

Modeliranje in analiza asinhronskega motorja z zasenčenimi poli in C-jedrom

Selma Čorović, Gal Štampihar, Damijan Miljavec

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: selma.corovic@fe.uni-lj.si

Povzetek. Asinhronski motorji z zasenčenimi poli spadajo v skupino najpogosteje uporabljenih električnih motorjev v aplikacijah manjših moči (v območju od nekaj vatov pa do nekaj 100 W), kljub slabemu izkoristku, ki je tipično manjši od 40 %. Glavni razlogi za pogosto uporabo tovrstnih motorjev so dobro poznana tehnologija izdelave, nizka cena, robustnost, zanesljivost ter nizka raven hrupa in vibracij. Najpogosteje jih lahko srečamo kot gonilnike ventilatorjev, v manjših črpalkah, v avtomatih za pijače, pralnih strojih in številnih gospodinjstvih aparatih. Motorji z zasenčenimi poli so najpogosteje izdelani kot dvopolni ali štiripolni, z vidika konstrukcije statorskega paketa pa jih lahko razdelimo na simetrično in asimetrično grajene motorje. Glavni cilj pričujoče študije je bil zgraditi numerični model dvopolnega asinhronskega motorja z zasenčenimi poli z asimetrično grajenim statorskim paketom, tj. motor s C-jedrom. Na podlagi modela, temelječega na metodi končnih elementov v časovno odvisni elektromagnetni analizi, smo raziskali vpliv števila kratkostičnih obročev pomožnega navitja na obliko navorne karakteristike. Proučili smo tudi vpliv poševljenja rotorske kratkostične kletke na časovni potek in pulzacije navora motorja. Na podlagi izvedene analize smo preverili možnost zmanjšanja količine uporabljenega materiala in posledično poenostavitve izdelave, kar je pomembno pri recikliranju odsluženega motorja in morebitni ponovni uporabi njegovih sestavnih delov.

Ključne besede: asinhronski motor z zasenčenimi poli, enofazni asinhronski motor, metoda končnih elementov, numerično modeliranje

Modeling and analysis of a shaded-pole and C-core induction motor

Shaded-pole induction motors belong to the group of most used small electric motors in low-power applications ranging from a fraction of a watt up to few 100 W. They are most often found in fan drivers, small pumps, beverage dispensers, washing machines and many household appliances. They are frequently used due to their advanced manufacturing technology, cost effectiveness, robustness, reliability and low noise and vibration levels, despite their poor efficiency, which is usually below 40%. The shaded-pole motors are often designed as two-pole machines. Depending on the construction of the stator package of the two-pole version, they can be divided into symmetrically and asymmetrically designed motors. The objective of the paper is to build a 2D finite-element-based numerical model of a C-shape shaded-pole induction machine (i.e., asymmetrical type) using the transient magnetic analysis. The impact of the number of the auxiliary winding turns and the rotor skewing angle on the resulting torque-speed curve and the torque pulsations is investigated. Finally, the possibility is considered to reduce the amount of the used material to simplify the manufacturing, which may be important for the recycling and/or reuse process.

Keywords: shaded-pole induction motor, single-phase induction motor, finite-element analysis, numerical modeling

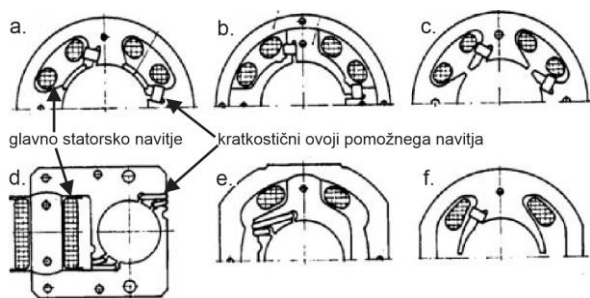
1 UVOD

Asinhronski motorji z zasenčenimi poli spadajo v skupino enofaznih asinhronskih motorjev s pomožno fazo. Na letni ravni se izdelava na milijone tovrstnih motorjev v rangu nižjih moči, ki običajno ne presegajo 150 W. Večina asinhronskih motorjev z zasenčenimi poli pa je namenjenih močem v rangu nekaj 10 W [1–3]. Enofazni asinhronski motorji principiarno delujejo podobno kot trifazni asinhronski motorji, le da vrtilno polje, potrebno za vrtenje rotorja, zagotavlja le ena faza v kombinaciji s pomožno fazo, ki je lahko izvedena na različne načine: s pomožnim kondenzatorjem, z ustrezno konstrukcijo statorskega navitja, ki mora vsebovati glavno in pomožno navitje, z zasenčenimi poli na statorskem paketu itd. [3, 4].

Ko gre za motor z zasenčenimi poli, je glavni konstrukcijski element na statorskem paketu, ki ga ločuje od preostalih enofaznih asinhronskih motorjev, tako imenovani kratkostični obroč, ki predstavlja pomožno navitje oziroma pomožno fazo. Rotorsko navitje pa je izvedeno v obliki aluminijaste kratkostične kletke z ustrezno izbrano obliko in številom rotorskih palic. Tipično so asinhronski motorji z zasenčenimi poli izvedeni z dvema ali štirimi poli [1]. Vsi enofazni

asinhronski motorji imajo slabše izkoristke v primerjavi s trifaznimi motorji, motor z zasenčenimi poli pa ima med vsemi izvedbami enofaznih asinhronskih motorjev najslabši izkoristek, ki je tipično manjši od 40 %. Kljub temu pa so asinhronski motorji z zasenčenimi poli najpogosteje uporabljeni motorji v aplikacijah, ki zahtevajo manjše moči. Glavni razlog za pogosto uporabo takih motorjev v industriji je njihova enostavna in poceni izdelava, saj je ta tip motorjev ena izmed najcenejših konstrukcijskih rešitev rotacijskih električnih motorjev. Njihova izdelava je poceni, prav tako pa je zaradi enostavnosti in malega števila komponent zanesljivost teh motorjev velika, saj večinoma niso podvrženi okvaram. Največ možnosti za okvare je na mehanskih elementih, kot so gred motorja in ležaji. Poleg omenjenih lastnosti imajo asinhronski motorji z zasenčenimi poli tudi nizko raven hrupa in vibracij [1, 2]. Asinhronske motorje z zasenčenimi poli pogosto srečamo kot gonilnike ventilatorjev, kjer njihov nizek izkoristek ne pride do izraza, njihov zagonski in nazivni navor pa zmore zagnati in gnati breme (tj. ventilator). Uporabni so tudi v avtomatih za pijače, v manjših črpalkah, pralnih strojih in številnih gospodinjstvih aparatih. [1] Pomembno je poudariti, da so enofazni asinhronski motorji z zasenčenimi poli zaradi svoje robustnosti uporabni v fizikalno izjemno zahtevnih pogojih. Ena izmed pomembnih nedavno predlaganih aplikacij je uporaba tovrstnih motorjev kot gonilnikov naprav za prečiščevanje onesnaženih voda in drugih tekočin na podlagi brezžičnega napajanja in krmiljenja tega motorja. [5].

