

# Izgube moči sinhronskega reluktančnega motorja

Damijan Miljavec<sup>1</sup>, Miralem Hadžiselimović<sup>2</sup>, Konrad Lenasi<sup>1</sup>, Ivan Zagradišnik<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, Ljubljana

<sup>2</sup>Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova 17, Maribor

E-pošta: miljavec@fe.uni-lj.si

**Povzetek.** V članku smo najprej predstavili osnovne lastnosti, zgradbo in delovanje sinhronskega reluktančnega motorja, nato pa v okviru dvoosne teorije zapisali vezni model obravnavanega električnega stroja. Reluktančni navor omogoča vrtenje rotorja v sinhronizmu z glavnim vrtilnim poljem. Pri takšnem načinu delovanja (sinhronsko vrtenje) je v rotorju gostota magnetnega pretoka vedno enosmerna, kar narekuje brezizguben rotor. Vendar imamo zaradi statorskih utorov spremembo magnetne upornosti zračne reže, kar pri vrtenju povzroči utorske pulzacije magnetnega polja in s tem površinske izgube na rotorju. Na podlagi temeljnih elektromagnetnih zakonitosti smo izpeljali enačbo in z njo ovrednotili površinske izgube na rotorju motorja. Z obremenilnim preizkusom in preskusom prostega teka smo analizirali obratovalne karakteristike in izgube motorja. Kot posledico izgub smo nastalo temperaturno polje v motorju in na njem prikazali v obliki temperaturne slike.

**Ključne besede:** sinhronski reluktančni motor, reluktančni navor, površinske izgube, izgube moči, temperaturna slika

## Power losses in synchronous reluctance motors

**Extended abstract.** The aim of this paper is to present power losses in synchronous reluctance motors (SRM). Generally speaking, this type of motors is an unexcited synchronous machine with stator windings and a stator similar to any regular induction machine. The rotor is cross-laminated and contains flux barriers placed equidistantly around the air gap (Fig. 1). They serve to diminish the quadrature (q-axis) flux flowing between poles and at the same time they permit the direct axis flux to flow largely unimpeded through the poles.

On the basis of the Park's theory, an impedance model of SRM for stationary operating modes is presented in a matrix form (Eq. 1). Further, the paper devotes special attention to surface power losses. The main flux of synchronous reluctance motors rotates at the same speed as the rotor. The presence of the stator openings gives rise to permeance variations causing a ripple in the main flux (Fig. 2) through which the rotor is driven and resulting in induced losses on the rotor surface. The same is going on on the stator surface due to the permeance variations in the rotor slot opening range. At normal tooth ripple frequencies, only eddy current components of these losses are of any significance and hysteresis losses may be ignored.

Eqs. (2-5) describe the magnetic flux density distribution and penetration into the rotor. Fundamental electromagnetic equations (6-8) are used to calculate the eddy current distribution (Eq. 9) on a thin surface layer of a laminated rotor. Surface losses are calculated with Eq. 10 and presented in Figs. (3-4).

The measured torque and current characteristics of SRM for asynchronous run are shown in Fig. 5. and for synchronous run in Fig. 7. The principle of the rotor load angle measurement is given in Fig. 6. No-load characteristics of SRM and power losses separation are presented in Fig. 8. Power losses at no-load operation of the measured prototype are separated and given in Table 1.

To establish the surface losses impact on rotor temperature

variations the temperature measurements (Fig. 9) were made. They are presented in Table 2. Temperature variations for the SRM stator winding at a nominal load are given in Fig. 11.

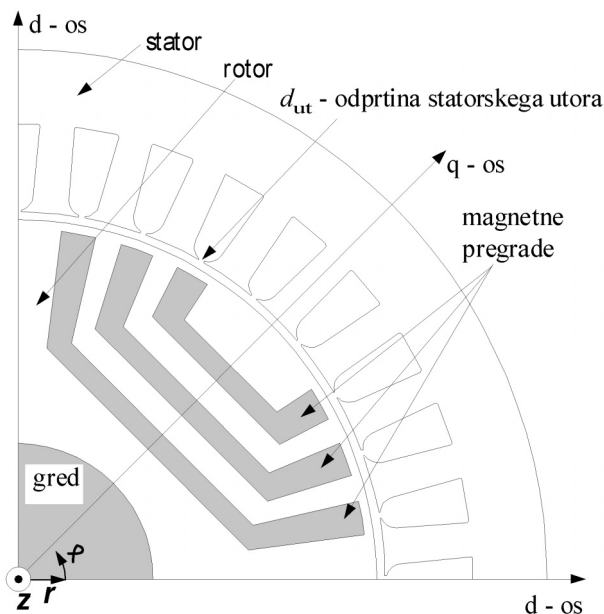
**Key words:** synchronous reluctance motor, reluctance torque, surface losses, power losses, temperature

