

ЈЕДАН ЛАБОРАТОРИЈСКИ МОДЕЛ ЗА ВЈЕЖБЕ ИЗ АСИНХРОНИХ МАШИНА

Петар Матић, Милош Миланковић, Предраг Родић, *Електротехнички факултет у Бањој Луци*
Гојко Кондић, Момир Радивојевић, *ПП Конел, Бања Лука*

Садржај - У раду је описан поступак реализације једног модела асинхроног мотора намијењеног лабораторијским вјежбама на Електроенергетском одсјеку Електротехничког факултета у Бањој Луци. Модел је асинхрона машина специјалне конструкције која треба студентима да помогне у разумијевању принципа рада асинхроног мотора. Због своје ефектности модел може студентима да послужи и као додатна мотивација за усвајање знања из закона сличности електричних машина. Познато Теслино јаје је идеја за овај модел, а у раду су описани поступци, неопходни компромиси и прорачун конструкције асинхроне машине мале снаге са веома великим међузвонжњем.

1. УВОД

Приликом формирања Лабораторије за електричне машине, електромоторне погоне и испитивање електричних машина на Електротехничком факултету у Бањој Луци, било је потребно да се обезбиједи и сет вјежби везаних за основне принципе рада електричних машина. Ове вјежбе треба да студентима омогуће приказ конструкције машина и разумљиво илуструју принципе рада. Пожељно је да модели буду у што већој мјери слични реалним машинама. У том циљу формиран је један показни модел асинхроног мотора. Основна идеја модела заснована је на чувеном моделу Теслиног (Колумбовог) јајета, а реализација је заснована на примјени закона сличности електричних машина. Као и при конструкцији стандардних електричних машина, поступак конструкције је итеративан процес базиран на усвајању и потом кориговању усвојених вриједности, те експерименталној верификацији.

Теслино јаје је модел асинхроног мотора код кога је ротор у облику јајета. На статору се налази вишефазни (двофазни или трофазни) намотај, а комплетан модел је, у ствари, асинхрон мотор са краткоспојеним ротором у вертикалном положају. Ротор није причвршћен на лежајеве и статор, него се слободно окреће унутар статора на прикладној подлози. Модел се може направити на више начина, али је у конкретной реализацији циљ био да модел буде што сличнији реалној машини и да се при томе испоштују веома скромни материјални ресурси који су били на располагању.

Због чињенице да модел има статор мале аксијалне дужине и веома велики зазор, сразмјеран унутрашњем пречнику статора, очекивана струја магнетнења је веома велика. Сам модел је потребно направити тако да струја магнетнења буде прихватљива, а да се при томе успостави довољна индукција и испоштују физичка ограничења простора за смјештање намотаја. У трајном раду потребно је да се статор мотора не прегријава пошто модел нема форсирано хлађење.

2. КОНСТРУКЦИЈА МОДЕЛА

Статор модела је конструисан од статорског пакета стандардног асинхроног мотора, а ротор је посебно направљен. Приликом конструкције, статорски пакет је скраћен на одговарајућу дужину, те је било потребно промијенити и намотај. Проблем код оваквих модела је веома велики зазор, те је струја магнетизације за успостављање поља у таквом зазору веома велика. Струја магнетизације може се смањити повећавањем броја проводника статора и/или смањењем напона. Промјена напона или броја проводника утиче и на индукцију, али се код оваквих модела, због мале механичке снаге која је потребна само за покривање губитака трења, може дозволити да индукција буде знатно мања него код реалних асинхроних машина. Повећавање броја навојака може се остварити само ако се пресјек проводника у жљебу смањи, тако да се нови намотај може физички смјестити у жљебове, и да при томе пресјек проводника задовољава тражену густину струје. Додатни проблем уноси повећавање омског отпора намотаја, тако да губици у бакру постају превелики и могу довести до прегријавања модела.

2.1. Конструкција ротора

Ротор је направљен од једног комада месинга у облику јајета. Месинг је одабран зато што се механички лако обрађује у потребан облик. Недостатак оваквог избора је мала магнетна пермеабилност месинга (приближно два пута већа од ваздуха). Месингани ротор може се еквивалнетирати жељезним два пута мањег пречника, што доприноси смањењу зазора. Међутим, ако се прорачун спроведе са тако усвојеним зазором, могло би се десити да струја модела знатно порасте ако се ротор извади. У наставку је спроведен прорачун као да ротор не постоји, односно усвојено је уз уважавање Картеровог сачиниоца $1/1-3/$ да је нови зазор једнак унутрашњем пречнику статора.

