



Damir Žarko  
FER  
[damir.zarko@fer.hr](mailto:damir.zarko@fer.hr)

Slaven Nad  
FER  
[slaven.nad@fer.hr](mailto:slaven.nad@fer.hr)

Stjepan Stipetić  
FER  
[stjepan.stipetic@fer.hr](mailto:stjepan.stipetic@fer.hr)

Mario Klanac  
FER  
[mario.klanac@fer.hr](mailto:mario.klanac@fer.hr)

## GENERATOR S PERMANENTNIM MAGNETIMA ZA MALE HIDROELEKTRANE

### SAŽETAK

U radu je opisan postupak izrade numeričkog modela sinkronog generatora s permanentnim magnetima za malu hidroelektranu snage 860 kVA koji je modeliran pomoću metode konačnih elemenata korištenjem komercijalnog programskog paketa Mentor Graphics MagNet. Crtanje geometrije stroja, definicija objekata u MagNet-u, izvođenje proračuna polja te obrada izlaznih rezultata su automatizirani programskim kodom napisanim u komercijalnom programskom paketu Mathworks Matlab. Opisan je postupak parametrizacije geometrije stroja, navedeni su detalji statorskog namota, osnovne postavke modela u MagNet-u te su prikazani najvažniji rezultati elektromagnetskih proračuna.

**Ključne riječi:** mala hidroelektrana, generator s permanentnim magnetima, projektiranje, metoda konačnih elemenata

## PERMANENT MAGNET GENERATOR FOR SMALL HYDROPOWER PLANTS

### ABSTRACT

The paper describes the process of creating a numerical model of a synchronous generator with permanent magnets for a small hydropower plant rated 860 kVA, which is modeled using the finite element method and commercial software package Mentor Graphics MagNet. Drawing of machine geometry, object definition in MagNet, execution of field calculations, and processing of the output results are automated with the program code written in commercial software package Mathworks Matlab. The procedure for parameterizing the machine geometry is described, stator winding details are provided, basic model settings in MagNet are listed and the most important results of electromagnetic calculations are shown.

**Key words:** small hydropower plant, permanent magnet generator, design, finite element method

### 1. UVOD

Suvremeni elektroenergetski sustavi sve se više okreću obnovljivim izvorima energije među koje se ubrajaju i hidroelektrane u kojima se potencijalna energija vode koristi za proizvodnju električne energije. Osim klasičnih velikih hidroelektrana postoji i koncept mikro (5-100 kW), mini (100-500 kW) i malih (0,5-10 MW) hidroelektrana [1] kojima se iskorištava potencijal manjih vodotokova. Osnovna prednost u odnosu na velike hidroelektrane je protočni rad ili vrlo mala akumulacija zbog čega imaju manji utjecaj na ekosustav vodotoka te jednostavnije i jeftinije održavanje.

U malim hidroelektranama najčešće se koristi asinkroni generator ili sinkroni generator s istaknutim polovima i uzbuđenim namotom s fiksnom brzinom vrtnje koja se podešava turbinskim regulatorom. U slučajevima varijabilnog protoka i u svrhu povećanja ukupne korisnosti sustava potrebno je varirati brzinu vrtnje generatora čime se mijenja frekvencija njegovog izlaznog napona. U otočnom radu hidroelektrane kao i u slučaju njenog priključka na mrežu potrebno je održavati konstantnu

frekvenciju napona i struje pa se u tu svrhu koristi elektronički učinski pretvarač. Za spoj pretvarača na mrežu uobičajeno se koristi trofazni AFE izmjenjivač (engl. Active Front End - AFE). Ovakav tip pretvarača dobro je poznat u industriji i u području obnovljivih izvora energije. Energetski pretvarač za malu hidroelektranu sastavljen je od generatorskog izmjenjivača, istosmjernog međukruga, mrežnog AFE izmjenjivača i mrežnog filtra.