## 1 Uvod

Sinhronski reluktančni motor (SRM) je izmeničen motor, pri katerem se rotor vrti v sinhronizmu s statorskim vrtilnim poljem. Stator ter  $p$ -polno trifazno statorsko navitje sta klasične izvedbe, kot ju poznamo pri asinhronskih motorjih. Rotor (slika 1) je oblikovan tako, da se v eni smeri, vzdolžni (d-os), dobro magneti, v drugi, prečni (q-os), pa precej slabše. Zaradi te razlike v magnetni prevodnosti nastane s statorskim vrtilnim poljem vrtilni moment, ki mu pravimo reluktančni.

Poznamo več različno oblikovanih vrst rotorjev SRM, na splošno pa se delijo na dve osnovni obliki: segmentni rotor (slika 1) in osno lameliran rotor. Osnovna razlika med oblikama je v načinu lameliranja. Štancane lamele segmentnega tipa rotorja so iz mehkomagnetnega materiala in zložene vzdolž gredi motorja. Z izsekavanjem fero-magnetnega materiala dosežemo magnetno izraženost rotorja. Ko je rotor sestavljen, nastale pregrade zalijemo z aluminijem ali z drugim neferomagnetnim materialom.

Zlaganje mehkomagnetnih delov osno lameliranega rotorja poteka radialno od gredi navzven, in to izmenično z neferomagnetnim materialom. Tako dosežemo dosegemo magnetno izraženost rotorja. V okviru tega dela se bomo omejili le na segmentno oblikovane rotorje.



Slika 1. Prečni prerez sinhronskega reluktančnega motorja s segmentno oblikovanim rotorjem  
Figure 1. Cross-section of a synchronous reluctance motor with a segmented rotor

## 2 Vezni model sinhronskega reluktančnega motorja

SRM lahko obravnavamo tako, da pojave in dogajanja opazujemo v dveh oseh: vzdolžni d-osi in prečni q-osi. Vzdolžna os sovпада z magnetno prevodnejšo osjo rotorja, ki gre skozi središče pola, prečna os pa poteka kot simetrala med poloma. Ti dve osi fiksiramo na rotor in vsak njun trenutni položaj je podan s trenutno lego rotorja. S pomočjo dvoosne teorije [1] določimo impedančno matrično enačbo SRM za stacionarno stanje, ki je vezni model motorja, izražen z osnimi veličinami:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \frac{dL_d}{dt} & -\omega L_q \\ \omega L_d & R + \frac{dL_q}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, \quad (1)$$

kjer so  $u_d$ ,  $u_q$ ,  $i_d$ ,  $i_q$  z dvoosno transformacijo preoblikovane trifazne statorske napetosti in toki,  $R$  ohmska upornost navitji ter  $L_d$  vzdolžna in  $L_q$  prečna induktivnost SRM. Kot vidimo, v matrični enačbi (1) ni nobenih rotorskih tokov, ker se rotor v stacionarnem stanju vrti v sinhronizmu s statorskim vrtilnim poljem, pri tem pa se ne inducirajo rotorske napetosti, ki bi pognale

rotorske toke. Iz tega lahko tudi sklepamo, da je v rotorju konstantno magnetno polje, kar narekuje brezizgubni rotor. V nadaljevanju bomo pokazali, da kljub tem nastajajo izgube, ki so narave vrtilnih izgub in so locirane na ozkem področju ob površini rotorja.

## 3 Površinske izgube

Površinske izgube nastanejo tako na obodu rotorja kot tudi na notranjem obodu statorja. Rotor SRM se v stacionarnem delovanju vrti v sinhronizmu z glavnim vrtilnim poljem. S tem je to polje v rotorju časovno konstantno in ne pogojuje nastanku vrtilnih in histereznih izgub. Ob vrtenju rotorja, gledano z njegovega oboda proti statorju, pa so prisotne spremembe v magnetni prevodnosti. Te se kažejo kot konstantno izmenjavanje magnetne prevodnosti med statorskim zobom in utoro. To povzroči lokalno spreminjanje gostote magnetnega pretoka na obodu rotorja in s tem induciranje površinskih izgub na tem območju. Če je rotor ozobljen, se enak fizikalni proces dogaja na površini statorja.