V literaturi najdemo različne izvedbe asinhronskih motorjev z zasenčenimi poli (slika 1), ki jih v splošnem glede na konstrukcijo statorja lahko razdelimo na simetrično grajene (slika 1a, 1b, 1c, 1e in 1f) in asimetrično grajene motorje (slika 1d), [1].



Slika 1: Različne izvedbe statorskih paketov asinhronskih motorjev z zasenčenimi poli. Prilagojeno po literaturi [1].

Štiri polne izvedbe so prikazane na slikah 1a, 1b in 1c, dvopolne izvedbe pa na slikah d, e in f [1]. Vse izvedbe imajo rotor v izvedbi kratkostične kletke, ki je skoraj izključno aluminijasta. Oblika in upornost kratkostične kletke (palic v utorih in kratkostična obroča) pa sta lahko različni, saj s tem vplivamo na velikost ter obliko tokovne in navorne karakteristike. S povečanjem upornosti kratkostične kletke lahko povečamo zagonski navor. Slabost te metode povečanja zagonskega navora pa je, da

se premakneta lega in velikost omahnega navora. Tako pride do spremembe nazivne hitrosti oziroma nazivne delovne točke, ki se premakne proti višjim slipom; pri tem pa se zaradi večjih tokov poslabša izkoristek motorja v delovni točki. Povečanje rotorske upornosti se tako izvede le v aplikacijah, kjer potrebujemo večji zagonski navor; omahni navor ter izkoristek pa nista tako pomembna.

Masiven bakreni kratkostični obroč je nameščen na licu pola statorja, lahko jih je tudi več, po navadi pa so nameščeni na levi ali desni strani vsakega pola. Položaj in upornost kratkostičnega obroča prav tako vplivata na navorno karakteristiko motorja. Pri aplikacijah motorjev z zasenčenimi poli moramo upoštevati vse omenjene lastnosti obratovanja. Njihov nizek zagonski navor pogosto omejuje njihovo uporabo, prav tako pa je treba upoštevati njihove nizke izkoristke in z njim povezano segrevanje motorja zaradi izgub. Tipično nizek izkoristek pri motorjih majhnih moči ne povzroča težav, moramo pa upoštevati temperature, do katerih se motor segreje, predvsem v aplikacijah, pri katerih ni možno odvajanje toplote s pomočjo ventilacije. Temu primerno je treba prilagoditi izolacijo motorja [1].

Najpogosteje uporabljen tip motorja z zasenčenimi poli je dvopolni motor z asimetričnim statorjem grajenim v obliki črke C (zato ga imenujemo motor s C-jedrom) [1–3], kot kaže slika 1d, ki je tudi predmet te študije. Njegova hitrost vrtenja se lahko prilagodi z enostavnimi mehanskimi prestavami, v prostem teku je vrtilna hitrost malo pod 3.000 obrati na minuto. Tak tip motorja se zaradi enostavne in poceni izdelave najpogosteje uporablja pri aplikacijah manjših pogonskih moči (tipično do 30 W), na primer kot pogonske motorje različnih ventilatorjev, v pečicah, kot električne vodne črpalke v pralnih strojih in tudi v tiskalnikih. Poudariti je treba, da je kljub njegovi enostavni in poceni izdelavi fizikalna analiza, na kateri temelji načrtovanje takšnega paketa, zahtevnega postopka namestitve pomožnega navitja in poševljenja rotorskih palic, nelinearnosti feromagnetnega materiala, neenakomerne zračne reže, idr. [1–10]. Matematična analiza in modeliranje asinhronskega motorja z zasenčenimi poli spadata med najzahtevnejše matematične izzive med vsemi rotacijskimi motorji [1–4, 9]. Namreč, modeliranje z nadomestnimi vezji z uporabo dvoosne vezne teorije je sicer mogoče, vendar je nemogoče zajeti vse vplive nelinearnosti zaradi nesimetričnih lokalnih nasičenj in preostalih nesimetrij [2, 4, 9]. Zato oblikovanje in načrtovanje tovrstnih motorjev zahtevata zahtevnejša orodja, kot so računalniško podprte 2D- ali 3D-numerične analize.

1.1 Namen, cilji in izhodišča raziskave

V okviru študije smo se osredotočili na modeliranje in analizo dvopolnega asinhronskega motorja z zasenčenimi poli z asimetrično grajenim statorjem (tj. motor s C-jedrom statorskega paketa, slika 1d). V prvem delu smo zgradili 2D-numerični model in za izračun

uporabili metodo končnih elementov v časovno odvisni elektromagnetni domeni. Dimenzije in nazivne obratovalne lastnosti referenčnega modela smo dobili iz literature na podlagi motorjev podobnih moči (ranga 30 W nazivne moči) [1, 12]. Poudariti je treba, da pri gradnji modela nismo imeli na voljo natančnih lastnosti materialov kratkostične kletke, kratkostičnih ovojev ter statorskega in rotorskega feromagnetnega materiala. Naštete lastnosti smo privzeli na podlagi priporočil v razpoložljivi literaturi [1–4]. Na podlagi zgrajenega numeričnega modela smo podrobneje raziskali vpliv poševljenja rotorske kletke na pulzacije navora ter vpliv števila kratkostičnih obročev pomožnega navitja na lastnosti vrtilnega magnetnega polja, obliko navorne karakteristike ter velikost zagonskega navora. Na podlagi referenčnega numeričnega modela pa smo pokazali vpliv snovnih lastnosti statorskega in rotorskega paketa na obliko oziroma tendenco električnega toka v prostem teku. Signal napajalne napetosti in obliko toka prostega teka smo opazovali in analizirali tudi na realnem vzorčnem motorju [12].