Kao alternativa ranije spomenutim tipovima generatora u sustavima s varijabilnom brzinom vrtnje javlja se generator s permanentnim magnetima. Na njegovom rotoru se umjesto uzbuđenog namota nalaze permanentni magneti, dok se stator ne razlikuje od statora klasično asinkronog ili sinkronog stroja. Za regulaciju napona i jalove energije između mreže i generatora koristi se frekvencijski pretvarač, a prednost ovog tipa generatora je veća korisnost i bolji omjer snaga/masa.

U okviru ovog rada prikazan je postupak modeliranja sinkronog generatora s permanentnim magnetima za malu hidroelektranu. Stroj se modelira pomoću metode konačnih elemenata (MKE) korištenjem komercijalnog programskog paketa Mentor Graphics MagNet (u daljnjem tekstu MagNet). Crtanje geometrije stroja, definicija objekata, proračun polja te obrada izlaznih rezultata u MagNet-u su automatizirani programskim kodom napisanim u komercijalnom programskom paketu Mathworks Matlab (u daljnjem tekstu Matlab).

## 2. PRIPREMA MODELA

### 2.1 Nazivni podaci generatora

Zahtijevani nazivni podaci generatora s permanentnim magnetima koji je potrebno dimenzionirati bazirani su na nazivnim podacima i specifičnim ograničenjima (npr. gustoća struje, strujni oblog) klasičnog generatora s istaknutim polovima za malu hidroelektranu projektiranog u tvornici Končar - Generatori i motori d.d.. Podaci o faktoru snage vrijede za klasični generator s uzbuđenjem koji je direktno spojen na mrežu i uzimaju se samo u svrhu određivanja radne snage na stezaljkama generatora s permanentnim magnetima iz koje se može izračunati potrebni elektromagnetski moment generatora. Ta vrijednost momenta uspoređuje se s momentom izračunatim iz modela. Budući da se jalova energija i faktor snage na mrežnoj strani reguliraju frekvencijskim pretvaračem, generatorom s permanentnim magnetima se upravlja po principu minimizacije gubitaka u namotu, tj. pronalazi se optimalni položaj vektora struje statora u  $d-q$  koordinatnom sustavu pri kojemu će stroj razviti potrebni moment uz minimalnu struju (eng. Maximum Torque per Ampere - MTPA). Stoga faktor snage u nazivnoj radnoj točki generatora ne mora odgovarati vrijednosti u tablici 1.

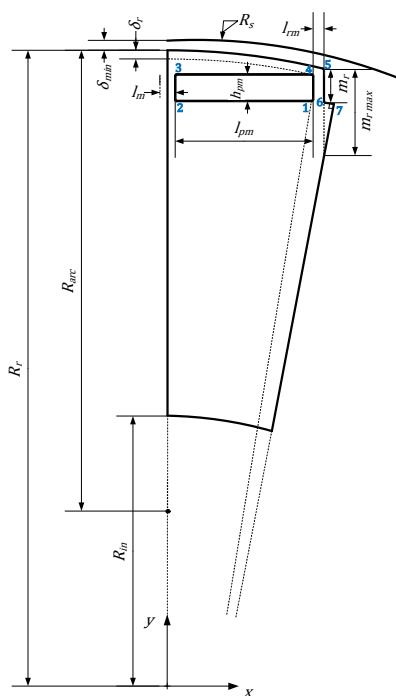
Tablica 1. Zahtijevani nazivni podaci generatora s permanentnim magnetima

Nazivna snaga turbine	760 kW
Prividna snaga generatora	860 kVA
Nazivni napon	690 V
Nazivna struja	719,6 A
Nazivni faktor snage na mrežnoj strani	0,85
Nazivna brzina vrtnje	250 min <sup>-1</sup>
Maksimalna brzina pobjega	480 min <sup>-1</sup>
Nazivna frekvencija	100 Hz
Rotor	unutarnji permanentni magneti
Ograničenje strujnog obloga	40 A/mm (max. 50 A/mm)
Ograničenje gustoće struje	3,5 – 4 A/mm <sup>2</sup>
Širina zračnog raspora	4 mm
Pogon	trajni S1
Klasa izolacije	F
Temperatura okoline	40 °C
Temperatura namota i magneta	120 °C
Lim statora i rotora	M250-50A
Permanentni magneti	N38UH