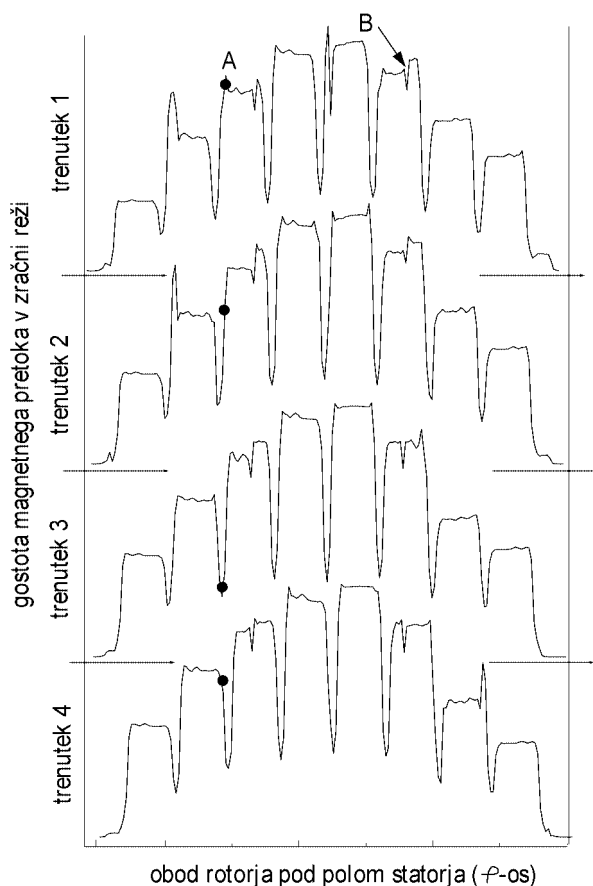
Na sliki 2 so prikazani poteki gostote magnetnega pretoka v zračni reži za časovno zaporedne trenutke rotorja v prostem teku. Te porazdelitve polj smo izračunali s pomočjo metode končnih elementov [2, 3]. Polno izrisana točka A pomeni točko na rotorju. Njeno premikanje po krivulji poteka gostote magnetnega pretoka v zračni reži nakazuje časovno spreminjanje polja in s tem vir izgub v železu ob površini rotorja. Na sliki 2 je vidno spreminjanje polja na statorski površini (vdor označen s točko B), le da je to dosti manj izrazito.

Z medsebojnim časovno zaporednim odštevanjem porazdelitve magnetnih polj s slike 2 dobimo krajevno spreminjanje polja po obodu rotorja v danem trenutku. Zaradi lažje predstave smo rotor in stator razvili in analizo predstavili v kartezijskem koordinatnem sistemu. Koordinata  $x$  (koordinata  $\varphi$  v sliki 1) je tako vzdolž oboda rotorja, koordinata  $y$  (koordinata  $-r$  v sliki 1) je usmerjena radialno v rotor, koordinata  $z$  pa je vzdolž osi rotorja.

Tako postavljeno geometrijo SRM-ja in s tem magnetno polje pretvorimo v stacionarno, po obodu krajevno neenakomerno in časovno spreminjajoče se polje. Če paroma vzamemo pozitivno in negativno spremembo  $y$  komponent  $e$  polja, lahko to pretvorbo zapišemo v obliki enačbe:

$$B_y(x, t) = B_0 \sin\left(\frac{\pi}{d_{ut}}x - 2\pi\frac{Z_S}{2}\frac{f_{el}}{P}t\right), \quad (2)$$

kjer je  $B_0$  amplituda časovno spreminjajočega se polja v zračni reži,  $Z_S$  število statorskih zobov,  $d_{ut}$  širina odprtine statorskega utora,  $f_{el}$  električna frekvenca vzbujalnega polja in  $p$  število polovih parov SRM. V tem primeru se spremenljivka  $x$  spreminja od 0 do  $d_{ut} \cdot Z_S$ . Vstopanje



Slika 2. Spreminjanje poteka gostote magnetnega pretoka v zračni reži za časovno zaporedne trenutke  
Figure 2. Distribution of magnetic flux density in an air gap at consecutive time increments

časovno spreminjajočega se magnetnega polja v rotor lahko zapišemo v obliki:

$$B_{\text{Fe},y}(x, y, t) = B_{1\text{Fe},y}(y) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{d_{\text{ut}}}x - 2\pi\frac{Z_{\text{S}}}{2}\frac{f_{\text{el}}}{P}t\right) \quad (3)$$