2 MODELIRANJE ASINHRONSKEGA MOTORJA Z ZASENČENIMI POLI

Numerični model asinhronskega motorja z zasenčenimi poli je zgrajen v programskem okolju Ansys Maxwell v dveh dimenzijah (2D) [13], pri čemer je tretja dimenzija matematično dodana kot globina modela oziroma dolžina rotorskega in statorskega paketa motorja. Rezultate izračunov smo nadalje obdelali v programskem okolju Matlab R2023a.

Oblika in lastnosti referenčnega modela temeljijo na lastnostih realnih motorjev (tj. okvirna geometrija, električne in mehanske lastnosti), ki jih lahko najdemo v literaturi in tehničnih katalogih [1], [12]. Omenjeni izhodiščni podatki so zbrani v tabeli 1.

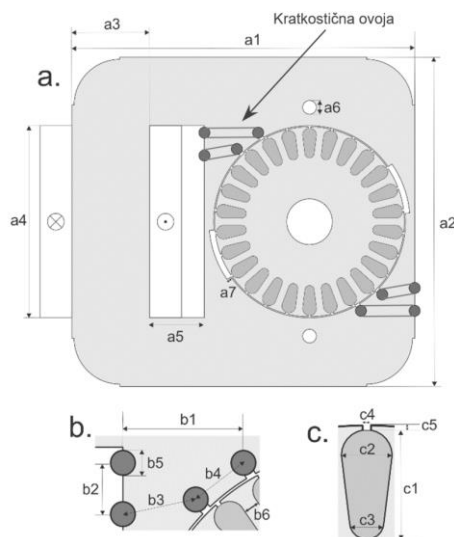
Tabela 1: Dimenzije rotorskega in statorskega paketa motorja.

Nazivni podatki	območje vrednosti
napetost [V]	230
frekvenca [Hz]	50
tok [mA]	250-550
moč na gredi [W]	24-30
navor [mNm]	75-110
vrtilna hitrost n [vrt/min]	2.400-2.850

Preostali podatki, ki smo jih imeli na voljo in smo jih uporabili pri modeliranju referenčnega modela motorja, so naslednji: število ovojev glavnega navitja 2.560, število ovojev pomožnega navitja 2, število rotorskih palic 26 in geometrijski kot poševljenja rotorskih palic 27° [12]. Dimenzije zgrajene geometrije referenčnega numeričnega modela so označene na sliki 2 in podane v tabeli 2. Premer rotorskega paketa je 41,6 mm, premer gredi 10 mm, širina odprtine statorskega utora 1 mm, višina odprtine statorskega utora 0,4 mm, širina zračne

reže 0,4 mm, dolžina rotorskega in statorskega paketa pa 14 mm.

Material statorskega in rotorskega paketa ni znan, zato smo pri referenčnem modelu uporabili material M19-24, ki je na voljo v knjižnici materialov Ansys Maxwell in spada v skupino nižjega cenovnega razreda [13]. Karakteristika materiala $B(H)$ je prikazana na sliki 1 v poglavju Dodatek tega prispevka.



Slika 2: a. Geometrija statorskega in rotorskega paketa z dimenzijami, b. dimenzije pomožnega statorskega navitja na zasenčenem polu in c. dimenzije rotorskega utora (prečni prerez palice kratkostične kletke).

Tabela 2: Dimenzije rotorskega in statorskega paketa motorja v milimetrih.

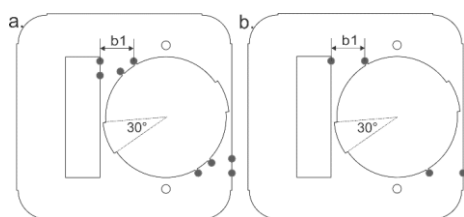
a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
75	72	12	43.6	17.5	3
a_7	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
1	13	5	7.69	6.6	2.46
b_6	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
1.6	6.45	3	2.2	0.5	0.3

Za analizo vpliva različnega števila kratkostičnih ovojev na izhodne karakteristike modela motorja smo poleg referenčnega modela (slika 3a) zgradili še model statorskega paketa z enim kratkostičnim ovojem (slika 3b). Vse druge geometrijske lastnosti so pri obeh modelih ostale enake.

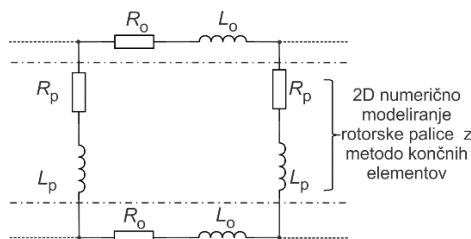
Na slikah 2 in 3 je prikazana lokalna razširitev zračne reže pri obeh modelih. To smo dodali glede na konstrukcijska priporočila iz literature zaradi lažjega zagona oziroma steka motorja [8]. Višina razširitve reže znaša 1 mm, kot razširitve glede na center rotorja pa znaša 30° .

2D-numerično modelirane palice kratkostične kletke in kratkostične ovoje (oboje modelirano vzdolž osi) smo s pomočjo zunanega vezja električno kratkostičili tako na zgornji kot na spodnji strani modela (slika 4). Kratkostične vezi v ravnini motorja smo predstavili z upornostmi R_0 in razsipanimi induktivnostmi L_0 delov kratkostičnih obročev kletke (slika 4) [13]. Tem

elementom smo dodelili izračunane vrednosti [4] $R_0 = 10^{-8} \Omega$ in $L_0 = 10^{-8} \text{H}$, kar v modelu tako rekoč predstavlja idealen kratek stik. Nadomestno vezje kratkostične kletke, ki je upoštevano v sklopljenem električnem in magnetnem modelu motorja, je prikazano na sliki 4. Upornosti in induktivnosti R_p in L_p predstavljajo upornosti in induktivnosti posameznih palic, ki jih program samodejno računa glede na definirane snovno-geometrijske lastnosti [13]. Kratkostične ovoje pomožnega navitja na statorskem paketu smo modelirali kot masivne prevodnike v skladu z enakim postopkom, ki smo ga uporabili za modeliranje kratkostične rotorske kletke. Po dve kratkostični palici (dve palici tvorita kratkostični ovoj) sta bili na čelni in začelni strani motorja povezani z idealno serijsko vezanima upornostjo in induktivnostjo vrednosti $10^{-9} \Omega$ in 10^{-9}H .



