tipal ($^\circ\text{C}$)	P_{iz} (W)
brez ventilatorja	117,7	121	270
lastno hlajenje	60	61,55	270
prisilno (tuje) hlajenje	47,15	49,63	570

Po preizkusih segrevanja smo ugotovili, da je za testni motor brez hlajenja z ventilatorjem pri izgubah $P_{iz} = 270 \text{ W}$, še dopustno segrevanje, kar vidimo iz tabele 4.2.

4.2.3 Meritev obratovalnih karakteristik čez celotno frekvenčno področje

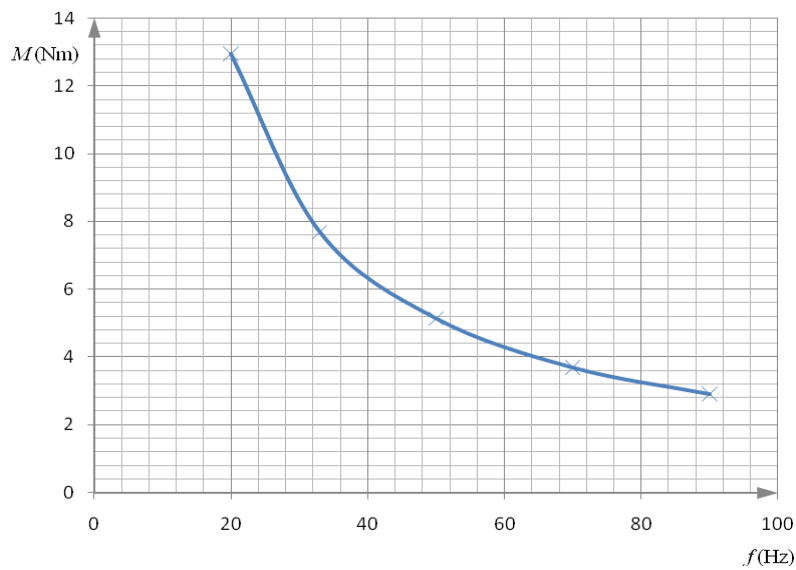
Obratovalne karakteristike smo merili s pretvornikom tako, da smo imeli na vhodu v pretvornik priključeno konstantno napetost 440 V. Dvig napetosti na vhodu pretvornika je bil

izveden zato, ker se zaradi vzolžnih padcev v vezju pretvornika napetost na izhodu pretvornika glede na vhod ustrezno zmanjša. Frekvenco smo spreminjali po korakih, za vsako frekvenco pa smo naredili meritev obremenitve, kjer smo spreminjali vrtilni moment. Iz dobljene obremenilne karakteristike za vsako posamezno frekvenco smo odčitali vrednosti pri nazivni moči motorja, ki so prikazane na spodnjih slikah. Glede na graf izgub (slika 4.9) ugotovimo, da bi vezava zvezda Y bila uporabna od frekvence 30 Hz – 90 Hz. Namreč iz meritve segrevanja smo ugotovili, da se motor pri $P_{iz} = 270$ W greje v skladu z razredom izolacije vodnika statorskega navitja.



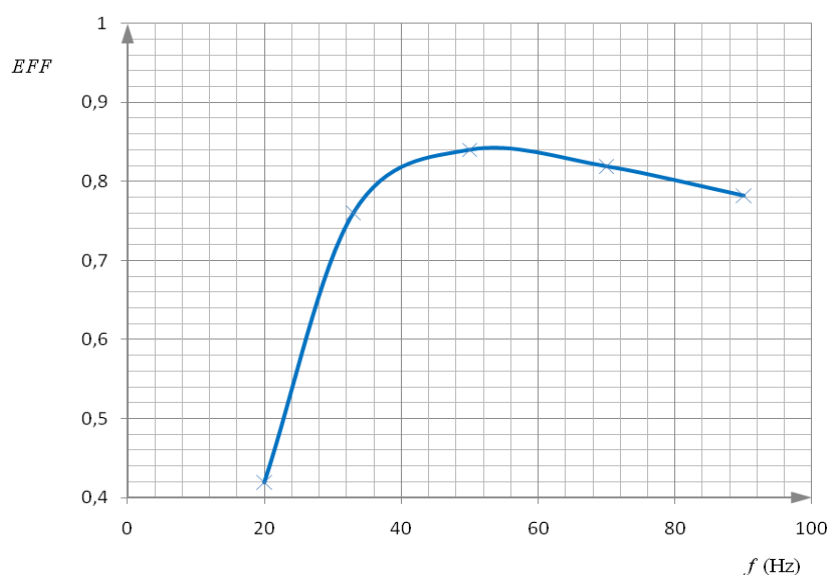
Slika 4.9: Izgube v vezavi zvezda (Y) v odvisnosti od frekvence

Nadalje smo izrisali krivuljo vrtilnega momenta v odvisnosti od frekvence. Pri višanju frekvence smo ugotovili, da zaradi konstantne vrednosti napajalne napetosti vrtilni moment pada z naraščanjem frekvence (slika 4.10).



Slika 4.10: Karakteristika vrtilnega momenta v vezavi zvezda (Y) v odvisnosti od frekvence

Tudi izkoristek se bistveno spreminja glede na frekvenco. Iz slike 4.11 je razvidno, da je uporabno področje testnega motorja v področju od 33 Hz do 90 Hz.