Neznano veličino  $B_{1\text{Fe},y}(y)$ , ki je odvisna od koordinate  $y$ , izračunamo s pomočjo diferencialne enačbe [4]:

$$\frac{d^2 B_{1\text{Fe},y}(y)}{dy^2} - \left(\frac{\pi}{d_{\text{ut}}}\right) \cdot B_{1\text{Fe},y}(y) = 0 \quad (4)$$

Z vstavitvijo rešitve diferencialne enačbe (4) v enačbo (3) dobimo:

$$B_{\text{Fe},y}(x, y, t) = B_0 e^{\pi y/d_{\text{ut}}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{d_{\text{ut}}}x - 2\pi\frac{Z_{\text{S}}}{2}\frac{f_{\text{el}}}{p}t\right) \quad (5)$$

Enačba (5) pomeni  $y$  komponento gostote magnetnega pretoka, njeno upadanje v notranjost rotorja, spreminjanje vzdolž oboda rotorja in časovno odvisnost.

V celotni analizi bomo predpostavili naslednje: gostota magnetnega pretoka v zračni reži nima  $z$ -komponente, inducirani vrtilni toki ne tečejo v smeri  $z$ -osi (lamelle rotorja so medsebojno električno izolirane) ter konstantno permeabilnost železa. Ob upoštevanju predstavljenih poenostavitve lahko zapišemo izhodiščni enačbi za izračun vrtilnih tokov na in tik pod površino rotorja:

$$\text{rotz} \left[ \vec{B}_{\text{Fe},y}(x, y, t) \right] = \vec{J}_z = 0, \quad (6)$$

$$\text{div} \left[ \vec{B}_{\text{Fe},y}(x, y, t) \right] = 0. \quad (7)$$

Rešitev enačb (6) in (7) nam poda porazdelitev gostote magnetnega pretoka  $\vec{B}$  v smeri  $x$  in  $y$  osi v železu rotorja. Inducirano gostoto vrtilnih tokov  $\vec{J}$  kot posledico časovno spreminjajoče se gostote magnetnega pretoka določimo z enačbo:

$$\text{rot} \vec{J} = -\gamma \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (8)$$

kjer  $\gamma$  pomeni specifično prevodnost materiala. Rezultirajočo vrednost gostote vrtilnih tokov  $J_R$  lahko zapišemo v končni obliki:

$$J_R = \sqrt{J_x^2 + J_y^2} = \pi \gamma Z_{\text{S}} \frac{f_{\text{el}}}{p} B_0 z e^{\pi y/d_{\text{ut}}} \quad (9)$$

Na podlagi znane porazdelitve vrtilnih tokov v lameli lahko s pomočjo enačbe:

$$P_V = N_L \frac{1}{\gamma} \int_{x=0}^{Z_{\text{S}} \cdot d_{\text{ut}}} \int_{y=0}^{-\infty} \int_{-d/2}^{d/2} J_R^2 dx dy dz \quad (10)$$

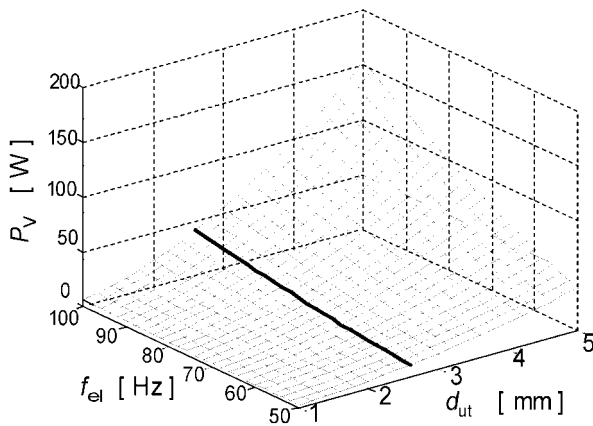
določimo površinske toplotne izgube v celotnem rotorju SRM v praznem teku, in sicer:

$$P_V = \frac{\gamma}{48} f_{\text{meh}}^2 \pi B_0^2 Z_{\text{S}}^3 d_{\text{ut}}^2 d^3 N_L, \quad (11)$$

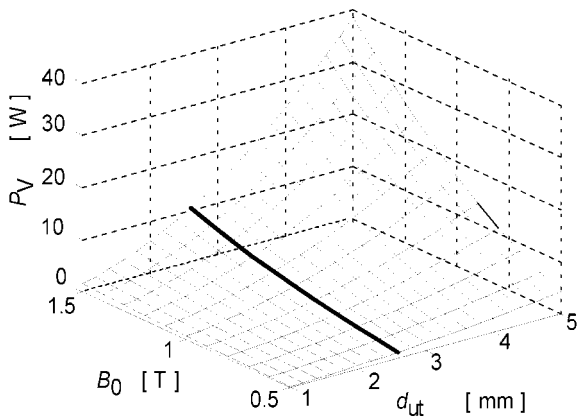
kjer  $d$  pomeni debelino rotorske lamelle,  $N_L$  število lamel in  $f_{\text{meh}} = f_{\text{el}}/p$ .