2.2. Конструкција статора

Да би модел што више одговарао реалној асинхроној машини, његов статор је направљен од статорског пакета стандардног трофазног асинхроног мотора. Намотај је намотан на исти начин као што се намотава у пракси, те су, поред сличности са реалним мотором, оваквом конструкцијом задовољена и ограничења у погледу расположивих средстава односно једноставности израде. Пошто је ротор малих димензија, за гвожђе статора узет је дио статорског пакета стандардног асинхроног мотора мале снаге. Сви подаци о оригиналном статору (аксијална и радијална дужина, број зубаца и сви параметри развијене шеме) били су на располагању. Дио битних података наведен је у Прилогу овог рада. Да би се аксијална дужина статора прилагодила величини ротора, оригинални статорски

пакет је скраћен са дужине l на дужину l_1 , а самим тим се морао промијенити и статорски намотај. Сам модел је асинхронни мотор у празном ходу, па се прорачун овакве машине своди на прорачун пригушнице са веома великим ваздушним зазором. При прорачуну магнетних карактеристика пад напона на отпору и расипној индуктивности статора се занемарује, као и губици у гвожђу (ако нема zasiћења), те се сматра да је укупна струја мотора чисто индуктивна. Захваљујући овим апроксимацијама, могу се писати познате релације за индукцију и струју магнетног асинхронног мотора /1-3/:

$$B = c_1 \frac{pU_f}{N_f l}, \quad (1)$$

$$I_0 = c_2 \frac{B\delta \cdot p}{N_f}, \quad (2)$$

гдје су B , p , U_f , I_0 , N_f , l и δ индукција, број пари полова, фазни напон статора, струја статора, број проводника по фази, аксијална дужина гвожђа статора и зазор, респективно. У изразима (1) и (2) c_1 и c_2 представљају константе које садрже појасни и тетивни сачинилац.

Као што се из израза (1) и (2) види, скраћење пакета статора (смањење дужине l) утиче на повећање индукције, а повећавање зазора δ доводи до повећавања струје празног хода. Проблем прорачуна статора модела своди се на један од проблема конструкције асинхроне машине: на основу двије једначине (1) и (2) потребно је одредити пет непознатих величина (B , p , U_f , I_0 , N_f) тако да машина буде добро конструисана /2,3/. Као улазни подаци у прорачуну познати су l_1/l_n - однос између дужине гвожђа модела и оригиналног статора и $\delta_1/\delta_n \approx D/\delta_n$ - однос између зазора модела и оригиналног мотора. Ова два односа не могу се мијењати.

Приликом пројектовања намотаја потребно је посматрати:

N_{f1}/N_{fn} - однос између броја проводника по фази модела и оригиналног статора;

B_1/B_n - однос између индукције у гвожђу модела и оригиналног мотора;

U_{f1}/U_{fn} - однос између фазних напона модела и оригиналног статора;

I_{01}/I_{0n} - однос између струје модела и струје празног хода оригиналног мотора;

Постоји одређени степен слободе код избора последње три величине. Да гвожђе статора у моделу не би било засићено, потребно је да буде

$$B_1/B_n \leq 1, \quad (3)$$

$$а да напон не буде већи од номиналног, \quad U_{f1}/U_{fn} \leq 1. \quad (4)$$

Струје мотора дефинишу неопходан пресјек проводника у намотају и услове хлађења. Ако се жели задржати исти пресјек проводника, струја празног хода модела треба да буде једнака струји оригиналног статора:

$$\frac{I_{01}}{I_{nf}} = 1. \quad (5)$$

Код асинхронних мотора струја празног хода учествује са 20-50% у укупној струји мотора /4, 5/:

$$\frac{I_{0n}}{I_{nf}} = [0,2 - 0,5], \quad (6)$$

па однос на основу (5) и (6) постаје:

$$\frac{I_{01}}{I_{0n}} = [2 - 5] \quad (7)$$

уз задржавање истог пресјека.

Из (7) може се закључити да ако се жели задржати исти пресјек проводника, може се дозволити повећање струје празног хода модела за два до пет пута у односу на струју празног хода асинхронног мотора (јер модел трајно ради у празном ходу). У случају промјене броја проводника или промјене пресјека, неопходно је извршити и провјеру да ли се потребни намотај може смјестити у жљебове статора /2,3/.