## 2.2 Parametrizacija geometrije generatora

Modeliranje stroja za potrebe elektromagnetskog proračuna metodom konačnih elemenata u prvom koraku zahtijeva crtanje geometrije poprečnog presjeka, nakon čega slijedi definicija objekata (lim statora i rotora, pločica magneta, vodič u utoru,...) kojima se dodjeljuju odgovarajući materijali (lim M250-50A, magnet N38UH, bakar, zrak,...) s njihovim pripadnim fizikalnim karakteristikama, definicija rubnih uvjeta, komponenata koje rotiraju, faznih namota (coils), električnog kruga i postavki samog proračuna (trajanje simulacije, vremenski korak jedne iteracije, brzina vrtnje, red interpolacijskog polinoma,...).

Proces crtanja poprečnog presjeka stroja u MagNet softveru je automatiziran na način da se funkcije za crtanje pozivaju iz Matlaba. U tu svrhu potrebno je na općeniti način opisati geometriju poprečnog presjeka i odrediti minimalni broj varijabli kojima se jednoznačno mogu odrediti rubne točke ravnih linija te rubne točke i radijusi kružnih lukova kojima se crtaju konture poprečnog presjeka stroja. Glavne dimenzije rotora označene su na sl. 1. s popisom značenja pojedinih veličina.



- $R_s$  : polumjer unutarnjeg provrta statora
- $\delta_{min}$  : minimalna duljina zračnog raspora
- $\delta_r$  : duljina gornjeg desnog ruba šupljine za magnet od ruba polne papuče
- $l_{rm}$  : debljina vanjskih mostova
- $m_r$  : duljina rubnog mosta
- $m_{r\ max}$  : maksimalna duljina rubnog mosta
- $l_m$  : debljina unutarnjeg mosta (između dva magneta jednog pola)
- $l_{pm}$  : duljina prostora za magnet
- $h_{pm}$  : visina prostora za magnet
- $R_r$  : polumjer rotora
- $R_{arc}$  : polumjer zakrivljenosti polne papuče
- $R_{in}$  : polumjer vratila
- $\alpha_p$  : kutni raspon polnog koraka
- $\alpha$  : kutni raspon prostora za magnet
- $\beta$  : kutni raspon magneta

Sl. 1.: Geometrija rotora i značenje pojedinih veličina

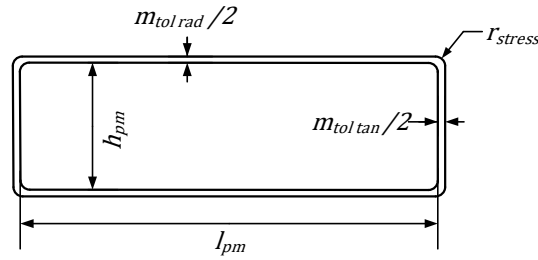
Za potrebe crtanja geometrije definiran je niz varijabli od kojih je većina bezdimenzionalna čime se minimizira pojava geometrije rotora u kojoj se pojedine linije sijeku ili elementi preklapaju. To je vrlo korisno prilikom modeliranja stroja unutar algoritma matematičke optimizacije. Varijable koje se koriste za crtanje rotora su:

- $\frac{D_s}{D_o}$  : omjer unutarnjeg i vanjskog promjera statora
- $\lambda_{pm}$  : omjer šupljina za magnete na rotoru i razlike između vanjskog i unutarnjeg radijusa rotora
- $\lambda_{arc}$  : omjer polumjera zakrivljenosti polne papuče  $R_{arc}$  i polumjera rotora  $R_r$
- $\lambda_\alpha$  : omjer kuta  $\alpha$  i kutnog raspona polnog koraka  $\alpha_p$
- $\lambda_\beta$  : omjer kuta  $\beta$  i kuta  $\alpha$
- $\lambda_m$  : omjer duljine rubnog mosta  $m_r$  i produžene iste duljine do međupolne simetrale  $m_{r\ max}$
- $l_m$  : debljina unutarnjeg mosta (između dva magneta jednog pola)
- $l_{rm}$  : debljina vanjskih mostova