Na sliki 3 si lahko ogledamo odvisnost površinskih izgub v odvisnosti od električne frekvence vzbujalnega polja ter od širine odprtine statorskega utora. Polno izrisana črta pomeni odvisnost površinskih izgub na rotorju pri danih frekvencah za širino odprtine statorskega utora  $d_{\text{ut}} = 2.6$  mm merjenega SRM. Slika 4 pa prikazuje odvisnost površinskih izgub od gostote magnetnega pretoka (polno izrisana črta velja za merjeni motor,  $d_{\text{ut}} = 2.6$  mm) pri različnih širinah odprtine statorskega utora.

Izračunane površinske izgube na rotorju se navzven kažejo kot izgube v železu SRM. Vsebovane so v merilnih



Slika 3. Površinske izgube na rotorju SRM-ja pri  $B_0=1.5$  T  
Figure 3. Surface losses on a SRM rotor at  $B_0=1.5$  T



Slika 4. Površinske izgube na rotorju SRM-ja pri  $f_{el}=50$  Hz  
Figure 4. Surface losses on a SRM rotor at  $f_{el}=50$  Hz

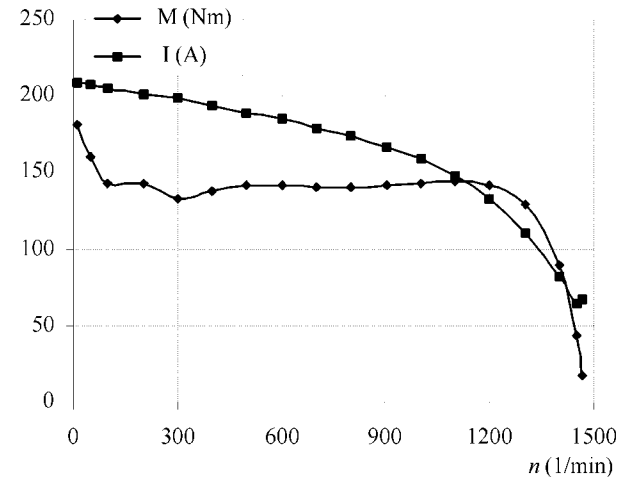
rezultatih izgub v železu celotnega motorja. Z meritvijo karakteristike prostega teka in z metodo ločevanja izgub bomo ocenili delež površinskih izgub in njihov učinek na segrevanje rotorja SRM.

#### 4 Obratovne karakteristike in izgube v prostem teku SRM

Oblika in način izdelave rotorja sinhronskega reluktančnega motorja nam omogočata asinhrono delovanje. Rotorske magnetne pregrade so namreč zalite z aluminijem in skupaj s stranskima rotorskima kratkostičnimi obročema tvorijo t.i. kratkostično kletko. Ta nam omogoča direkten vklop SRM na omrežno napetost konstantne frekvence. V primeru zagona SRM deluje kratkostična kletka enako kot pri zagonu asinhronskega motorja.

V okviru preskušanja smo SRM ( $P_N=10\text{kW}$ ,  $U_N=256$  V,  $I_N=34$  A,  $n_N=1500\text{min}^{-1}$ ) napajali prek nastavljivega transformatorja, priključenega na javno omrežje ( $f = 50$  Hz). Slika 5 prikazuje tokovno in navorno karakteris-

tiko SRM v času zagona oziroma v obdobju asinhronskega obratovanja.

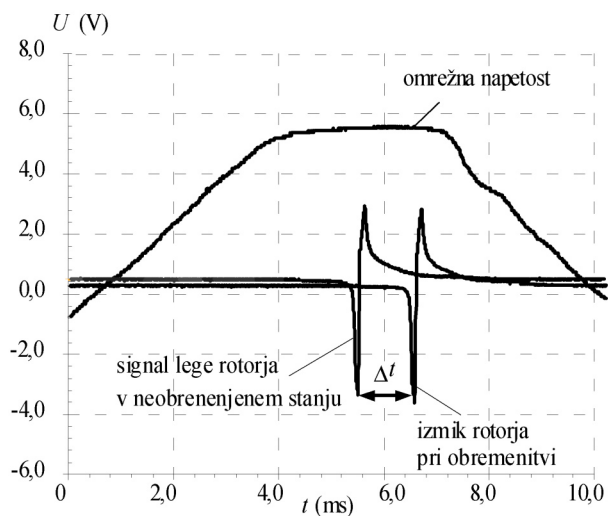


Slika 5. Momentna in tokovna karakteristika SRM za asinhronsko območja delovanja  
Figure 5. Torque and current characteristics of SRM for asynchronous run