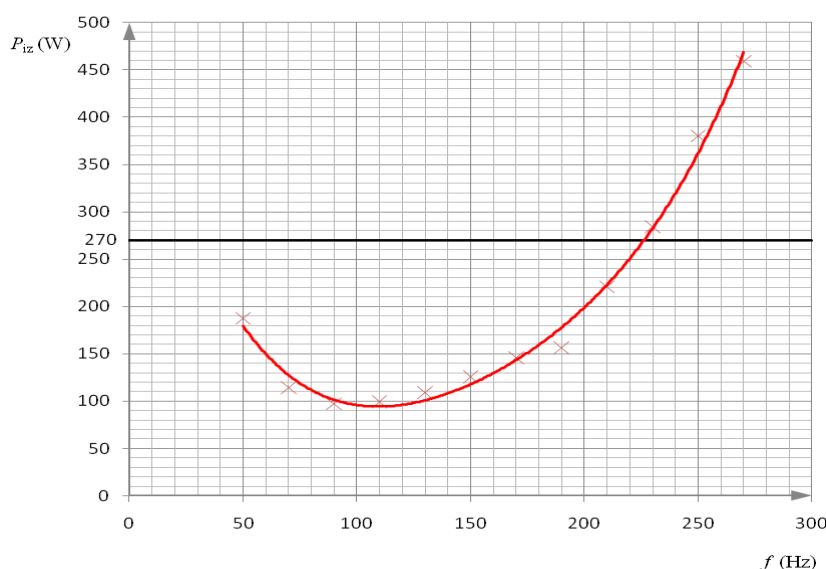


Slika 4.11: Izkoristek v vezavi zvezda (Y) v odvisnosti od frekvence

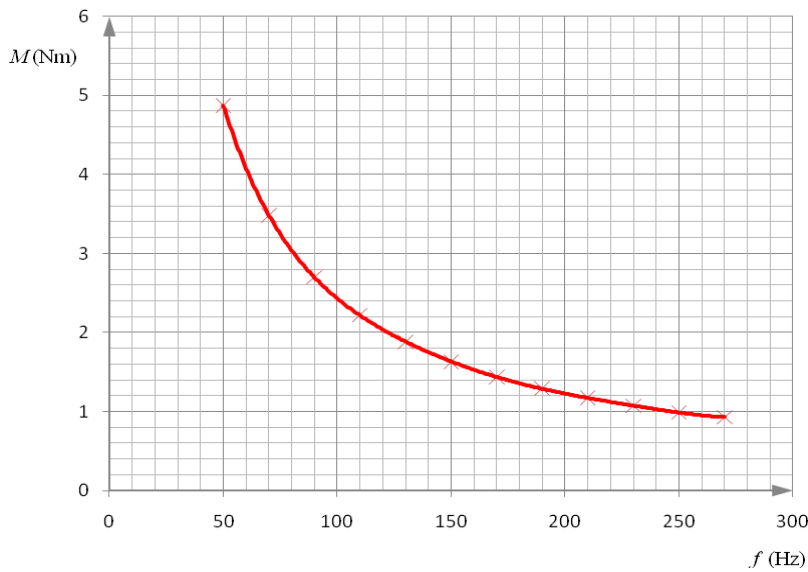
4.3 Rezultati meritev v vezavi trikot

Tako kot v vezavi zvezda, smo tudi v vezavi trikot pri meritvi obratovalnih karakteristik spreminjali frekvenco, vendar pa je vezava trikot pokrila širše frekvenčno področje, preden je motor omahnil. V vezavi trikot je pri meritvah bilo uporabljeno celotno navitje skladno s sliko 3.2. Prav tako smo frekvenco spreminjali po korakih, za vsako frekvenco pa smo naredili meritev obremenitve s spreminjanjem vrtilnega momenta bremena. Iz dobljene karakteristike vsake posamezne frekvence smo odčitali vrednosti pri nazivni moči motorja. Na sliki 4.12 so prikazane izgube, kjer vidimo da bi motor v tej vezavi bil uporaben do 225 Hz. Iz karakteristike vrtilnega momenta pri nazivni moči motorja (slika 4.13) in karakteristike izkoristka (slika 4.14) vidimo, da se potrди teorija iz poglavja 2.

Prav tako kot v vezavi zvezda Y smo primerjali velikost izgub P_{iz} v vezavi trikot Δ . Kot je bilo zapisano ugotovimo iz slike 4.12, da je uporabno frekvenčno področje do 225 Hz.

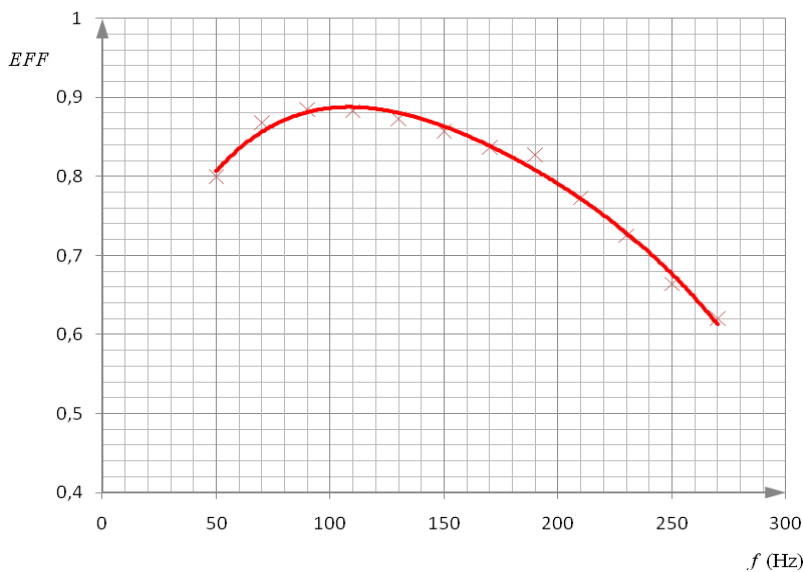


Slika 4.12: Izgube v vezavi trikot (Δ) v odvisnosti od frekvence



Slika 4.13: Karakteristika vrtilnega momenta v vezavi trikot (Δ) v odvisnosti od frekvence

Na sliki 4.14 je prikazana karakteristika izkoristka v odvisnosti od frekvence. Pri frekvenci 225 Hz je izkoristek še nekaj večji od 70%, kar je sprejemljivo za tovrsten motor.

