

**МОДЕЛОВАЊЕ КОНСТРУКЦИОНИХ ОСОБЕНОСТИ АСИНХРОНЕ МАШИНЕ ПРИМЕНОМ СОФТВЕРСКИХ АЛАТА****MODELING OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF INDUCTION MACHINE USING SOFTWARE TOOLS**

Данило Дробњак, Факултет техничких наука, Нови Сад

**Област – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО**

**Кратак садржај** – У овом раду, моделоване су конструкционе особености асинхроне машине применом софтверских алата. Рађена је студија случаја асинхроне машине санге 11 kW са различитим навојним кораком секције. Упоредјену су различите карактеристике за различите навојне кораке секције.

**Кључне речи:** Асинхрона машина, намотаји, навојни корак, секција

**Abstract** – In this paper, the construction features of the asynchronous machine were modeled using software tools. A case study of an 11 kW asynchronous machine with different throw of the section was made. Different characteristics were compared for different throw of the section.

**Keywords:** Asynchronous machine, windings, throw, section

**1. УВОД**

За формирање обртног момента у циљу покретања радних кола машина данашња технологија нуди неколико могућности – пнеуматски погон, хидраулички погон, СУС погон и онај за који се слободно може рећи да је највише заступљен, електрични. Претварање електричне енергије у механичку поверено је уређајима које обједињено називамо електричним моторима.

Електричне машине су од свих поменутих начина за формирање обртног момента погодне и у том смислу што поседују могућност реверзибилности односно могућност да ток енергије кроз њих може бити двосмеран односно да могу претварати електричну енергију у механичку али и обрнуто, да могу вршити конверзију електричне у механичку.

Асинхрона машина у савременој индустрији представља најважнији уређај за извршење механичког рада. Коришћење асинхроне машине је економски исплативо и оправдано, одржавање је јефтино, отпорна је на грубе манипулације и једноставна је за коришћење, поуздана је и сигурна током рада, није великих габарита. У примени најчешће се сусреће као трофазни мотори.

**НАПОМЕНА:**

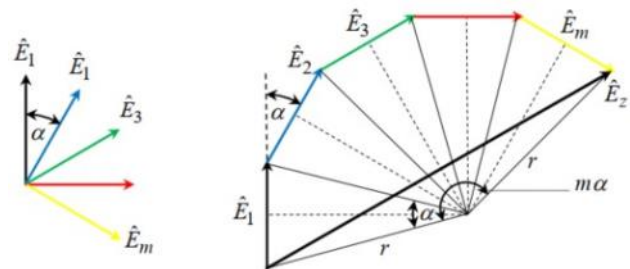
Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Дејан Јеркан.

**2. ОСОБЕНОСТИ И МАТЕМАТИЧКА ПРЕСТАВА АСИНХРОНЕ МАШИНЕ**

Од првих изведби асинхроних машина па до данашњих изведби, асинхроне машине су претрпеле читав низ унапређења и измена у циљу побољшања њиховог рада, али и низ компромиса између економских аспеката експлоатације машина и постизања њихове учинковитости.

**2.1. Навојни сачинилац****2.1.1. Појасни навојни сачинилац**

Више секција намотаја везаних на ред чине једну полно фазну групу. Ако се претпостави да се полно фазне групе састоји од  $m$  секција везаних на ред, оне су смештене у  $2m$  жлебова, односно у две зоне са по  $m$  жлебова. Векторским сабирањем фазора индукованих напона у појединим проводницима који припадају једној зони добија се укупни напон зоне  $E_z$ .