V bližini sinhronske vrtilne hitrosti  $n_S$  skoči SRM pod vplivom reluktančnega navora v sinhronizem. Pri motorskem obremenilnem preskusu asinhronskega motorja nam z večanjem obremenitve na gredi motorja hitrost vrtenja pada. V primeru SRM pa hitrost vrtenja ostaja stalna (sinhronska) ne glede na obremenitev. S povečevanjem obremenitve na gredi motorja začne rotor zaostajati za vrtilnim poljem za kolesni kot  $\delta$ . To se dogaja, dokler zaradi preobremenitve rotor ne izpade iz sinhronizma in preide v nestabilno in nezaželeno asinhronsko delovanje.

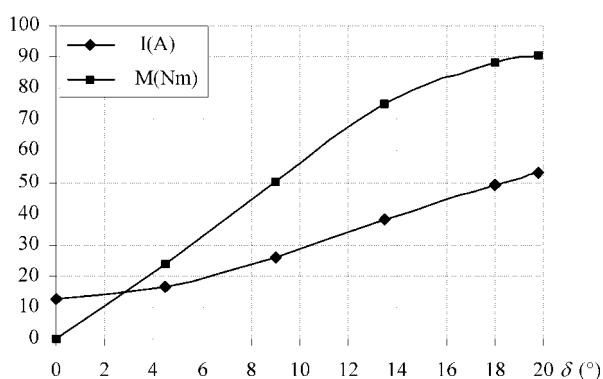
V našem primeru (štiripolni SRM) se v motorskem območju delovanja kolesni kot teoretično lahko spremeni od 0 do 22,5 mehanske stopinje. Zaradi nestabilnega delovanja motorja, v bližini vrednosti kolesnega kota 22,5 mehanske stopinje, smo meritve izvedli le do 20 mehanskih stopinj. Meritev kolesnega kota smo izvedli s pomočjo osciloskopa, na katerega smo priključili dva signala. Prvi signal je bila omrežna napetost in je služila kot referenčna vrednost za proženje osciloskopa. Kot signal lege rotorja smo uporabili referenčni izhod iz merilnika vrtljajev, ki je pritrjen na rotor SRM. Signal lege rotorja v neobremenjenem stanju je bil shranjen v spominu osciloskopa kot referenčni signal. Z obremenitvijo SRM pa je nastal zamik rotorja za glavnim vrtilnim magnetnim poljem. Ta zamik se je na oscilogramu pokazal kot časovna zakasnitev opazovanega signala za referenčnim signalom (slika 6).

S poznavanjem napajalne frekvence in števila polov motorja smo ta časovni interval preračunali v vrednost mehanskega kolesnega kota  $\delta$ . S sočasno meritvijo napajalnega toka in navora na gredi SRM smo dobili karakteris-



Slika 6. Meritev kolesnega kota s pomočjo osciloskopa  
Figure 6. Measurement of the rotor load angle

istiki na sliki 7. Poudariti je treba, da je med sinhronskim delovanjem glavno magnetno polje v rotorju motorja vseskozi enosmerno.



Slika 7. Momentna in tokovna karakteristika SRM v sinhronskem področje delovanja  
Figure 7. Torque and current characteristics of SRM for synchronous run

Za določitev izgub v prostem teku smo izmerili karakteristiko prostega teka. SRM smo priklopili na vir spremenljive napetosti in stalne frekvence. Napetost smo spreminjali po korakih od  $0,3 U_N$  do  $1,4 U_N$ . V tabeli 1 si lahko ogledamo rezultate meritev in delitev izgub pri nazivni napetosti motorja.

Iz tabele 1 vidimo, da so pri nazivni napetosti največje izgube v železu  $P_{fe}$ , bistveno manjše so jouske izgube v navitju statorja  $P_{cu}$ , najmanjše pa so izgube trenja in ventilacije  $P_{frw}$ .