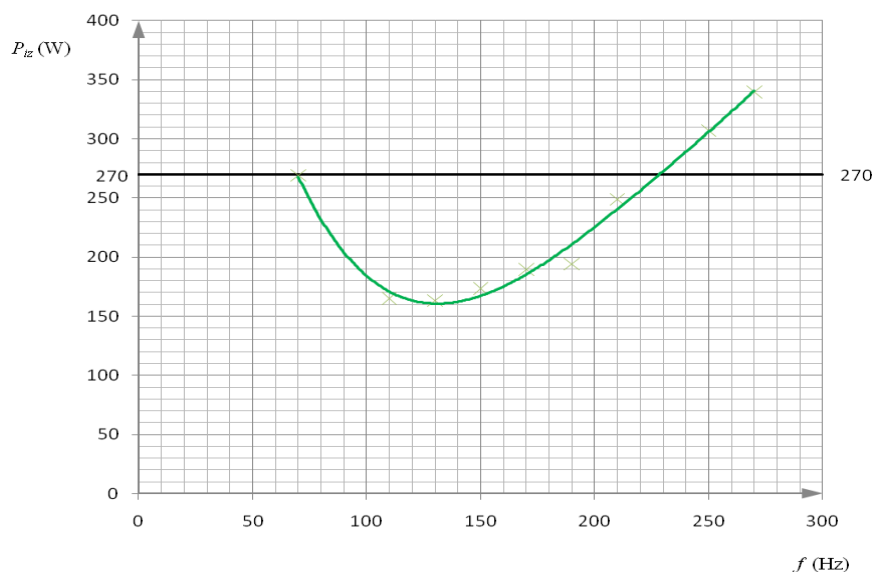


Slika 4.14: Izkoristek v vezavi trikot (Δ) v odvisnosti od frekvence

4.4 Meritev rezultatov v vezavi trikot z odcepom (Δ -o)

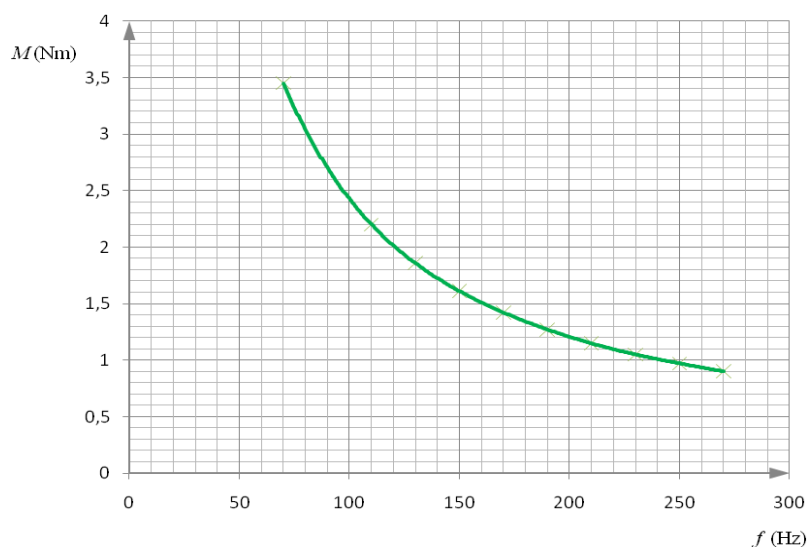
Merili smo na enak način kot v vezavi trikot (Δ) na celem navitju, le da smo motor prevezali na odcep (Δ -o). Odcep motorja je narejen na $2/3$ celotnega navitja skladno s sliko 3.3. Pri

meritvi smo ustrezno številom ovojev zmanjšali napetost na 270 V in naredili enake meritve kot v točki 4.3.



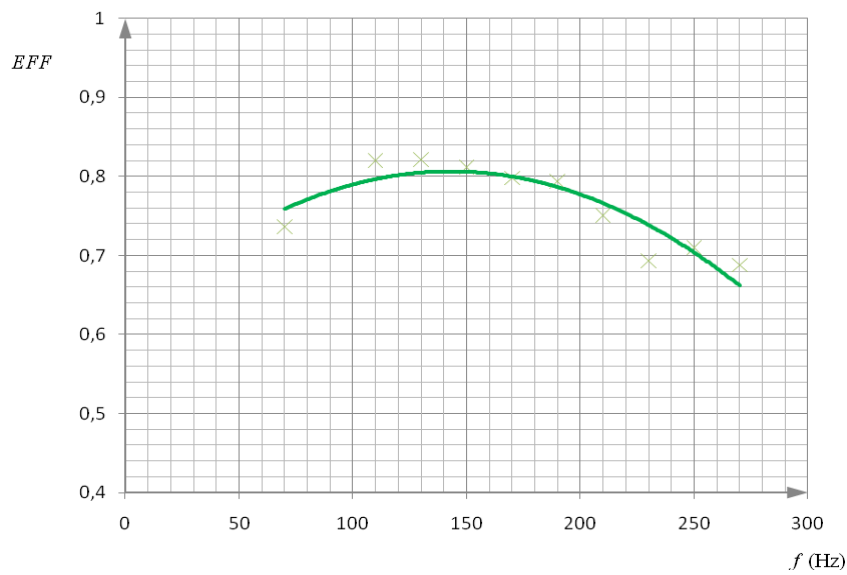
Slika 4.15: Izgube v vezavi trikot z odcepom (Δ -o) v odvisnosti od frekvence

Tako kot v vezavi (Y) in v vezavi trikot (Δ) smo tudi za vezavo trikot z odcepom izrisali krivuljo vrtilnega momenta v odvisnosti od frekvence. Pri povečevanju frekvence smo ugotovili, da zaradi konstantne vrednosti napajalne napetosti vrtilni moment pada z naraščanjem frekvence (slika 4.16).



Slika 4.16: Karakteristika vrtilnega momenta v vezavi trikot z odcepom (Δ -o) v odvisnosti od frekvence

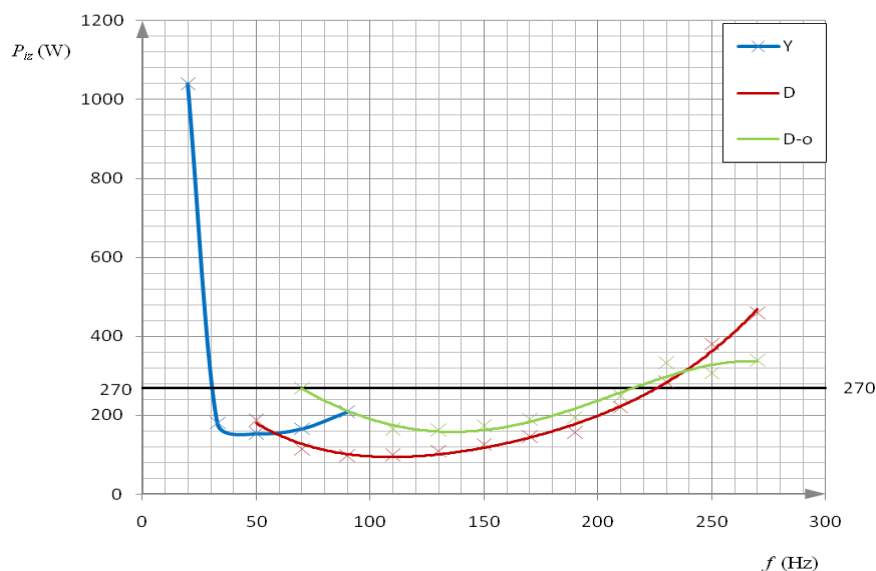
Slika 4.17 prikazuje izkoristek motorja v vezavi trikot z odcepom (Δ -o). 70% izkoristek smo izmerili pri frekvenci 250 Hz, kar je nekaj več kot v vezavi trikot (Δ).