Slika 3: Geometrija statorja s kratkostičnimi obroči: a) dva kratkostična ovoja in b) en kratkostični ovoj.



Slika 4: Nadomestno vezje dveh sosednjih kratkostičnih palic rotorske kletke (R_p in L_p) z upoštevanjem upornosti in induktivnosti kratkostičnega obroča (R_0 in L_0).

Vpliv poševljenja rotorskih palic smo analizirali za različne kote zamika palic glede na gred motorja. Najprej smo izračunali pulzacije navora glede na nepoševljeni model (kot zamika 0° glede na vzdolžno os gredi). Za poševljenje rotorja pa smo uporabili programsko orodje, integrirano v okolju Ansys Maxwell [13]. Izbrali smo poševljenje rotorskega paketa z desetimi segmenti. Tako smo praktično zvezno poševili rotor, saj je bila dolžina posameznega segmenta 1,4 mm. Koeficient pulzacij navora ΔM (enačba 1) [11, 12] smo izračunali za kote poševljenja 5° , 20° in 27° glede na nepoševljen rotor 0° .

$$\Delta M = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_{\text{povp}}} 100\%, \quad (1)$$

kjer M_{\max} in M_{\min} predstavljata maksimalno in minimalno vrednost pulzacij navora v stacionarnem obratovalnem stanju, M_{povp} pa povprečno vrednost v stacionarnem obratovalnem stanju.

Pomemben korak pri numeričnem modeliranju je izbira ustrezne gostote mreže končnih elementov v

modelu, saj ta vpliva na natančnost numeričnih izračunov. Mrežo končnih elementov smo postopoma gostili in opazovali njen vpliv na vrednosti numeričnih izračunov in čas izračuna. Za končno mrežo smo izbrali tisto, pri kateri so se izhodni rezultati zaradi gostote mreže razlikovali za manj kot 1 %.

Navor M v odvisnosti od slipa s za enofazne asinhronske motorje lahko zapišemo z enačbo (2) [4]:

$$M(s) = \frac{R_R}{\omega} \left(\frac{I_{R+}^2}{s} - \frac{I_{R-}^2}{2-s} \right), \quad (2)$$

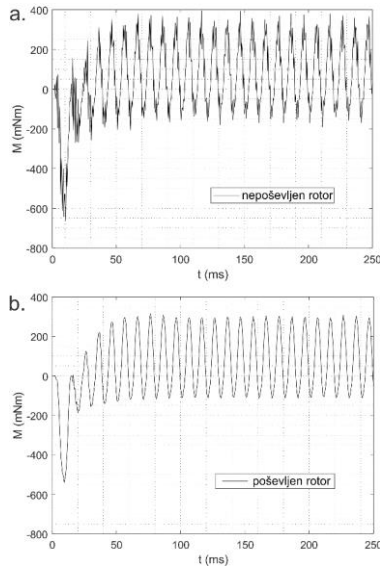
pri čemer R_R (Ω) predstavlja upornost rotorskega navitja oziroma kratkostične kletke, ω (vrt/min) mehansko krožno frekvenco vrtenja, I_{R+} (A) rotorski tok pozitivnega sistema simetričnih komponent in I_{R-} (A) rotorski tok negativnega sistema simetričnih komponent. Iz enačbe 2 je razvidno, da je navor na rotorju enofaznega pogojen z motorskim deležem navora (prvi člen enačbe 2), ki poganja rotor, ter z zavornim delom, ki rotor zavira (drugi člen enačbe 2, ki se odšteva od motorskega dela). Vpliv zaviralnega dela je torej izrazitejši pri manjših slipih. Po drugi strani pa so pulzacije navora zaradi velikega kota poševljenja rotorja in njegovega vztrajnostnega momenta manj izrazite pri višjih hitrosti vrtenja (zelo majhni slipi) kot pri višjih slipih [1].

2.1 Rezultati numeričnega modeliranja z metodo končnih elementov in diskusija

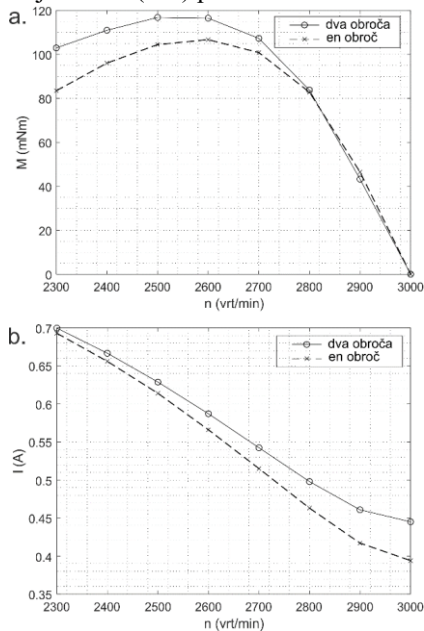
V prvem delu analize smo na referenčnem numeričnem modelu motorja z dvema kratkostičnima ovojema (slika 2a) proučili vpliv kota poševljenja rotorskih palic na potek dinamičnega navora motorja. Analiza vpliva kota poševljenja kratkostične kletke v naših izračunih pokaže, da s poševljenjem rotorskih palic lahko zgladimo potek navora oziroma zmanjšamo pulzacije navora: pri modelu poševljenja rotorskih palic za 5° pulzacije zmanjšamo za 20 %, pri poševljenju palic za 20° za 80 % in pri poševljenju palic za 27° za 100 %. Vse nadaljnje izračune smo izvedli pri kotu poševljenja rotorskih palic 27° . Vrednost uporabljenega kota se ujema tudi s priporočili iz literature in s strani proizvajalca [1, 12]. Slika 5 prikazuje primerjavo izračunanih dinamičnih navorov, in sicer za nepoševljen rotor (slika 5a, palice rotorske kletke so vzporedno poravnane z gredjo) in za poševljen rotor za 27° glede na gred motorja, slika 5b.