На основу (1) и (2) могу се извести изрази који описују зависност између величина модела (индекс "1") и оригиналног статора (индекс "n"):

$$\frac{B_1}{B_n} = \left(\frac{N_{fn}}{N_{f1}}\right) \cdot \left(\frac{l_n}{l_1}\right) \cdot \left(\frac{U_{f1}}{U_{fn}}\right) \cdot \left(\frac{p_1}{p_n}\right), \quad (8)$$

$$\frac{I_{01}}{I_{0n}} = \left(\frac{N_{fn}}{N_{f1}}\right)^2 \cdot \left(\frac{p_1}{p_n}\right)^2 \cdot \left(\frac{l_n}{l_1}\right) \cdot \left(\frac{U_{f1}}{U_{fn}}\right) \cdot \left(\frac{\delta_1}{\delta_n}\right). \quad (9)$$

У изразима (8) и (9) занемарена је промјена појасног сачиниоца са промјеном броја полова. У Прилогу се налази Табела П1 из које се види да је промјена појасног сачиниоца са промјеном броја полова веома мала, и може се занемарити у грубим прорачунима какав је прорачун оваквог модела. Из израза (8) види се да индукција директно зависи од примијењеног напона, док опада са порастом броја навојака. Струја модела линеарно зависи од прикљученог напона и величине зазора, опада са квадратом броја навојака, али расте са смањењем аксијалне дужине. Смањење броја полова утиче на смањење струје празног хода. У конкретном случају модел би се могао направити као двополни, али би се тада ротор окретао пребрзо. У наредним разматрањима задржан је оригинални број полова.

Да би модел исправно радио, потребно је да индукција не пређе номиналну вриједност, да струја модела не буде превелика (због великог зазора), а и да модел не буде термички угрожен. Постављени захтјеви могу се испоштовати промјеном броја навојака и избором одговарајућег напона.

Пошто се статору само смањује аксијална дужина, конструкционо је најједноставније задржати исти број навојака и исти пресјек. Међутим, тада се напон мора драстично смањити да струја не би била превелика. У Табели 1 приказан је однос напона, индукције и струје празног хода ако се задржи исти број навојака по фази, уз занемарено засићење.

Табела 1: $N_{f1} = N_{fn}$, $p_1 = p_n$

U_{f1}/U_{fn}	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
B_1/B_n	0,33	0,66	1	1,33	1,66
I_{01}/I_{0n}	30	60	90	120	150

Као што се из Табеле 1 може видјети, ако би број навојака остао исти, тада би и при малим напонима

струја магнећена била веома велика, што је последица скраћена аксијалне дужине и драстичног повећавања зазора. У Табели 2 приказани су односи струја магнећена, индукције и броја навојака када би се задржао исти напон. Табеле 1 и 2 су формиране тако што је у (9) уврштено $U_{f1} = U_{fn}$, односно $N_{f1} = N_{fn}$, а онда је за различите односе струја односно напона израчунат однос броја проводника односно струја. У прорачуну су кориштени подаци који се налазе у Прилогу рада, а занемарено је засићење гвожђа

Табела 2: $U_{f1} = U_{fn}$, $p_1 = p_n$

I_{01} / I_{0n}	1	2	3	5	7	10
B_1 / B_n	0,19	0,27	0,33	0,43	0,51	0,61
N_{f1} / N_{fn}	17,3	12,2	10	7,7	6,5	5,4

Из Табеле 1 и 2 може се закључити да је потребно и смањити напон и повећати број проводника да би струја била у подношљивим границама. Према (9) види се да струја опада са квадратом броја проводника, а према (8) индукција обрнуто пропорционално броју проводника, односно струја опада брже него индукција.

При номиналном напону, према (8), индукција ће бити мања од номиналне ако је

$$\frac{N_{f1}}{N_{fn}} > 3,33, \quad (10)$$

те је (10) усвојено за доњу границу односа броја проводника.

Површина жљеба одређује величину намотаја који се може смјестити. Она се може написати као:

$$S \sim \Phi \cdot N_f \cdot k_{isp}(\Phi), \quad (11)$$

гдје је Φ пресјек проводника, а $k_{isp}(\Phi)$ фактор испуне намотаја. Што је пресјек проводника мањи, фактор испуне је већи. На основу (11) може се писати:

$$\Phi_1 = \Phi_n \frac{N_{fn}}{N_{f1}} k_{isp}'(\Phi) \quad (12)$$

Минимални пресјек проводника којим се може намотавати намотај одређен је технологијом намотавања. Осим тога, смањење пресека доводи до повећавања отпора по фази. Зависност отпора по фази од броја навојака и пресека проводника је:

$$R_f \sim \frac{N_f}{\Phi} l, \quad (13)$$

па однос старог и новог отпора статора (уз претпоставку да се фактор испуне не мијења, да су бочне везе приближно исте дужине и да је површина жљеба (11) константна) приближно износи:

$$\frac{R_{f1}}{R_{fn}} = \left(\frac{N_{f1}}{N_{fn}} \right)^2 \frac{l_1}{l_n}. \quad (14)$$

Узимајући у обзир и промјену фактора испуне, отпор по фази биће и већи него дефинисан у (14).