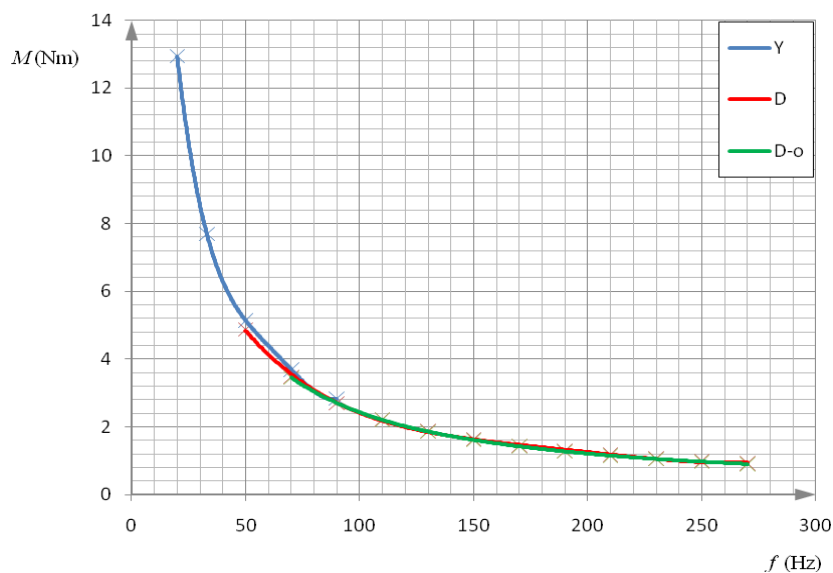
Slika 4.17: Izkoristek v vezavi trikot z odcepom (Δ -o) v odvisnosti od frekvence

5. Primerjava rezultatov

V tem poglavju so predstavljene primerjave rezultatov meritev izgub, momenta, izkoristka in slipa za vezavo zvezda, trikot in trikot z odcepom.



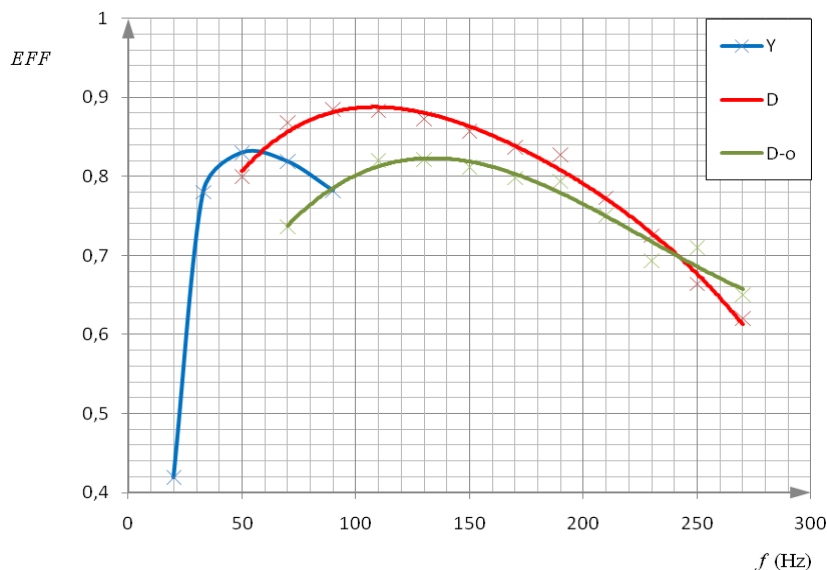
Slika 5.1: Karakteristika izgub vseh treh vezav



Slika 5.2: Graf odvisnosti momenta od frekvence

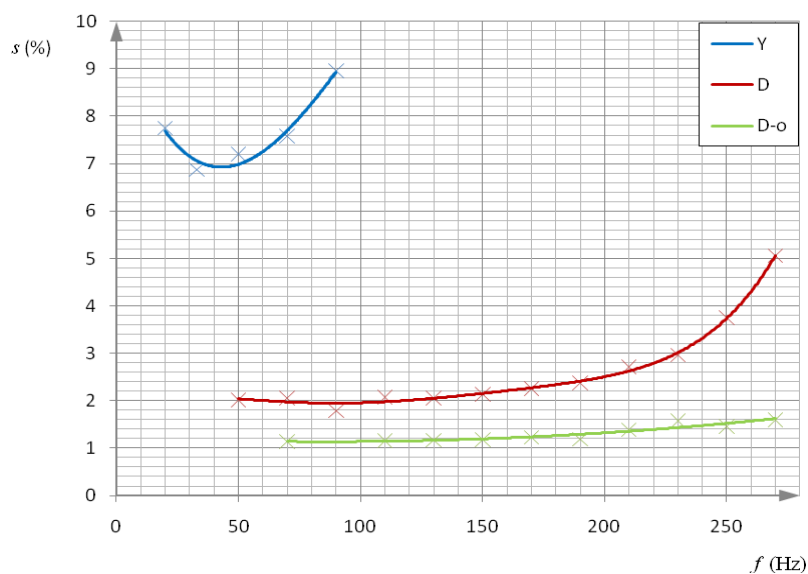
Slika 5.3 nam prikazuje karakteristiko izkoristka čez celotno frekvenčno področje za vse tri izmerjene vezave. Iz karakteristik vidimo, da je v frekvenčnem področju od 33 - 90 Hz

uporabna vezava zvezda, od 90 – 250 Hz pa vezava trikot z odcepom, saj je ugodnejša od vezave trikot, ker ima pri večanju frekvence nad 270 Hz manjše izgube.



Slika 5.3: Graf izkoristka čez celotno področje

Iz slike 5.4 vidimo, da je vrednost slipa bistveno različna za posamezne vezave. Večji slip pomeni, da je večji delež izgub.



Slika 5.4: Graf slipa v odvisnosti od frekvence

6. Zaključek

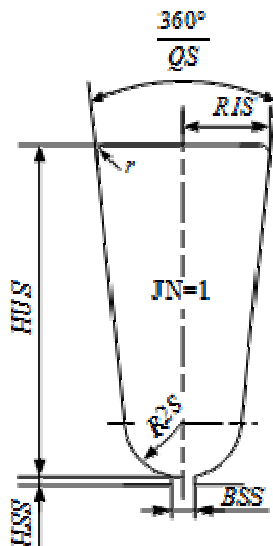
V diplomski nalogi so obravnavane tri različne vezave statorskega navitja asinhronskega motorja. Za vse tri vezave so izvedene meritve z namenom določiti ugodno frekvenčno področje. Pri opravljanju meritev smo bili omejeni na maksimalno število vrtljajev (8000 1/min). Prototip testnega motorja namreč ni ustrezno mehansko izdelan za obratovanje nad maksimalnim številom vrtljajev. Tako v celoti nismo uspeli pokazati, da je vezava trikot z odcepom (Δ -o) ustrežnejša v frekvenčnem področju nad maksimalnim številom vrtljajev. Iz primerjave rezultatov pa je razvidno, da so pri višanju frekvence nad 270 Hz izgube v vezavi trikot z odcepom (Δ -o) manjše od vezave trikot (Δ). V prihodnosti bi veljalo izdelati prototip asinhronskega motorja, ki bi lahko deloval tudi pri frekvencah vse tja do 350 Hz. Na tak način bi bilo mogoče ustrezno ovrednotiti prednost posamezne vezave statorskega navitja.