V nadaljevanju smo opravili analizo vpliva števila kratkostičnih ovojev na obliko statične navorne karakteristike motorja in pripadajočih efektivnih vrednosti statorskega toka za vsako delovno točko. Model je bil napetostno voden s konstantno amplitudo in frekvenco. Za oba numerična modela (slika 2) smo tako opravili parametrično analizo preleta hitrosti v območju $2.300 \text{ vrt./min} \leq n \leq 2.999 \text{ vrt./min}$ s korakom po 100 vrt./min. Ko je numerični prehodni pojav zaradi napetostnega vodenja popolnoma izzvenel (v zadnji periodi časovnih signalov navora in toka), smo na podlagi izračunanih časovno ustaljenih potekov navorov

in toka glavnega navitja izračunali povprečno vrednost obeh količin. S pridobljenimi rezultati smo nato lahko izrisali statični navorni karakteristiki ($M(n)$) za oba modela (z dvema in enim kratkostičnim ovojem) (slika 6a) in efektivni vrednosti toka glavnega navitja za oba modela v odvisnosti od vrtilne hitrosti $I(n)$ (slika 6b) pri efektivni vrednosti nazivne napetosti 230 V.



Slika 5: Primerjava dinamičnega navora $M(t)$, izračunanega z referenčnim modelom za a. nepoševljen in b. poševljen rotor (27°) pri $n = 2.800$ vrt./min.



Slika 6: Primerjava vpliva števila kratkostičnih ovojjev pomožnega navitja na: a. statično navorno karakteristiko motorja in b. efektivne vrednosti tokov glavnega navitja v odvisnosti od vrtilne hitrosti rotorja.

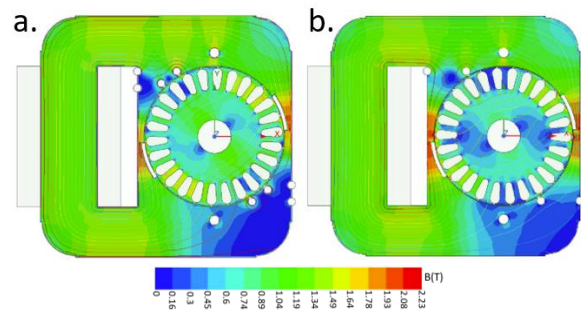
Na podlagi statične navorne karakteristike, prikazane na sliki 6a, lahko identificiramo linearni del karakteristike pod omahnim navorom, v katerem motor običajno obratuje. Na tem območju je tudi nazivna delovna točka

oziroma nazivni slip, pri katerem lahko motor trajno obratuje. Obratovalno točko smo izbrali pri vrtilni hitrosti $n = 2.800$ vrt./min, ki je na zgornji meji linearnega področja (slip je v tej točki 0,06). V tej točki je mehanska moč na gredi motorja (enačba 3) z dvema kratkostičnima ovojemema $P_{meh} = 24,6$ W (pri navoru $M = 83,8$ mNm), v modelu z enim obročem pa 24,3 W (pri navoru $M = 82,8$ mNm), kar se nahaja v območju delovanja realnih motorjev, tabela 1.

$$P_{meh} = \frac{M 2 \pi n}{60} \quad (3)$$

S slike 6a je razvidno tudi, da je omahni navor v področju med 2.500 in 2.600 vrt./min. Na podlagi prikazanih rezultatov lahko ugotovimo, da je navorna karakteristika modela z dvema kratkostičnima ovojemema na pol pri $n = 2.800$ vrt./min nekoliko višja kot navorna karakteristika z le enim kratkostičnim ovojem na pol. Višjo navorno karakteristiko lahko pripišemo višji rezultirajoči gostoti magnetnega pretoka v rotorju (slika 7) in posledično višjemu rotorskemu toku.

Porazdelitev gostote magnetnega pretoka in gostotnic magnetnega pretoka v modelu motorja pri hitrosti 2.800 vrt./min v modelu in z dvema kratkostičnima ovojemema prikazuje slika 7a, v modelu z enim kratkostičnim ovojem pa slika 7b.



Slika 7: $B(T)$ v statorju in rotorju pri $n = 2.800$ vrt./min v modelu: a. z dvema obročema in b. z enim obročem pomožne faze.

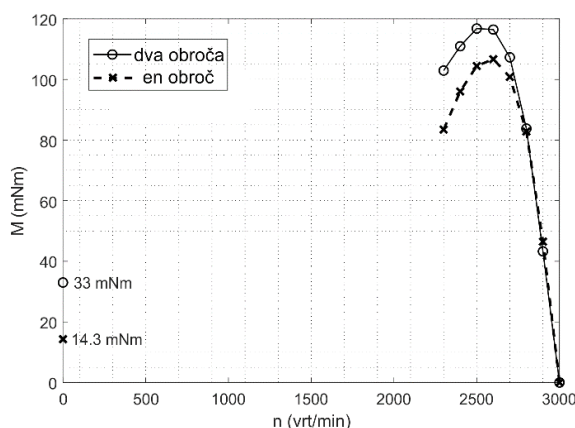
Gostota magnetnega pretoka na sliki 7 je prikazana v ustaljenem stanju v časovnem trenutku ($t = 248$ ms), ko tok glavnega navitja doseže maksimalno vrednost. V tem trenutku tudi pričakujemo največjo gostoto magnetnega pretoka v motorju. Opazimo, da je vrednost gostote magnetnega pretoka v rotorju modela z dvema kratkostičnima ovojemema na pol višja v primerjavi z gostoto v rotorju modela z le enim kratkostičnim ovojem zaradi višjega števila amper ovojjev na zasenčenem polu statorja (tj. dva kratkostična ovoja na zasenčenem polu). Večje število ovojjev privede tudi do bolj izrazitega premika polja izpod zasenčenih polov na magnetno nenasičeni del statorskega pola in dalje v rotor. Takšen vpliv števila kratkostičnih obrocev ima neposreden vpliv na navorno karakteristiko in karakteristiko toka glavnega navitja. Uporabljeni material rotorja in statorja doseže magnetno koleno $B(H)$ krivulje v bližini vrednosti 1,2 T, kot je prikazano na sliki 1 (v Dodatku). Opazimo, da se stator na njegovih ozkih delih v bližini razširitve zračne

reže lokalno nasiči v obeh modelih, kar prispeva k vrtilnemu magnetnemu polju in lažjemu zagonu motorja [1, 2].