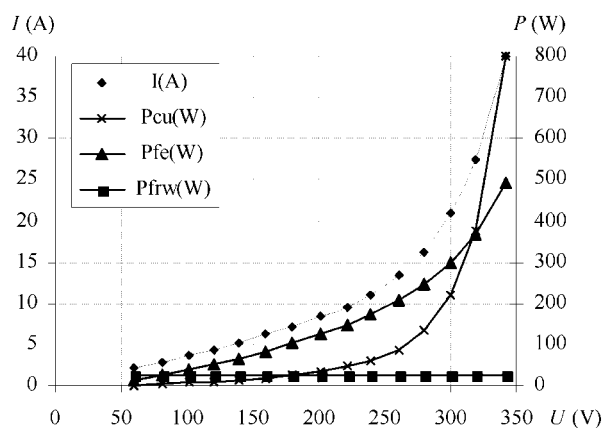
Na sliki 8 so prikazane karakteristike izgub in sprememba toka v odvisnosti od napetosti. Opazimo, da se z višanjem napajalne napetosti povečuje tok  $I$  skozi statorsko navitje. S tem se povečajo jouske izgube v navitju

$U_N$ (V)	$I$ (A)	$P_{in}$ (W) Vhodna moč	$P_{cu}$ (W) Izgube v bakru	$P_{fe}$ (W) Izgube v železu	$P_{frw}$ (W) Trenje in ventilacija
256	12,7	305	80,3	198,3	26,4

Tabela 1. Delitev izgub v prostem teku pri nazivni napetosti motorja

Table 1. No-load losses of SRM

statorja  $P_{cu} = m_S I^2 R$ , kjer je  $m_S$  število faz in  $R$  ohmska upornost statorskega faznega navitja. Višja vrednost toka v statorskih navitjih požene po magnetni upornosti jedra povečan magnetni pretok  $\Phi$  oziroma nastane večja gostota magnetnega pretoka v jedru motorja. Slednja pa povzroči povečanje izgub v železu  $P_{fe}$ . V času meritev karakteristike prostega teka se je SRM vrtel s sinhronsko vrtilno hitrostjo  $n_S$ . Iz tega sledi, da so izgube zaradi trenja in ventilacije  $P_{frw}$  vseskozi konstantne.

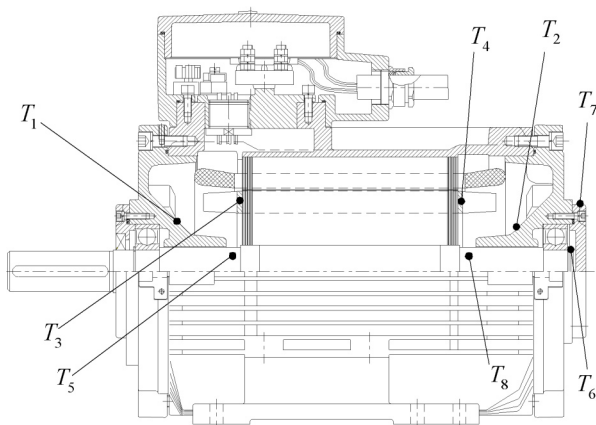


Slika 8. Karakteristika prostega teka SRM  
Figure 8. No-load characteristics of SRM

## 5 Temperaturna slika SRM

Z merjenjem temperature v nazivni obratovalni točki na različnih delih motorja smo želeli potrditi tezo o skoraj neizgubnem rotorju SRM. Meritve smo izvedli s pomočjo temperaturnih merilnih lističev, ki smo jih s posebnim lepilnim trakom nalepili na določene točke motorja (slika 9). S segrevanjem merilne točke na motorju se segreva tudi merilni listič. Ta se trajno obarva do meje, ki je določena z najvišjo doseženo temperaturo točke. S tem pa je postavljena zahteva, da se med segrevanjem SRM ne prekorači nazivna oddana moč na gredi. To bi povzročilo trajno obarvanost lističa nad temperaturo, doseženo z nazivno obremenitvijo, in meritev ne bi bila pravilna. Predvsem pa je pomembno, da z obremenjevanjem SRM le-ta ne izpade iz sinhronizma, kajti v tem primeru bi se inducirali rotorski toki, ki bi segrevali rotor.