7. Literatura

- [1] Ivan Zagradišnik, Bojan Slemnik, Električni rotacijski stroji, Univerza v Mariboru Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor 2007
- [2] Mladen Trlep, Električni pogoni, Univerza v Mariboru Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor 2005/2006
- [3] IEC Standard, Publication 34-1, Rotating electrical machines, Part 1: Rating and performance, Geneve, Suisse,
- [4] IEC Slovar 50(411), Druga izdaja: Rotacijski stroji, Geneve, Suisse,
- [5] Fanuc catalog

8. Priloge

Priloga št. 1: Oblika statorskega utora.



Priloga št. 2: Računalniški izpis rezultatov analitičnega izračuna testnega motorja
ELKOSTROJ 2M 90 L4

```

                                T90S4_Y400_33Hz
-CH
UNI MARIBOR                    2009.11.11  -----
IVO                             IZRACUN TRIFAZ. MOTORJEV  T 90 S4_v  STRAN 1
                                -----

OPOMBE:

NAZ. PODAT.    DIMENZIJE                PODATKI ZA NAVITJE ST.    1.001.
-----
P2   750.  QS  36.  HSS  .50  SG  44271.  KSI1  .945*  LS1  120.

U   400.0  QR  28.  BSS  2.00  STIK  Y  DCU11  .610  LCUS  206.*

I   2.80  DEL  .310  HSR  .50  ZU  1x 90.0  DCU12  .000  PREVS  57.0

COSF  .800  KC  1.256*  BSR  1.00  Z1  1080.*  DCU13  .000  X1  .732E+01*

VRT   900.  LM1  1.04*  R1R  2.050  KOR  1- 8.3  STPV1  1.  X2  .730E+01*

FREK  33.3  LM2  1.21*  R2R  1.000  FCU  .350*  ACU  .2926*  R1  .133E+02*

ETA  .700  DZ  135.0  HR  9.45*  Q1  3.00*  GCU1  1.74*  R2  .102E+02*

MZMN  2.40  D  81.50  DR  80.88*  NDCU1  1.  NDCU2  0.  LS  .769E+02*

MOMN  2.70  DI  30.5  AS  75.2*  ROT. KLETKA  RAZNO
-----
IZIN  4.70  L  86.0  AR  37.2*  HSR2  .00  HOB  14.50*  KFE  .96

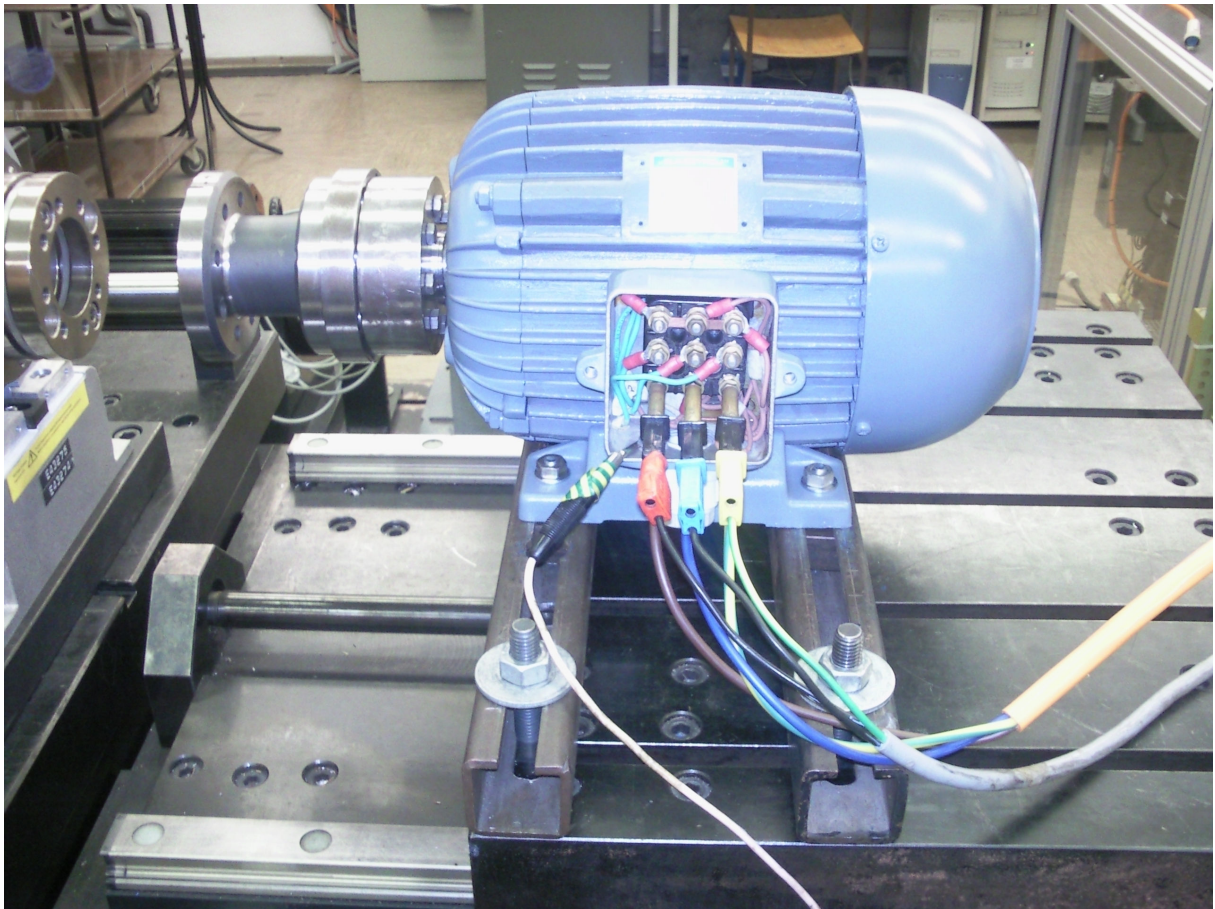
2P   4.  R1S  3.000  BMZS  3.43*  BSR2  .00  BOB  10.00*  KRIV  3

R2S  2.050  BMZR  4.37*  HSR3  .00  DOB1  80.0  TST  80.

HS  10.75*  HJS  11.01*  GFES  4.1*  DOB2  51.0  TROT  105.