Џулови губици су пропорционални производу фазног отпора и фазне струје:

$$P_{Cu} \sim R_f I_f^2, \quad (15)$$

па се на основу основу (9) и (12-15) може процијенити да ће губици у бакру опадати приближно са квадратом броја навојака. Због битно смањене индукције,

губици у гвожђу су веома мали (опадају са квадратом индукције), тако да се очекује да доминантни губици буду у бакру. Детаљна анализа губитака на овај начин (законом сличности) се не може спровести, него ће губици бити одређени експериментално, јер се не може очекивати да ће струја бити претежно индуктивна.

У конкретном моделу усвојено је да се број проводника у жљебу повећа близу горње границе одређене величином жљеба и технологијом намотавања. При томе је предложени приступ такав да се на основу (9) одржи однос:

$$\left(\frac{N_{fn}}{N_{f1}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\delta_1}{\delta_n} \right) \approx 1, \quad (16)$$

односно да се повећавањем броја проводника у жљебу «компензује» повећавање зазора, а да се на основу (8) и (9) изабере такав напон који ће и струју магнећена држати у прихватљивим границама, и да индукција не буде премалена, а да губици не буду превелики.

На основу (16) усвојен је однос новог и старог броја проводника $N_{f1} \approx 10N_{fn}$. На основу пробног намотаја, усвојен је пресјек проводника $\Phi_1 = 0,4\Phi_n$.

2.3. Практична реализација

Након што је на основу (16) одређен нови број проводника у жљебу и усвојен пресјек такав да намотај може да стане у жљебове, статор је премотан. Задржана је иста шема намотавања (двослојни намотај без скраћена корака), иста спрега и исти број полова. Измјерен је нови отпор по фази који износи $R_f = 151\Omega$, што је према (13) и очекивана вриједност јер се битно повећао број проводника и смањено пресјек.

Модел је испитан огледом празног хода, и, као што је било очекивано, карактеристика празног хода је, због великог зазора, приближно линеарна. Неке од карактеристичних тачака огледа празног хода дате су у Табели 3.

Табела 3: Резултати огледа празног хода

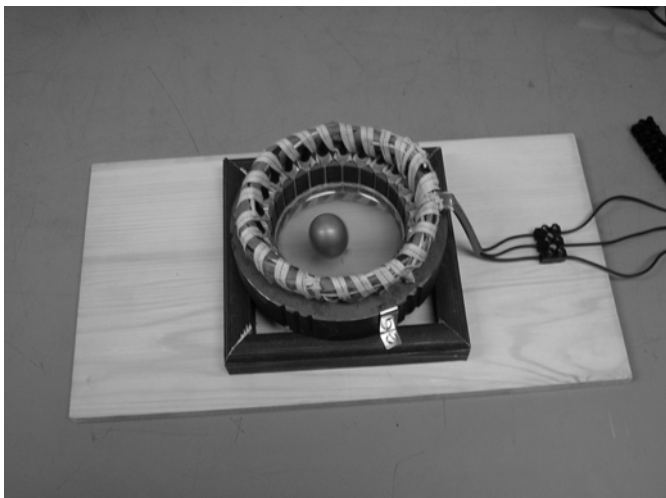
$U_{0f}[V]$	30	60	90	120	150
$I_{0f}[A]$	0,15	0,31	0,45	0,55	0,7
$P_0[W]$	20	40	100	170	270

Услови хлађења модела у односу на оригинални мотор битно су промијењени јер не постоји форсирано хлађење вентилатором. Статор модела се хлади претежно радијацијом, а површина хлађења је битно повећана јер ротор практично не постоји и не пружа топлотни отпор. Експериментом је утврђено да се статор не загријава превише при линијском напону од $150V$, када губици износе око $100W$, струја око $0,5A$, а индукција је на око 15% номиналне вриједности. Ову вриједност индукције треба узети са резервом, јер због великог пада напона на омској отпорности, изрази (8) и (9) нису сигурни.

Статор је остављен дуже времена (три сата) прикључен на овако одређени напон, након чега је утврђено да се ни намотај ни гвожђе нису битно загријали без обзира што се статор хладио искључиво радијацијом топлоте.