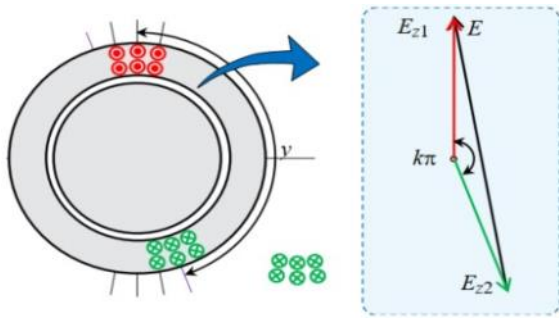
Слика 1 - Фазори индукованих електромоторних сила у проводницима једне зоне [1]

Појасни навојни сачинилац се дефинише се као однос индукованог напона једне зоне  $E_z$ , и алгебарског збира напона свих проводника у зони,  $m \cdot E_1$ :

$$k_p = \frac{E_z}{m \cdot E_1} = \frac{\sin\left(m \frac{\alpha}{2}\right)}{m \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (2.1)$$

**2.1.2. Тетивни навојни сачинилац**

Често се израђују секције намотаја код којих је навојни корак мањи од полног корака  $\tau_p$ , то су секције са скраћеним, навојним кораком. Жлебови у које се смешта секција са скраћеним кораком се налазе на тетиви кружнице па одатле назив тетивна секција, које се могу користити само код двослојног намотаја.



Слика 2 - Електромоторна сила зоне скраћеног намота [1]

Укупан индуковани напон редне везе тетивних секција, односно напон индукован у једној полно фазној групи је векторска разлика фазора електромоторних сила зона, и он износи:

$$E = 2E_z \sin\left(\frac{y}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.2)$$

Однос тог укупног напона  $E$  и алгебарског збира електромоторних сила зона  $2E_z$  представља тетивни навојни сачинилац:

$$k_t = \frac{E}{2E_z} = \sin\left(\frac{y}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.3)$$

### 2.1.3. Резултатни навојни сачинилац

Резултатни навојни сачинилац  $k$  једнак је производу појасног и тетивног навојног сачиниоца. Вредности навојних сачинилаца су углавном врло блиски једници.

$$k = k_p \cdot k_t \quad (2.4)$$

## 2.2. Обртно поље

Типични представник електричних машина је трофазни асинхронни мотор. На статору постоје три расподељена намотаја који су просторно померени за по  $2\pi/3$ . Кроз три фазна намотаја протичу наизменичне струје истих амплитуда и кружне учестаности  $\omega_s$ , које су фазно померене за по  $2\pi/3$ . Те струје стварају вектор магнетнопобудне силе у правцу осе намотаја. Амплитуда магнетнопобудне силе се мења на ободу зазора у функцији времена. Оваква магнетнопобудна сила се назива пулсирајућа магнетнопобудна сила. У таквој машини са три намотаја кроз које теку дане наизменичне струје постоје три пулсирајуће магнетнопобудне силе, односно три пулсирајућа поља.

Резултатна магнетнопобудна сила у сваком тренутку времена је збир магнетнопобудних сила од појединачних намотаја, има константну амплитуду и ротира у простору синхроним брзином  $\omega_s$ . Овој обртној магнетнопобудној сили одговара и обртно поље, познатије као Теслино обртно поље. С обзиром да кроз све три фазе статорског намотаја протичу наизменичне, фазно померене струје, оне узрокују резултатну магнетнопобудну силу у зазору, која се понаша као да је настала од сталних магнета [3],[4].

## 2.3. Губици

Преображај енергије из једне врсте у друг неизбежно је везан са губицима. Према томе, да би асинхронни мотор могао да даје корисну механичку снагу  $P$ , његова утрошена електрична снага  $P_s$ , коју узима из мреже на коју је прикључен, мора да буде већа од корисне снаге за износ свих губитака у мотору.

Од утрошене снаге један део се троши у самом намоту статора на Џулове губитке  $P_{Cus}$ , друг део снаге троши се на губитке у гвожђу статора услед хистерезе и вртложних струја  $P_{Fe}$ . Остатак утрошене снаге преноси се електромагнетним путем помоћу обртног поља на ротор, стога се тај остатак утрошене снаге назива снага обртног поља.