```

Priloga št. 2: Slika prototipa testnega motorja ELKOSTROJ 2M 90 L4



Priloga št. 4: Računalniški izpis meritve obremenitve s pretvornikom v vezavi zvezda Y pri nazivni frekvenci 33,3 Hz

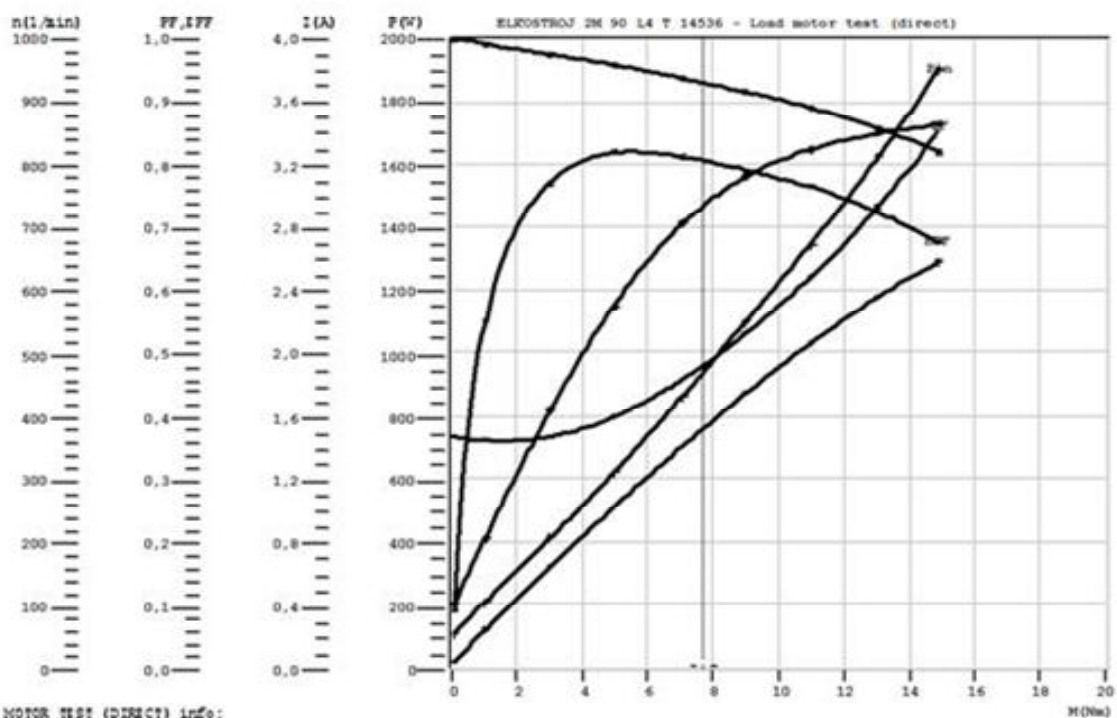
FERI Maribor, Laboratory for electric machines

26.05.2010 09:18

ELNOSTROJ, 3p asynchronous, type: 2M 90 L4, Ser. no. T 14536
 SI, Insul. cl.: F, Mech. pr.: IP54, Cool. media: Air, No. of turns: N/A
 Y 400V 2,0A 0,750kW 930 1/min 33Hz p=2
 Motor comment: Ru12=2,455ohm, Ru13=7,997ohm, Ru23=5,551ohm
 Rv12=2,449ohm, Rv13=7,996ohm, Rv23=5,561ohm
 Rw12=2,445ohm, Rw13=7,984ohm, Rw23=5,549ohm
 Temperatura oševica 20,4 °C

CONTROLLER SETTINGS:

Controller: NO, Param. listing: N/A, Contr. type: N/A, Software: , Param. date: N/A



LOAD MOTOR TEST (DIRECT) info:

Measured by: N/A, Started: 26.05.2010 12:27:13, Ended: 26.05.2010 12:33:39, Test duration: 0:06:25

Comment: Y-Preizkus obremenitve s pretvornikom U=400V, f=33Hz

LOAD MOTOR TEST (DIRECT) MEASURED AND CALCULATED VALUES:

Time	U(V)	I(A)	Pin(W)	FF	f(%)	M(Nm)	n(l/min)	s(%)	P(W)	FF Ploss(W)	FF Ploss(W)
1. 12:31:11	373,1	3,42	1906	0,863	33,337	14,930	822,1	17,798	1287,1	0,675	619,0
2. 12:31:27	376,3	2,93	1623	0,851	33,339	13,060	858,4	14,172	1174,0	0,723	449,2
3. 12:31:49	380,6	2,48	1345	0,822	33,338	11,040	890,3	10,982	1029,3	0,765	315,6
4. 12:32:03	385,0	2,12	1097	0,781	33,337	9,020	916,2	8,988	865,4	0,789	231,4
5. 12:32:22	385,4	1,82	858	0,707	33,340	7,090	937,9	8,225	696,4	0,812	161,4
6. 12:32:37	390,1	1,59	613	0,572	33,340	5,010	958,8	4,143	503,0	0,821	109,6
7. 12:32:56	393,7	1,45	404	0,407	33,340	3,030	976,5	2,373	309,8	0,767	93,9
8. 12:33:15	400,7	1,43	200	0,201	33,337	1,060	992,0	0,810	110,1	0,552	89,4
9. 12:33:31	404,3	1,46	98	0,096	33,341	0,080	999,2	0,107	8,4	0,085	90,0

LOAD MOTOR TEST (DIRECT) RATED VALUES:

Rated from: Approximation, Algorithm: Givens, Poly order: 6

U(V)	I(A)	Pin(W)	FF	M(Nm)	n(l/min)	P(W)	FF Ploss(W)
385,0	1,91	930	0,732	7,69	931,3	750,0	0,806 180,5

LOAD MOTOR TEST (DIRECT) TEMPERATURES AND RESISTANCES:

Rz(Ohm)	Tz(°C)	Rt(Ohm)	Tt(°C)
16,7900	20,40	17,6800	33,94

Priloga št. 5: Računalniški izpis meritve obremenitve s pretvornikom v vezavi trikot Δ pri frekvenci 190 Hz

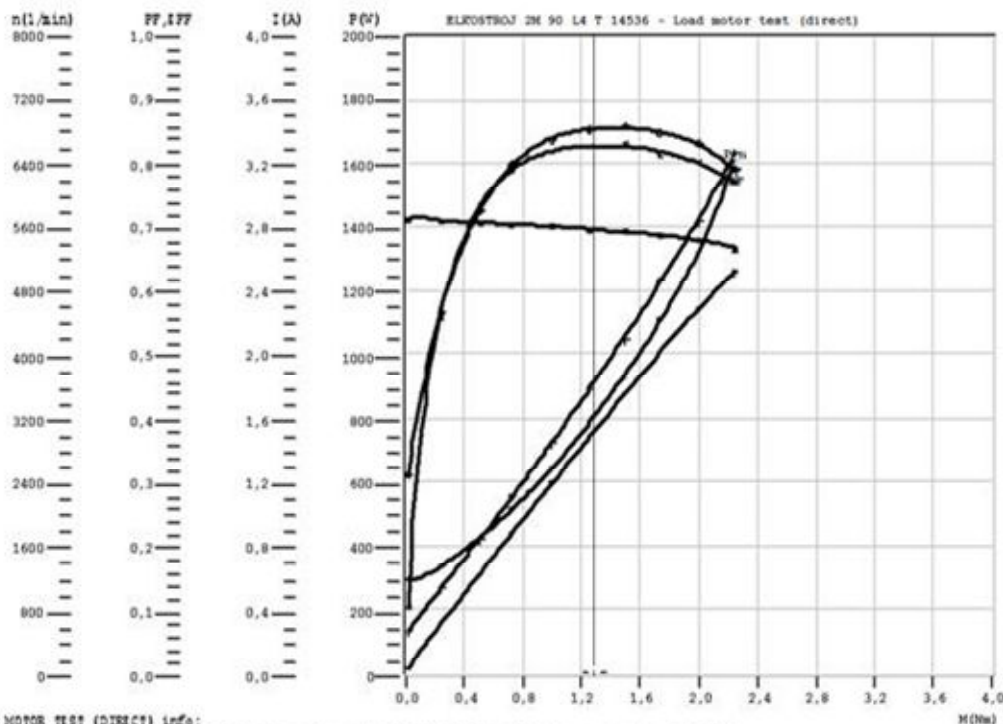
FERI Maribor, Laboratory for electric machines