Dio varijabli za crtanje rotora će imati konstantne vrijednosti. U ovom konkretnom slučaju to su:

- debljina gornjeg mostića rotora:  $\delta_r = 3\text{ mm}$ ,
- minimalna širina zračnog raspora:  $\delta_{min} = \delta = 4\text{ mm}$

- polumjer zaobljenja šupljine za magnete:  $r_{stress} = 0,5 \text{ mm}$
- zračnosti za umetanje magneta u tangencijalnom i radijalnom smjeru (sl. 2):  $m_{tol rad} = m_{tol tan} = 0,15 \text{ mm}$



Sl. 2.: Zračnosti za umetanje magneta

Ostale varijable se variraju kako bi se na temelju većeg broja proračuna odredile konačne dimenzije stroja koje zadovoljavaju tražene nazivne podatke prema tablici 1. U sljedećem koraku definiraju se polumjeri kojima su određene granice statora i rotora.

$$\text{Polumjer vratila: } R_{in} = \frac{D_{in}}{2}$$

$$\text{Vanjski polumjer rotora: } R_r = R_s - \delta_{min}$$

$$\text{Vanjski polumjer statora: } R_v = \frac{D_v}{2}$$

$$\text{Visina permanentnog magneta } h_{pm} = (R_r - R_{in})\lambda_{pm}$$

$$\text{Polumjer luka rotora: } R_{arc} = R_r\lambda_{arc}$$

$$\text{Kutni raspon polnog koraka: } \alpha_p = \frac{\pi}{p}$$

$$\text{Kutni raspon na kojem se nalazi šupljina za magnet: } \alpha = \alpha_p\lambda_\alpha$$

$$\text{Kutni raspon magneta: } \beta = \alpha\lambda_\beta$$

Za određivanje duljine permanentnog magneta potrebno je odrediti  $x$  komponentu presjeka jednadžbe kružnice i pravca

$$x^2 + (y - (R_r - R_{arc}))^2 = (R_{arc} - \delta_r)^2, \quad (1)$$

$$y = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2}\right)x + h_{pm}. \quad (2)$$

Nakon uvrštavanja druge jednadžbe u prvu i oduzimanja polovice debljine unutarnjeg mosta, dobiva se izraz

$$l_{pm} = \left[ \sqrt{(\delta_r + h_{pm} - R_r)(\delta_r - h_{pm} + R_r) + (\delta_r - R_{arc})^2 \cot^2\left(\frac{\beta}{2}\right) - (h_{pm} + R_{arc} - R_r) \cot\left(\frac{\beta}{2}\right)} \right] \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) - \frac{l_m}{2}. \quad (3)$$

Prema sl. 1. koordinate točaka elemenata rotora računaju se na sljedeći način:

$$\text{Točka 1} \quad x_1 = \left(l_{pm} + \frac{l_m}{2}\right) \cot\left(\frac{\beta}{2}\right) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad y_1 = \left(l_{pm} + \frac{l_m}{2}\right) \cot\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (4)$$

$$\text{Točka 2} \quad x_2 = \frac{l_m}{2}, \quad y_2 = y_1 \quad (5)$$

$$\text{Točka 3} \quad x_3 = \frac{l_m}{2}, \quad y_3 = y_1 + h_{pm} \quad (6)$$

$$\text{Točka 4} \quad x_4 = x_1, \quad y_4 = y_3 \quad (7)$$

$$\text{Točka 5} \quad x_5 = x_1 + l_{rm}, \quad y_5 = \sqrt{R_{arc}^2 - x_5^2} + R_r - R_{arc} \quad (8)$$

$$\text{Točka 6} \quad m_r \max = y_5 - \frac{x_5}{\tan\left(\frac{\alpha_p}{2}\right)} \quad (9)$$