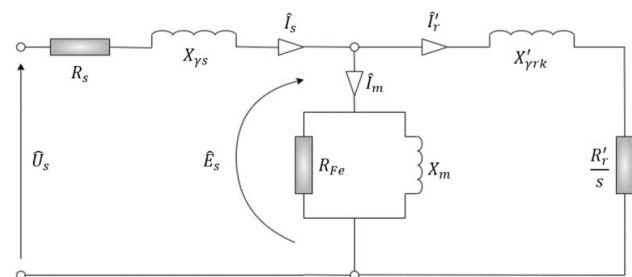
Од снаге обртног поља део се троши на Џулове губитке у баку ротора  $P_{Cur}$ , део на механичке губитке  $P_{gmeH}$  на трење у лежиштима и вентилацији усед трења ротора о воздух, део на додатне губитке  $P_d$ . Према томе корисна снага мотора једнака је:

$$P = P_s - (P_{Cus} + P_{Fes} + P_{Cur} + P_d + P_{gmeH}) \quad (2.5)$$

## 2.4. Еквивалентна шема

Како би се лакше моделовале, асинхроне машине се представљају заменском, еквивалентном шемом. За устаљена стања, шема се може одредити аналогно трофазном трансформатору, при чему је статор представљен као примар трансформатора, а ротор је у улози кратко спојеног секундера.

Да би се добила јединствена еквивалентна шема статорског и роторског намотаја, неопходно је да се сведе коло ротора на статорску страну, при чему се користи релација електромоторних сила. Наиме, веза електромоторних сила ротора и статора се може записати преко преносног односа  $m = E_s/E_{kr}$ , што еквивалентну шему асинхронног мотора чини једнаком трансформаторској шеми.



Слика 3 - Еквивалентна шема асинхронног мотора

## 3. СТУДИЈА СЛУЧАЈА АСИНХРОНЕ МАШИНЕ СНАГЕ 11 kW

Рађена је студија случаја кавезне асинхроне машине снаге 11 kW са различитим навојним кораком секције. У наставку су приказани основни подаци машине, карактеристике машине, а затим су упоређене различите карактеристике за различите навојне кораке секција. За студију случаја је коришћен софтверски алат, компаније ANSYS, за пројектовање електричних машина, Motor-CAD.

### 3.1. Подаци машине

Параметри статора су следећи:

- Број жлебова: 36
- Пречник лим пакета: 210 mm
- Пречним отвора статора: 137 mm
- Ширина зупца: 6.05 mm
- Дубина жлеба: 18 mm
- Радиус угла на дну жлеба: 4.1 mm
- Ширина отвора жлеба: 2 mm
- Угао отвора жлеба: 30°



Слика 4 – Изглед жлеба и једног дела лима статора

Параметри ротора су следећи:

- Број жлебова/штапова: 26
- Број полова: 4
- Ширина отвора штапа: 1 mm
- Дубина отвора горњег дела штапа: 0,4142 mm
- Ширина горњег дела зупца: 8,8415 mm
- Дубина горњег дела шипке: 6 mm
- Ширина доњег отвора шипке: 1 mm
- Дубина доњег отвора шипке: 2,7 mm
- Ширина доњег дела зупца: 8,64 mm
- Дубина отвора доњег дела штапа: 13 mm
- Ваздушни зазор: 0,5 mm
- Пречник вратила: 57 mm
- Пречник отвора на вратилу: 0 mm



Слика 5 – Изглед жлеба и једног дела лима ротора

Намотај:

- Трофазни
- Двослојни
- Број навојака по секцији: 13
- Навојни корак: 7,8,9
- Број паралелних грана: 1
- Веза намотаја: троугао

### 3.2. СТУДИЈА СЛУЧАЈА

#### 3.2.1. Клизање и брзина

На самом почетку прилико задавања вредности синхроне брзине од 1500 o/min и фреквенције од 50 Hz се може константовати да се за различите навојне кораке добија различита номинална брзина машине, као и различите вредности клизања. У случају када је полни корак тр једнак навојном кораку секције у, 9,

клизање износи 4,59% и номинална брзина је 1431,13 o/min. Када се ради о тетивним секцијама, тј. секцијама са скраћеним навојним кораком добија се мање клизање и самим тим већа номинална брзина. У случају када навојни корак износи 8 вредност клизања је 4,37%, а номинална брзина износи 1434 o/min. У случају кад је скраћене још веће, ондосно када је навојни корак 7, вредност клизања се смањује на 3,94% и номинална брзина повећава на 1441 o/min.