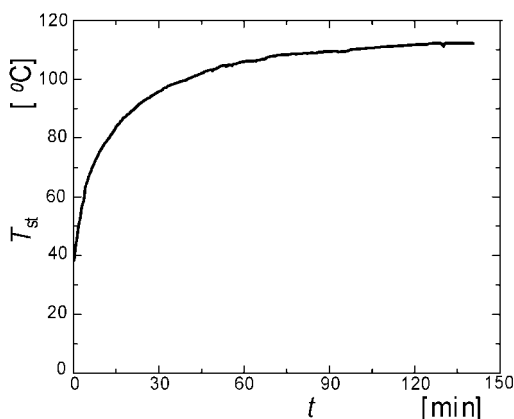
SRM smo segrevali pri nazivni oddani moči  $P_N = 10\text{kW}$ , nazivni napetosti  $U_N = 256\text{ V}$ , nazivnem toku  $I_N =$



Slika 9. Prikaz temperaturnih merilnih točk SRM  
Figure 9. Temperature measurement points on SRM

34 A in nazivnih vrtljajih  $n_N = 1500 \text{ min}^{-1}$ .

Na sliki 10 je prikazano segrevanje statorskih navitji pri nazivno obremenjenem SRM.



Slika 10. Segrevanje statorskih navitji SRM  
Figure 10. Temperature rise on SRM stator windings

Po končani meritvi smo fizično razstavili motor in z merilnih lističev odčitali najvišje dosežene temperature. Rezultati so prikazani v tabeli 2.

$T_1$ (°C)	57	$T_5$ (°C)	< 82
$T_2$ (°C)	57	$T_6$ (°C)	< 82
$T_3$ (°C)	93	$T_7$ (°C)	< 82
$T_4$ (°C)	93	$T_8$ (°C)	< 82

Tabela 2. Temperature na merilnih točkah SRM  
Table 2. Temperature values for SRM measured points

Iz tabele 2 vidimo, da sta najvišji izmerjeni temperaturi  $T_3$  in  $T_4$ . Izmerjeni sta bili na kratkostičnem obroču rotorja, ki je najbližje statorskemu paketu. Pri asinhronskem motorju z enakimi nazivnimi podatki se rotorska kratkostična obroča segrejeta do  $132^\circ \text{C}$ . Iz tega

lahko sklepamo, da se rotor SRM v glavnem segreva s statorske strani prek zračne reže. To nam potrjujejo tudi dokaj nizke temperature, izmerjene na gredi rotorja. Temperature točk od  $T_5$  do  $T_8$  so bile nižje od spodnje temperature merilnih lističev, zato so v tabeli 2 označene kot nižje od  $82^\circ \text{C}$ . Z gotovostjo pa lahko trdimo, da so te točke v temperaturnem razredu merjenih točk  $T_1$  in  $T_2$ .

## 6 Sklep

Iz osnovnega principa delovanja SRM lahko sklepamo, da je rotor brezizguben. Prek teoretskih izvajanj se pokaže, da nastajajo izgube tudi na rotorju. Tovrstne izgube imenujemo površinske izgube, nastajajo pa zaradi spreminjanja magnetne prevodnosti med statorskim zobom in utorom. Izpeljana enačba (11) kaže, da so odvisne od števila statorskih zobov, širine odprtine statorskega utora, električne frekvence vzbujalnega polja in števila polovih parov. Izračuni kažejo, da v prostem teku pomenijo površinske izgube od 3 do 8 odstotkov izgub prostega teka. Hkrati smo z meritvami pokazali, da glavni vir izgub v SRM nastaja v statorju, ne pa v rotorju. Ta se, tako namreč kaže temperaturna slika, segreva s strani statorja prek zračne reže.

## 7 Literatura

- [1] F. Avčin, P. Jereb, "Preizkušanje električnih strojev", Tehniška založba Slovenije, 1983.
- [2] D. Maga, R. Hartansky, "Numerické riešenia elektromechanických uloh", Trenčianska univerzita, Ludoprint Trenčín, 2001.
- [3] FLUX2D, software for electromagnetic design from CE-DRAT, 2002.
- [4] B. Heller, V. Hamata, "Harmonic field effects in induction machines", Elsevier scientific publishing company, 1977.

**Damijan Miljavec** je leta 1999 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je tudi zaposlen. Raziskovalno se ukvarja z modeliranjem in oblikovanjem elektromehanskih pretvornikov in z uvajanjem novih materialov na področje elektromagnetnih struktur.

**Miralem Hadžiselimović** je diplomiral leta 1998 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Od leta 2002 je zaposlen v laboratoriju za električne stroje kot asistent raziskovalec. Njegovo področje raziskav so rotacijski električni stroji s poudarkom na sinhronskih strojih.

**Konrad Lenasi** je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani na področju električnih strojev. Raziskovalno se ukvarja predvsem z oblikovanjem energetskih transformatorjev.

**Ivan Zagradišnik** je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru na področju električnih strojev. Njegovo področje raziskav so rotacijski električni stroji s poudarkom na asinhronskih strojih.