Na podlagi primerjave statičnih navornih karakteristik, prikazanih na sliki 6, ugotavljamo, da sta navorni karakteristiki pod omahnim navorom oziroma v linearnem delu, kjer motor navadno tudi obratuje, precej podobni (navora se pri $n = 2.800$ vrt./min razlikujeta le za 1 mNm). Torej na podlagi navorne karakteristike sklepamo, da dodatni kratkostični obroč na vsakem polu pri obravnavani geometriji in snovnih lastnostih materialov ne pripomore k bistvenemu prirastku navora v delovnem linearnem področju delovanja motorja.

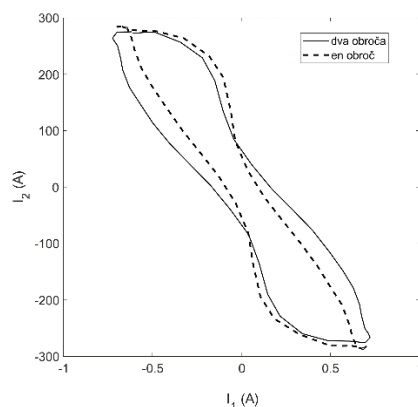
Na podlagi izračunanih efektivnih vednosti tokov glavnega navitja v odvisnosti od vrtilne hitrosti (slika 6b) lahko vidimo, da ima model z dvema kratkostičnima ovojem ($I = 0,5A$ pri 2.800 vrt./min) nekoliko višjo tokovno obremenitev v primerjavi z modelom z le enim kratkostičnim ovojem ($I = 0,46A$ pri 2.800 vrt./min). Višja tokovna obremenitev v linearnem področju delovanja motorja pomeni tudi manjši izkoristek motorja. Pri modelu z le enim kratkostičnim ovojem opazimo, da imamo pri $n = 2.900$ vrt./min in nižji vrednosti toka glavnega navitja nekoliko višji navor kot pri modelu z dvema kratkostičnima ovojem (z dvema ovojem $M = 43,27$ mNm in $I = 0,46A$, z enim ovojem $M = 46,48$ mNm in $I = 0,42A$).

Poudariti je treba, da kljub majhnemu odstopanju navornih karakteristik v linearnem področju obratovanja pri motorju z manjšim številom kratkostičnih ovojev pričakujemo nižji zagonski navor kot posledico šibkejšega in manj izrazitega vrtilnega polja. Zato nas je v nadaljevanju zanimalo, kako število kratkostičnih ovojev motorja vpliva na zagonski navor. Rezultirajoči navorni karakteristiki za oba modela z enim in dvema kratkostičnima ovojem, ki vsebujeta tudi zagonske navore, sta prikazani na sliki 8 (izračune smo opravili pri hitrosti vrtenja 0 vrt./min ter za navore v območju $2.300 \leq n \leq 2.999$ vrt./min; zaradi zahtevnosti časovno odvisnih numeričnih simulacij izračunov za vmesne vrtilne hitrosti do 2.300 vrt./min nismo izvajali, saj motor v tem področju trajno ne obratuje). S slike 8 lahko ugotovimo, da model z dvema kratkostičnima ovojem razvije večji zagonski navor in torej ustvari močnejše vrtilno polje, kar lahko nazorno prikazujeta tudi izračunana hodografa na sliki 9. Na podlagi prikazanih rezultatov lahko ugotovimo, da če v sistemu ali napravi, v katero je motor z zasenčenimi poli vgrajen, ne potrebujemo velikega zagonskega navora, na primer v ventilatorjih, bi glede na rezultate brez zmanjšanja navora v delovnem področju lahko uporabili motor z enim kratkostičnim ovojem. Če je zagonski navor pomemben za izbrano aplikacijo (sistem ali napravo), pa nam lahko dva kratkostična ovoja na statorski pol v primerjavi z enim ovojem zagonski navor kar podvojita. Na sliki 8 lahko vidimo, da s konfiguracijo v naši študiji z dvema ovojem lahko zagotovimo več kot dvakrat višji zagonski navor v primerjavi z enim kratkostičnim ovojem (tj. za faktor 2,31 pri slipu 0, slika 8).



Slika 8: Primerjava statičnih navornih karakteristik z izračunanim zagonskim navorom za modela z enim in dvema kratkostičnima ovojem v pomožnem navitju.

Na podlagi izračunanih tokov v glavnem in pomožnem navitju lahko izrišemo hodograf (slika 9), s katerim lahko izrišemo odvisnost tokov v glavnem (I_1) in pomožnem navitju (I_2), ter torej posredno ponazorimo profil vrtilnega polja, ki ga z določenim dizajnom motorja ustvarimo v zračni reži med rotorjem in statorjem [2].



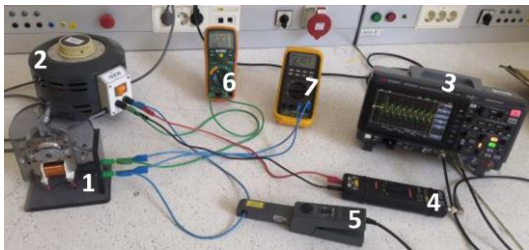
Slika 9: Primerjava hodografov za različno število kratkostičnih ovojev pomožnega navitja v numeričnem modelu.

Tok v glavnem navitju je zaradi večjega števila ovojev bistveno manjši od toka v pomožnem navitju. Primerjava izračunanih hodografov na sliki 9 potrjuje, da v modelu z dvema kratkostičnima ovojem dosežemo kakovostnejše vrtilno polje (idealno bi bila to krožnica) v primerjavi z enim kratkostičnim ovojem. Dobljena oblika hodografov (slika 9) se ujema s pričakovanim profilom vrtilnega polja, ki je poleg enofaznih asinhronskih motorjev z zasenčenimi poli značilen tudi za večino preostalih enofaznih asinhronskih motorjev s pomožno fazo [2]. Vrtilno polje je zaradi značilne oblike enofaznega motorja 'elipsasto' namesto krožno kot pri simetrični gradnji trifaznih motorjev. Prav tako je elipsasta oblika polja pri modelu z enim kratkostičnim obročem pomožnega navitja še bolj izrazito popačena zaradi nasičenja feromagnetnega jedra in vpliva rotorja nazaj na stator. Kljub temu pa taka oblika vrtilnega polja

zadošča, da motor razvije in vzdržuje navor [2], kar smo pokazali z našimi rezultati numeričnega modeliranja. Neželene učinke hrupa in vibracij zaradi neenakomernega vrtilnega polja pa lahko minimiziramo z velikim kotom poševljenja kratkostične kletke [1].