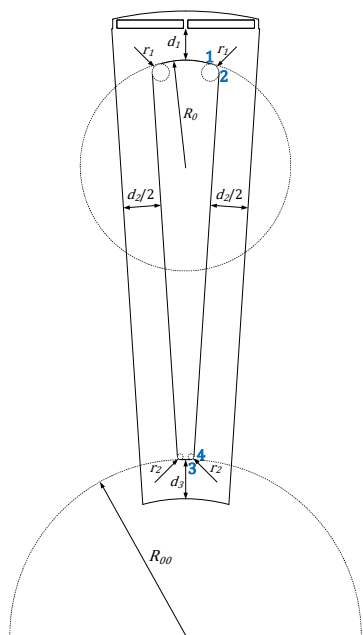
$$m_r = m_r \max \cdot \lambda_m \quad (10)$$

$$x_6 = x_5, \quad y_6 = y_5 - m_r \quad (11)$$

$$\text{Točka 7} \quad x_7 = x_6 + \frac{m_r \max - m_r}{2} \sin(\alpha_p) \quad (12)$$

$$y_7 = \frac{1}{2} \frac{1}{\tan\left(\frac{\alpha_p}{2}\right)} (2x_6 + (m_r \max - m_r) \sin(\alpha_p)) \quad (13)$$

U jarmu rotora modelirane su rupe koje ne utječu na magnetsko polje zbog velike razlike između promjera vratila i promjera na kojem se nalaze utori za magnete, no smanjuju ukupnu masu rotora. Prilikom dimenzioniranja rupa potrebno je pripaziti da ostatak lima aktivnog dijela rotora osigura dovoljnu mehaničku čvrstoću. Prema sl. 3. definiraju se veličine koje utječu na dimenzije rupe:



Sl. 3.: Dimenzioniranje rupe u jarmu rotora

$d_1$  : udaljenost gornjeg ruba rupe od permanentnih magneta

$\frac{d_2}{2}$  : udaljenost bočnih rubova rupe od ruba pola rotora

$d_3$  : udaljenost donjeg ruba rupe od vanjskog ruba vratila

$r_1$  : polumjer kružnice pomoću koje se definira zaobljenje lijevog i desnog gornjeg ruba rupe

$r_2$  : polumjer kružnice pomoću koje se definira zaobljenje lijevog i desnog donjeg ruba rupe

$R_0$  : polumjer kružnice koja definira gornje zaobljenje rupe

$R_{00}$  : polumjer kružnice koja definira donje zaobljenje rupe

Kut desnog ruba rotora računa se prema izrazu  $\alpha_r = \frac{\pi}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{p}\right)$ .

Prije određivanja jednadžbi kružnica koje definiraju zaobljenja, potrebno je definirati pomoćne varijable

$$a_1 = \tan(\alpha_r), b_1 = \frac{d_2}{2 \cdot \cos(\alpha_r)} \quad (14)$$

Koordinata  $y$  središta kružnice polumjera  $R_0$  određuje se pomoću izraza  $q_0 = R_r - d_1 - R_0$ . Za crtanje gornje manje kružnice polumjera  $r_1$  koriste se pomoćni koeficijenti

$$k_1 = a_1; k_2 = \frac{r_1}{\sqrt{1 + \tan^2(\alpha_r)}} \cdot (1 + a_1 \cdot \tan(\alpha_r)) + b_1. \quad (15)$$

Varijable  $p_1$  predstavlja  $x$  koordinatu središta kružnice polumjera  $r_1$ , a određuje se rješavanjem sljedeće nelinearne jednadžbe koristeći programski paket Matlab:

$$(p_1^2 + R_0^2 - r_1^2 + (k_1 \cdot p_1 + k_2 - q_0)^2)^2 - 4 \cdot R_0^2 \cdot p_1^2 - 4 \cdot R_0^2 \cdot (k_1 \cdot p_1 + k_2 - q_0)^2 = 0. \quad (16)$$