Након што је одређена радна тачка (напон статора) таква да се модел не прегријава, у статор је стављено месингано јаје. Пожељно је да површина на којој се јаје

налази буде што равнија и од глатког материјала, како би се смањило трење при поласку и у раду. Јаје се, као што је било и очекивано, окретало у обртном пољу. Није било могућности за мјерење или процјену брзине обртања. Пожељно је да јаје буде што лакше, јер је момент модела због мале индукције веома мали, тако да је zgodно да се јаје направи шупљим. На Сл. 1 приказан је готов модел.



Сл. 1. Фотографија модела

3. ЗАКЉУЧАК

У раду је приказан поступак прорачуна и конструкције специјалне асинхроне машине са великим зазором. Прорачун је базиран на закону сличности електричних машина, као и примјени стандардних поступака при конструкцији машина. Спроведени поступак даје грубе процјене очекиваног понашања готовог модела. На основу приказаног поступка конструисан је модел Теслиног јајета намијењен студентима Електротехничког факултета у Бањој Луци.

Поступак конструкције електричних машина одвија се у више итерација: одређене величине се претпоставе, и на основу њих прорачунају остале. Кориговањем претпостављених величина и испитивањем пробног модела, долази се до коначног рјешења. У конкретном случају, због великог повећавања зазора било је потребно значајно повећати број проводника у жљебу и смањити пресјек да би намотај могао физички да се смјести. На основу процјене базиране на закону сличности усвојен је нови број проводника такав да се «компензује» повећавање зазора. Пресјек проводника је одабран тако да се нови намотај физички може смјестити у жљебове статора и да се може машински намотати. Овакав избор намотаја значајно повећава омски отпор. За усвојени намотај експериментално је усвојен такав напон да се температура статора у трајном раду одржава у дозвољеним границама, а да индукција не буде премалена. Испитивањем готовог модела утврђено је да су задовољени захтјеви у погледу струје и индукције, те температуре намотаја. Олакшавајућа околност је била та да није постојао строг захтјев по индукцији у зазору, тако да је било потребно остварити само толику индукцију да се ротор може обртати.

Неке од препорука за конструкцију су: потребно је узети статорски пакет мотора који има мали фактор снаге (односно има велико међугвожђе), јер је тада релативно

повећавање зазора мање. Такође, пожељно је да мотор има што више полова, јер се према (8) и (9) тражене карактеристике могу лакше добити ако се број полова може смањити. Ако би оригинални мотор био спрегнут у спрегу троугао, оставила би се већа слобода избора фазног напона (превезивањем у звијезду).

Предложени модел може се једноставно направити, а његова употреба у наставном процесу на групи предмета из области Електричних машина помоћи ће студентима при разумијевању принципа рада и конструкције асинхроних машина. Сам модел конструисан је на основу веома грубог прорачуна и представља основу за детаљнији или другачији прорачун. Упечатљивост модела послужиће као додатни мотив за усвајање знања из примјене закона сличности и конструисања електричних машина.

4. ПРИЛОГ

Однос дужине пакета статора оригиналног мотора и модела је:

$$\frac{l_1}{l_n} = 0,3, \text{ а однос зазора } \frac{\delta_0}{\delta_n} \approx \frac{D}{\delta_n} = 90$$

Номинални подаци оригиналног мотора су: $1,1kW$, $U_n = 380V$, Y , $50Hz$, $I_{nf} = 2,5A$, $p = 2$.

Табела III: Однос појасног сачиниоца при промјени броја полова:

p	1	2	3	4
k_p	0,9577	0,9659	0,9799	1

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Б. Митраковић, Н. Николић, "Асинхроне машине", Научна књига, Београд, 1989.
- [2] В. Петровић, "Упут у прорачун асинхроног мотора", Научна књига, Београд, 1963.
- [3] Т. А. Lipo, "Introduction to AC Machine Design", Wisconsin Power Electronics Research Center, University of Wisconsin, 1996.
- [4] Франце Авчин, Петер Јереб, "Испитивање електричних стројева", Техничка založba Словеније, 1968.
- [5] Б. Митраковић, "Испитивање електричних машина", Научна књига, Београд, 1991.

Abstract - In this paper one special induction machine design is presented. Machine is assigned to student's exercises at the Faculty of Electrical Engineering in Banjaluka. Idea for this model is Tesla's induction motor with rotor in shape of egg. Design of model is based on calculation methods for machines with large air gap. Experimental results confirm that model is well designed.

AN LABORATORY MODEL FOR INDUCTION MACHINE PRACTICE

Petar Matić, Miloš Milanković, Gojko Kondić, Momir Radivojević