2.2 Rezultati meritev na realnem motorju v prostem teku

Na realnem vzorcu asinhronskega motorja z zasenčenimi poli smo izvedli in analizirali zagon motorja ob vklopu na omrežno napetost. Z osciloskopom smo zajeli prehodni pojav od vklopa do ustaljenega stanja. Slika 12 prikazuje potek merjene napetosti in toka skozi glavno statorsko navitje motorja.

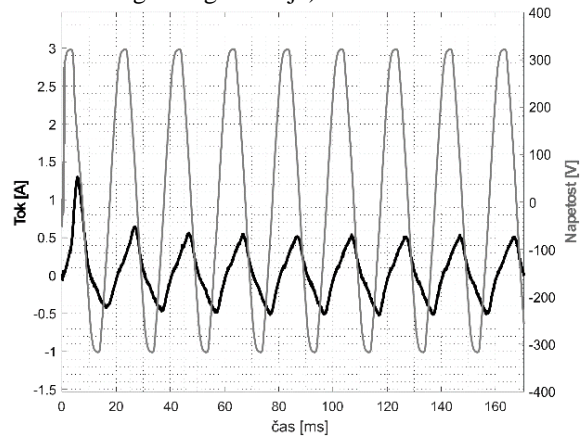


Slika 12: Izvedba meritev na realnem motorju z zasenčenimi poli: 1. vzorčni laboratorijski merjenec, 2. vrtljivi avtotransformator, 3. osciloskop, 4. diferencialna napetostna sonda, 5. tokovna sonda, 6. ampermeter in 7. voltmeter.

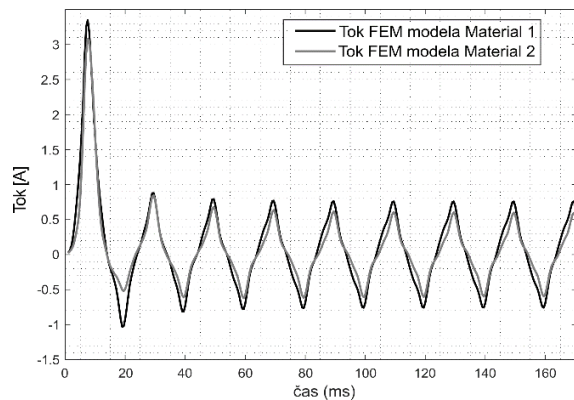
Efektivno vrednost omrežne napetosti 230 V smo nastavili z vrtljivim avtotransformatorjem. Poleg tokovnega odziva smo opazovali tudi časovni oscilogram napetosti. Vklon motorja smo izvedli v prostem teku. Motor ima za lastno hlajenje na rotorski gredi manjši ventilator, ki pa predstavlja zanemarljivo breme, kar nam je omogočilo analizo motorja v prostem teku. Slika 13 prikazuje časovni potek zajetih signalov napetosti in toka v prostem teku ob priklopu motorja na omrežno napetost v trenutku njenega prehoda skozi nič. Maksimalna izmerjena amplitudna vrednost toka glavnega navitja realnega motorja v ustaljenem stanju je znašala $I_{\max}=509$ mA.

Zagon motorja, ki smo ga simulirali z 2D-referenčnim numeričnim modelom, je prikazan na sliki 14. Kot je razvidno s slike 14, je oblika časovnega poteka toka v prostem teku zelo podobna kot v primeru realnega motorja (slika 13). Izmerjena vrednost je nižja v primerjavi z izračunano vrednostjo z referenčnim numeričnim modelom, pri čemer dobimo $I_{\max} = 758$ mA (slika 14). To vrednost lahko nekoliko znižamo z uporabo feromagnetnega materiala z višjim magnetnim kolenom (material 2, slika 1 v Dodatku), pri čemer z istim modelom tok znižamo na $I_{\max}=597$ mA (slika 14). Na potek toka bi lahko še dodatno vplivali s spreminjanjem, predvsem zmanjšanjem širine zračne reže (tehnološko pogojeno) in/ali s povečanjem števila ovojev glavnega navitja [3, 4, 11], kar bi pripomoglo tudi k znižanju

vklopnega toka, saj s tem prav tako vplivamo na induktivnost glavnega navitja).



Slika 13: Izmerjena signala toka in napetosti glavnega navitja pri vklopu industrijskega modela na omrežno napetost 230 V v prostem teku.



Slika 14: Izračunani toki glavnega navitja z numeričnim modelom v prostem teku pri nazivni napetosti 230 V.

3 ZAKLJUČEK

V okviru predstavljene študije smo zgradili numerični model dvopolnega asinhronskega motorja z zasenčenimi poli z asimetrično grajenim statorjem, tj. motor s statorskim C-jedrom. Na podlagi modela, temelječega na metodi končnih elementov v časovno odvisni analizi, smo raziskali vpliv števila kratkostičnih ovojev pomožnega navitja in poševljenja rotorskih palic na rezultirajočo karakteristiko navora in toka glavne faze motorja. Rezultati kažejo, da v delovnem področju motorja (pri nazivnem slipu) model z le enim kratkostičnim ovojem zagotavlja skoraj enak navor kot motor z dvema kratkostičnima ovojevoma, medtem ko model z dvema kratkostičnima ovojevoma vselej razvije večji zagonski navor. Slednje pomeni, da če v napravi ne potrebujemo velikega zagonkega navora, na primer v ventilatorjih, bi glede na rezultate brez zmanjšanja navora v delovnem področju lahko uporabili motor z enim kratkostičnim ovojem. Če pa je zagonski navor pomemben za našo aplikacijo, nam lahko dva kratkostična ovoja na statorski pol v primerjavi z enim

zagoni navor kar podvojita. Na podlagi tega smo proučili možnost zmanjšanja količine uporabljenega materiala in posledično znižanja cene in poenostavitve izdelave motorja, kar je pomembno pri recikliranju in morebitni ponovni uporabi sestavnih delov motorja.