26.05.2010 09:33

ELKOSTROJ, 3p asynchronous, type: 2d 90 L4, Ser. no. T 14536
 sl, Inval. cl.: F, Mech. pr.: IP54, Cool. media: Air, No. of turns: N/A
 Y 400V 2,0A 0,750kV 930 1/min 3Hz p=2
 Motor comment: Ru1=2,435ohm, Ru2=7,997ohm, Ru3=3,551ohm
 Rr1=2,449ohm, Rr2=7,996ohm, Rr3=5,561ohm
 Rl1=2,445ohm, Rl2=7,984ohm, Rl3=5,549ohm
 Temperatura oljnice 20,4 °C

CONTROLLER SETTINGS:

Controller: NO, Param. listing: N/A, Contr. type: N/A, Software: , Param. date: N/A



LOAD MOTOR TEST (DIRECT) info:

Measured by: N/A, Started: 26.05.2010 14:41:25, Ended: 26.05.2010 14:45:46, Test duration: 0:04:21
 Comment: D-Freizius obremenitve s pretvornikom U=440V, f=190Hz

LOAD MOTOR TEST (DIRECT) MEASURED AND CALCULATED VALUES:

Time	U(V)	I(A)	Pin(W)	PF	f(Hz)	M(Nm)	n(1/min)	s(%)	P(W)	IFF	Ploss(W)
1. 14:42:52	370,0	3,22	1633	0,791	190,052	2,250	5336,8	6,397	1257,5	0,770	375,9
2. 14:43:16	374,9	2,63	1417	0,831	190,035	2,000	5433,7	4,689	1138,0	0,803	278,8
3. 14:43:29	377,0	2,22	1229	0,848	190,028	1,740	5488,7	3,721	1000,1	0,814	228,9
4. 14:43:43	381,8	1,84	1045	0,857	190,034	1,500	5535,9	2,896	869,6	0,832	175,7
5. 14:44:10	384,3	1,57	890	0,854	190,036	1,260	5568,0	2,334	734,7	0,826	154,9
6. 14:44:25	388,1	1,27	717	0,838	190,054	1,000	5600,4	1,775	586,5	0,818	130,8
7. 14:44:39	389,1	1,02	546	0,798	190,044	0,730	5627,9	1,288	430,2	0,788	116,0
8. 14:45:06	394,4	0,83	410	0,725	190,032	0,510	5650,0	0,894	301,8	0,736	108,1
9. 14:45:31	398,7	0,66	256	0,565	190,058	0,240	5672,4	0,514	142,6	0,557	113,2
10. 14:45:39	404,0	0,56	121	0,307	190,031	0,020	5691,0	0,174	11,9	0,099	108,7

LOAD MOTOR TEST (DIRECT) RATED VALUES:

Rated from: Approximation, Algorithm: Givens, Poly order: 6

U(V)	I(A)	Pin(W)	PF	M(Nm)	n(1/min)	P(W)	IFF	Ploss(W)
384,2	1,59	906	0,854	1,29	5564,0	750,0	0,827	156,5

LOAD MOTOR TEST (DIRECT) TEMPERATURES AND RESISTANCES:

Rr(Ohm)	Tr(°C)	Rl(Ohm)	Tl(°C)
16,7900	20,40	12,8700	-39,23

Priloga št. 6: Računalniški izpis meritve obremenitve s pretvornikom v vezavi trikot z odcepom Δ -o pri frekvenci 250 Hz

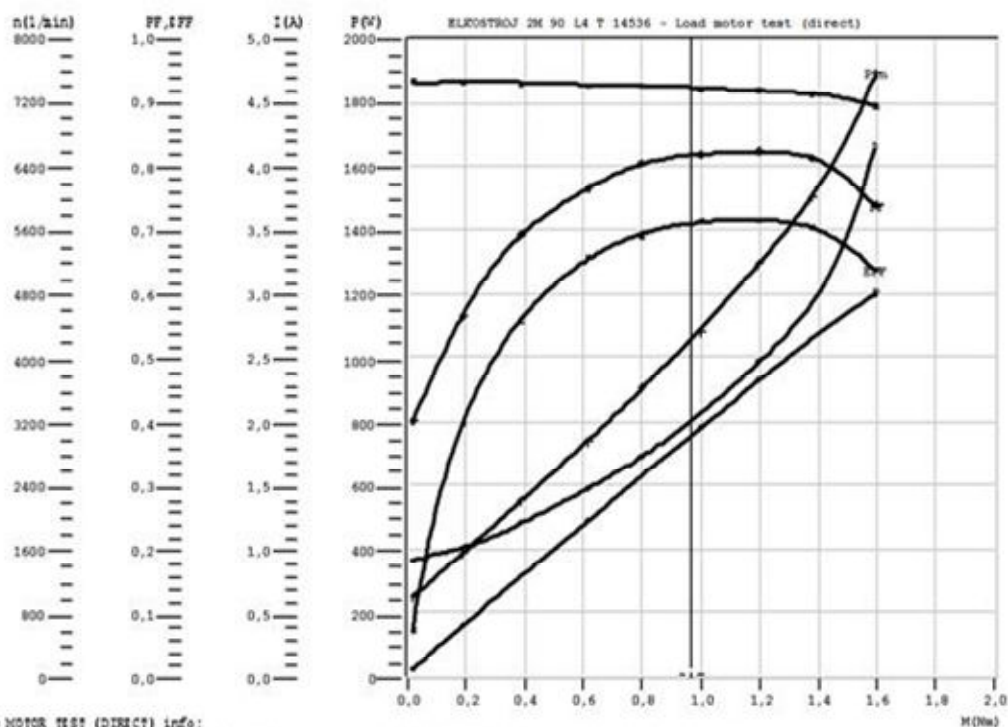
FERI Meribor, Laboratory for electric machines