#### 3.2.2. Хармоници

У случају када је навојни корак у једнак полном кораку тр, може се рећи да су 3., 5., 15., 17. и 19. хармоник магнетнобудне силе (мпс) истакнути. Основни хармони мпс достиже вредност 47,5 А/завоја.

У наредно случају при скраћењу навојног корака, у=8, трећи хармоник има мало пригушење у односу на случај у=тр. Пети има значајно пригушење, што је и циљ скраћења навојног корака секције. Изражени остају 15., 17. и 19., али они немају значајнијег утицаја на рад машине. Такође, примећује се да је вредност основног хармоника смањена на 47А/завоја.

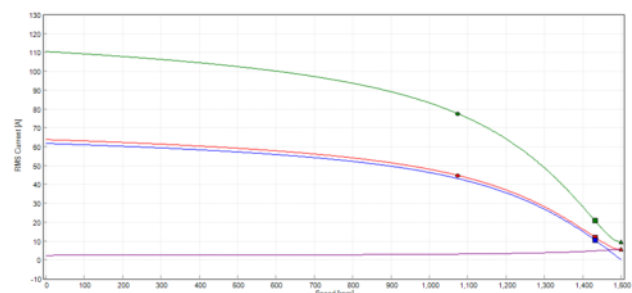
У последњем случају, у=7, трећи хармоник добија знатно пригушење у односу кад је у=тр. Највећи ефекат са овим скраћењем навојног корака је тај што је пети хармоник у потпуности пригушен и више нема никаквог утицаја. У овом случају вредност основног хармоника је 44,5 А/завоја.

Што се тиче резултатног навојног сачиниоца за случај у=тр, значајно су истакнути 17. и 19. хармоник и истакнути су 3.,15. и 21. хармоник. Скраћењем навојног корака су знатно пригушени 3.,15. и 21. хармоник, док истакнути остају 17. и 19. хармоник.

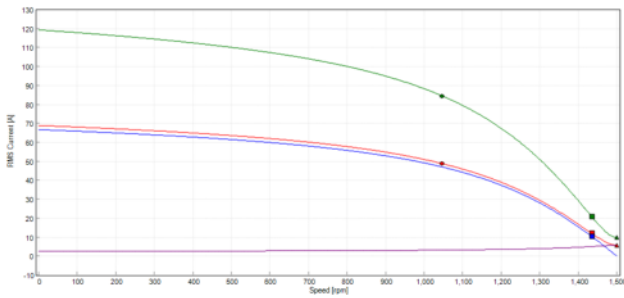
У свим варијантама навојног корака секције вредност основног хармоника резултатног навојног сачиниоца се креће у опсегу од 0,95 до 0,9 што је у складу са очекивањем.

#### 3.2.3. Струје

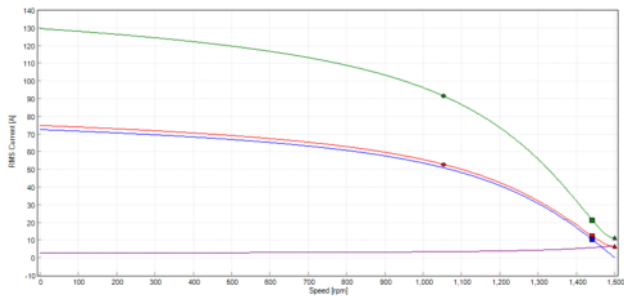
На сликама 6,7,8 зеленом бојом је означена линијска струје, црвеном бојом фазна струја, плавом бојом референта струја ротора, а љубичастом бојом струја магнећења.



Слика 6 – Карактеристика струје у зависности од брзине обртања за случај када је у=9



Слика 7 – Карактеристика струје у зависности од брзине обртања за случај када је  $u=8$



Слика 8 – Карактеристика струје у зависности од брзине обртања за случај када је  $u=7$

Са приказаних карактеристима на сликама 6,7,8 се јасно уочава да како се смањује навојни корак секције, тј. када је навојни корак мањи од полног корака полазне струја се повећава за око 10 А са сваким наредним скраћењем навојног корака. Струје при превалном моменту се са скраћењем секције повећавају за око 8 А. Номиналне струје су врло уједачене разликују се за 0,03 А, а струје магнетисања су повећавају за око 0,3 А са сваким скраћењем  $u$ .