Numerične rezultate smo tudi primerjali z laboratorijskimi meritvami na realnem vzorčnem motorju v prostem teku. Primerjava tokovnih signalov je pokazala, da je tok prostega teka simulacijskega modela nekoliko višji od izmerjenega, vselej pa sta oba toka v istem velikostnem razredu in podobne oblike, kar potrjuje pravilnost našega pristopa numeričnega modeliranja. Boljše ujemanje numeričnega modela z meritvami bi lahko dosegli z natančnim poznavanjem geometrijskih (predvsem zračne reže) in snovnih lastnosti rotorskega in statorskega paketa, lastnosti kratkostične kletke in kratkostičnih ovojev pomožnega statorskega navitja realnega motorja (te smo v tej študiji izbrali na podlagi razpoložljivih materialov v knjižnici Ansys Maxwell) ter natančnih podatkov o glavnem navitju, kot so točno število ovojev, presek žice, razred izolacije, faktor polnjenja navitja itd. Poudariti je treba, da imajo snovne lastnosti kratkostične kletke bistven vpliv na izhodne karakteristike motorja. Kratkostična kletka je namreč običajno izdelana iz posebne aluminijeve zlitine (in je navadno zaščitena kot poslovna skrivnost proizvajalca). Poleg tega bi k natančnejšemu modeliranju lahko pripomoglo tudi modeliranje motorja v vseh treh dimenzijah, s čimer bi lahko natančno določili stresane induktivnosti statorskega navitja in kratkostične rotorske kletke.

ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujejo podjetju Ebm-papst Slovenija, d. o. o. za donacijo vzorčnega modela asinhronskega motorja z zasenčenimi poli, ki v Laboratoriju za električne stroje igra pomembno vlogo pri pedagoškem procesu. Na tem motorju so bile izvedene meritve v prostem teku. Študija je nastala v okviru raziskovalnega dela in univerzitetnega diplomskega dela. Avtorji se zahvaljujejo prof. dr. Petru Jerebu za vse dragocene nasvete in napotke pri modeliranju in analizi električnih strojev.

LITERATURA

- [1] H. Moczala, J. Draeger, H. Krauß, H. Schock, and S. Tillner, Small electric motors. IET, no. 26, 1998.
- [2] I. Boldea and S. A. Nasar, The induction machines design handbook. CRC press, 2018.
- [3] D. Miljavec and P. Jereb, Električni stroji: temeljna znanja. Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, 2019.
- [4] D. Miljavec and P. Jereb, Vezna teorija. Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, 2019.
- [5] H. Wang, K. T. Chau, C. H. T. Lee, L. Cao and W. H. Lam, "Design, Analysis, and Implementation of Wireless Shaded-Pole Induction Motors," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 8, pp. 6493–6503, Aug. 2021.
- [6] A. M. Osheiba, K. A. Ahmed and M. A. Rahman, "Performance prediction of shaded pole induction motors," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no. 5, pp. 876–882, Sept.-Oct. 1991.

- [7] A. J. Kazem and A. M. Ali, "Losses Calculation of Shaded-Pole Induction Motor based on Finite Element Method," 2nd Information Technology To Enhance e-learning and Other Application (IT-ELA), Baghdad, Iraq, pp. 94-99, 2021.
- [8] Dawei Zhou and C. B. Rajanathan, "Finite element aided design optimisation of a shaded-pole induction motor for maximum starting torque," 2000 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG), Toronto, ON, Canada, pp. 257–257, 2000.
- [9] Adem Dalcali, Mehmet Akbaba, Comparison of 2D and 3D magnetic field analysis of single-phase shaded pole induction motors, Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 19, Issue 1, Pages 1–7, 2016.
- [10] Lidija Petkovska, Goga Cvetkovski, New Design of a Shaded Pole Motor for Improved Performance, in e-book: Computer Field Models of Electromagnetic Devices, Volume 34, Editors: Sławomir Wiak, Ewa Napieralska-Juszczak, pp. 479–486, 2010.
- [11] Gal Štampihar, Analiza asinhronskih motorjev z zasenčenimi poli, Diplomsko delo Univerzitetnega študija Elektrotehnika prve stopnje, Univerza v Ljubljani, 2022.
- [12] <https://www.ebmpapst.com>
- [13] <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
- [14] Pietrowski and K. Gorny, "Analysis of torque ripples of an induction motor taking into account a inter-turn short-circuit in a stator winding," Energies, vol. 13, no. 14, p. 3626, 2020.

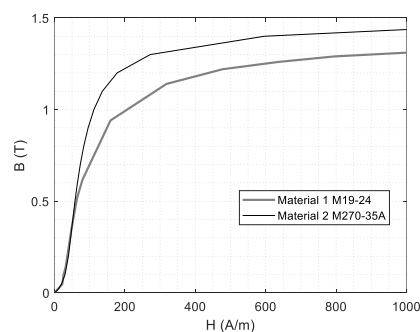
Selma Čorović je doktorirala na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani in na univerzi v Parizu (Université Paris-Saclay) v Franciji. Zaposlena je v Laboratoriju za električne stroje na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njena znanstveno-raziskovalna področja vključujejo razvoj, modeliranje in analizo različnih tipov električnih strojev in elektromagnetnih naprav.

Gal Štampihar je študent druge stopnje smeri Mehatronika na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. V Laboratoriju za električne stroje se ukvarja z numeričnim modeliranjem asinhronskih in sinhronskih strojev.

Damijan Miljavec je zaposlen kot redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer vodi Laboratorij za električne stroje. Poleg pedagoškega dela se znanstveno-raziskovalno ukvarja s posebnimi električnimi stroji, njihovim razvojem in uporabo.

DODATEK

$B(H)$ -karakteristike materialov, ki so uporabljeni za modeliranje asinhronskega motorja z zasenčenimi poli.



Slika 1: $B(H)$ -krivulje feromagnetnih materialov M19-24 in M270-35A, ki sta voljo v knjižnici Ansys Maxwell [13].