27.05.2010 10:04

ELNOSTROJ, 3p asynchronous, type: Dn 90 L4, Ser. no. T 14536
 Sl, Insul. cl.: F, Mech. pz.: IP54, Cool. media: Air, No. of turns: N/A
 Y 400V 2,0A 0,750kW 930 1/min 33Hz p=2
 Motor comment: RulD=2,455ohm, Rul3=7,997ohm, Ru23=5,551ohm
 Rr1D=2,449ohm, Rr13=7,996ohm, Rr23=5,561ohm
 Rr1L=2,445ohm, Rr13=7,984ohm, Rr23=5,549ohm
 Temperatura oljice 20,4 °C

CONTROLLER SETTINGS:

Controller: NO, Param. listing: N/A, Contr. type: N/A, Software: , Param. date: N/A



LOAD MOTOR TEST (DIRECT) info:

Measured by: N/A, Started: 27.05.2010 14:21:58, Ended: 27.05.2010 14:25:31, Test duration: 0:03:34
 Comment: D-o-Freidius obremenitve s pretvornikom U=440V, f=250Hz

LOAD MOTOR TEST (DIRECT) MEASURED AND CALCULATED VALUES:

Time	U (V)	I (A)	Pin (W)	FF	f (Hz)	HM (m)	n (1/min)	s (%)	P (W)	EFF	Ploss (W)
1. 14:23:22	354,6	4,18	1890	0,737	250,083	1,600	7165,1	4,497	1200,5	0,635	689,9
2. 14:23:42	366,0	2,92	1501	0,813	250,036	1,380	7312,2	2,518	1056,7	0,704	444,7
3. 14:23:56	370,2	2,46	1297	0,822	250,025	1,200	7352,7	1,974	924,0	0,713	372,7
4. 14:24:12	374,9	2,04	1082	0,817	250,080	1,000	7386,8	1,540	773,5	0,715	308,9
5. 14:24:23	377,7	1,72	902	0,804	250,024	0,800	7412,0	1,183	620,9	0,688	281,1
6. 14:24:37	380,1	1,46	732	0,764	250,054	0,620	7431,3	0,938	482,5	0,659	249,6
7. 14:24:53	385,1	1,18	546	0,692	250,009	0,390	7453,4	0,626	304,4	0,537	241,8
8. 14:25:12	389,6	0,99	377	0,565	250,073	0,190	7471,0	0,416	146,6	0,394	228,7
9. 14:25:25	394,4	0,88	239	0,399	250,014	0,020	7484,7	0,210	15,7	0,066	223,4

LOAD MOTOR TEST (DIRECT) RATED VALUES:

Rated from: Approximation, Algorithm: Givens, Poly order: 7

U (V)	I (A)	Pin (W)	FF	M (Nm)	n (1/min)	P (W)	EFF	Ploss (W)
375,4	1,99	1057	0,817	0,97	7390,7	750,0	0,710	307,0

LOAD MOTOR TEST (DIRECT) TEMPERATURES AND RESISTANCES:

Rr (Ohm)	Tr (°C)	Rt (Ohm)	Tt (°C)
16,7900	20,40	8,7600	-101,75



Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17
2000 Maribor

Številka: E.0869

Datum in kraj: 12. 07. 2010, Maribor

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 1/2010)

SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

1. **Petru Farkašu**, študentu visokošolskega strokovnega študijskega programa ELEKTROTEHNIKA, smer Močnostna elektrotehnika, se dovoljuje izdelati diplomsko delo pri predmetu Projektiranje elektromagnetnih naprav.
2. **MENTOR:** doc. dr. Miralem Hadžiselimović
SOMENTOR: red. prof. dr. Ivan Zagradišnik
3. **Naslov diplomskega dela:**
UPORABA NAVITJA Z ODCEPOM ZA ŠIROKO PODROČJE VRTLJAJEV ASINHRONSKEGA MOTORJA
4. **Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:**
USAGE OF TAPPED STATOR WINDING FOR WIDE-SPEED RANGE INDUCTION MOTOR
5. Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z "Navodili za izdelavo diplomskega dela" in ga oddati v treh izvodih (en vezan izvod in dva nevezana izvoda) ter en izvod elektronske verzije do 12. 07. 2011 v referatu za študentske zadeve.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 3 delovnih dni.

Dekan:



Obvestiti:

- kandidata,
- mentorja,
- somentorja,
- odložiti v arhiv.

UNIVERZA V MARIBORU

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
(ime fakultete)

IZJAVA O ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE VERZIJE ZAKLJUCNEGA DELA IN
OBJAVI OSEBNIH PODATKOV AVTORJA

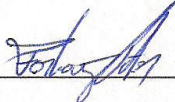
Ime in priimek avtorja (avtorice): Peter Farkaš
Vpisna številka: 93546138
Študijski program: FERI-E VS MOČNOSTNA ELEKTROTEHNIKA VS
Naslov zaključnega dela: UPORABA NAVITJA Z ODCEPOM ZA ŠIROKO PODROČJE
VRTLJAJEV ASINHRONSKEGA MOTORJA

Mentor: doc. dr. Miralem Hadžiselimović
Somentor: prof. dr. Ivan Zagradišnik

Podpisani-a Peter Farkaš izjavljam, da sem za potrebe arhiviranja oddal-a elektronsko verzijo zaključnega dela v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru. Zaključno delo sem izdelal-a sam-a ob pomoči mentorja. V skladu s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorskih in sorodnih pravicah (Ur. l. RS, št. 16/2007) dovoljujem, da se zgoraj navedeno zaključno delo objavi na portalu Digitalne knjižnice Univerze v Mariboru.

Tiskana verzija zaključnega dela je istovetna elektronski verziji, ki sem jo oddal-a za objavo v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru. Podpisani-a izjavljam, da dovoljujem objavo osebnih podatkov, vezanih na zaključek študija (ime, priimek, leto in kraj rojstva, datum zagovora, naslov zaključnega dela) na spletnih straneh in v publikacijah UM.

Kraj in datum: Maribor, 14.7.2010

Podpis avtorja (avtorice): 



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

IZJAVA O AVTORSTVU

diplomskega dela

Spodaj podpisani/-a Peter Farkaš,z vpisno številko 93546138,

sem avtor/-ica diplomskega dela z naslovom:

UPORABA NAVITJA Z ODCEPOM ZA ŠIROKO PODROČJE
VRTLJAJEVASINHRONSKEGA MOTORJA

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal/-a samostojno pod mentorstvom (naziv, ime in priimek)
doc. dr. Miralem Hadžiselimović,
in somentorstvom (naziv, ime in priimek)
prof. dr. Ivan Zagradišnik.
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.)
ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v DKUM.

V Mariboru, dne 14.7.2010Podpis avtorja/-ice: 