### 3.2.4. Обртни моменат вратила

Када је  $u=тр$ , полазни моменат износи 134,16 Nm, превални моменат, тј. највћи моменат које се развија, има вредност 198,52 Nm при брзини од 1074 o/min, а номинални моменат је 73,99 Nm.

За случај  $u=8$ , може се на основу преходне анализе струје закључити да ће полазни и превални момнат бити већи. Полазни моменат у том случају има вредност 151,75 Nm, превални моменат је 215,67 Nm при бртини од 1047 o/min, а номинални моменат је нешто мањи и има вредност 73,23 Nm.

У последњем случају  $u=7$ , моменат се мења као и у предходном случају  $u=8$  у односу на  $u=тр$ . Полазни моменат је 163,25 Nm, превални моменат износи 233,44 Nm при брзини од 1053 o/min, а номинални моменат је поново нешто мањи и има вредност 72,90 Nm.

### 3.2.5. Фактор снаге и ефикасност

За кавезну асинхрону машину се вредност фактора снаге  $\cos \vartheta$  креће у опсегу 0,8 до 0,9. У случају испитане машине вредности су врло приближне, за  $u=тр$  и  $u=8$  износи 0,85, док је за случај када је  $u=7$  фактор снаге мало мањи и износи 0,84.

Ефикасност машине је у складу са очекивањима и расте са скраћењем корака намотавања. Када је полни

корак једнак навојном, ефикасност је 88,45 %, затим у случају  $u=8$  ефикасност износи 88,81 % и на крају за  $u=7$  ефикасност се повећава на вредност 89,34%.

## 4. ЗАКЉУЧАК

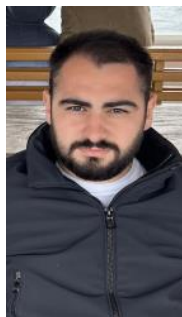
У раду су приказане предности и мане када је навојни корак секције мањи од полног корака. Најзначајнија добит од скраћивања навојног корака је та што се хармоници магнетнобудне силе пригушују, посебно што се пети хармоник може потпуно пригушити. Са друге стране јавља се проблем са повећањем полазне струје која је већа када се користи скраћен навојни корак него када је навојни корак секције једнак полног кораку. Полазне струје су у односу на номинале, за испитивану асинхрону машину снаге 11 kW, веће чак пет до шест пута.

Најнапредније савремено решење за решење проблема великих полазних струја и пуне контроле брзине представља претварач учестаности. Данас у свим модерним, потпуно аутоматизованим погонима стандардно се користе асинхроне машине са претварачем учестаности. Без обзира на његове могућности да добро искористи асинхроне машине, пуна контрола брзине је скоро увек основни захтев сваког погона. Користећи претварач учестаности добијено је низ предности. Неке од најбитнијих су уштеда енергије, оптимизација процеса, мањи трошкови одржавања и побољшано радно окружење.

## 5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Веран Васић, „Скрипта увод у електричне машине“, Нови Сад 2021.
- [2] Бранко Митраковић, Никола Љ. Николић, „Асинхроне машине“, Научна књига, Београд, 1991.
- [3] Емил Леви, Владан Вучковић, Владимир Стрезорски, „Основи електроенергетике – Електроенергетски претварачи“, ФТН Издаваштво, Нови Сад, 2013
- [4] Веран Васић, Борис Думнић, „Електроенергетски претварачи“, ФТН Издаваштво, Нови Сад, 2022.
- [5] Слободан Н. Вукосавић, „Електричне машине“, Академска мисао, Београд, 2010.
- [6] Веран Васић, Електричне машине 2, материјал са предавања, Факултет техничких наука у Новом Саду

### Кратка биографија:



Данило Дробњак рођен је 1998. године у Новом Саду. Основне студије је успешно завршио на Факултету техничких наука у Новом Саду, из Електротехнике и рачунарства, на усмерењу Електричне машине и енергетска електроника. Мастер рад на истом факултету и усмерењу је одбранио 2023. године.