Druga točka središta kružnice računa se prema izrazu  $q_1 = k_1 \cdot p_1 + k_2$ . Prema sl. 3. točke 1 i 2 imaju sljedeće koordinate:

**Točka 1**

$$x_1 = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{q_1 - q_0}{p_1}\right)^2}}, y_1 = \frac{x_1 \cdot (q_1 - q_0)}{p_1} + q_0 \quad (17)$$

**Točka 2**

$$x_2 = p_1 + \frac{r_1 \cdot \tan(\alpha_r)}{\sqrt{1 + \tan^2(\alpha_r)}}, y_2 = q_1 - \frac{r_1}{\sqrt{1 + \tan^2(\alpha_r)}} \quad (18)$$

Kružnica koja definira donje zaobljenje rupe u rotoru je koncentrična s provrtom,  $y$  koordinata središta jednaka je nuli, a polumjer joj je veći od polumjera provrta za duljinu  $d_3$

$$q_{00} = 0, R_{00} = R_{in} + d_3. \quad (19)$$

Za crtanje donje manje kružnice polumjera  $r_2$ , koriste se pomoćni koeficijenti

$$k_1 = a_1; k_2 = \frac{r_2}{\sqrt{1 + \tan^2(\alpha_r)}} \cdot (1 + a_1 \cdot \tan(\alpha_r)) + b_1. \quad (20)$$

Varijable  $p_2$  predstavlja  $x$  koordinatu središta kružnice polumjera  $r_2$ , a određuje se rješavanjem sljedeće nelinearne jednadžbe koristeći programski paket Matlab:

$$(p_2^2 + R_{00}^2 - r_2^2 + (k_1 \cdot p_2 + k_2 - q_{00})^2)^2 - 4 \cdot R_{00}^2 \cdot p_2^2 - 4 \cdot R_{00}^2 \cdot (k_1 \cdot p_2 + k_2 - q_{00})^2 = 0. \quad (21)$$

Druga točka središta kružnice polumjera  $r_2$  računa se prema izrazu  $q_2 = k_1 \cdot p_2 + k_2$ . Prema sl. 3. točke 3 i 4 imaju sljedeće koordinate:

**Točka 3**

$$x_3 = \frac{R_{00}}{\sqrt{1 + \left(\frac{q_2 - q_{00}}{p_2}\right)^2}}, y_3 = \frac{x_3 \cdot (q_2 - q_{00})}{p_2} + q_{00} \quad (22)$$

**Točka 4**

$$x_4 = p_2 + \frac{r_2 \cdot \tan(\alpha_r)}{\sqrt{1 + \tan^2(\alpha_r)}}, y_4 = q_2 - \frac{r_2}{\sqrt{1 + \tan^2(\alpha_r)}} \quad (23)$$

Statorski utor prikazan je na sl. 4. Jednadžbe koje definiraju koordinate rubnih točaka konture utora dane su u nastavku.

Točka 1  $x_1 = -\frac{b_u}{2}, y_1 = h_u + R_s$  (24)

Točka 2  $x_2 = \frac{b_u}{2}, y_2 = h_u + R_s$  (25)

Točka 3  $x_3 = -\frac{b_u}{2}, y_3 = R_s$  (26)

Točka 4  $x_4 = b_o - \frac{b_u}{2}, y_4 = R_s$  (27)

Točka 5  $x_5 = -\frac{b_u}{2}, y_5 = R_s + h_{klin} + h_{mostić}$  (28)

Točka 6  $x_6 = \frac{b_u}{2}, y_6 = R_s + h_{klin} + h_{mostić}$  (29)

Točka 7  $x_7 = -\frac{b_u}{2} - b_{izbočine}, y_7 = R_s + h_{klin} + h_{mostić}$  (30)

Točka 8  $x_8 = b_o - \frac{b_u}{2}, y_8 = R_s + h_{mostić}$  (31)

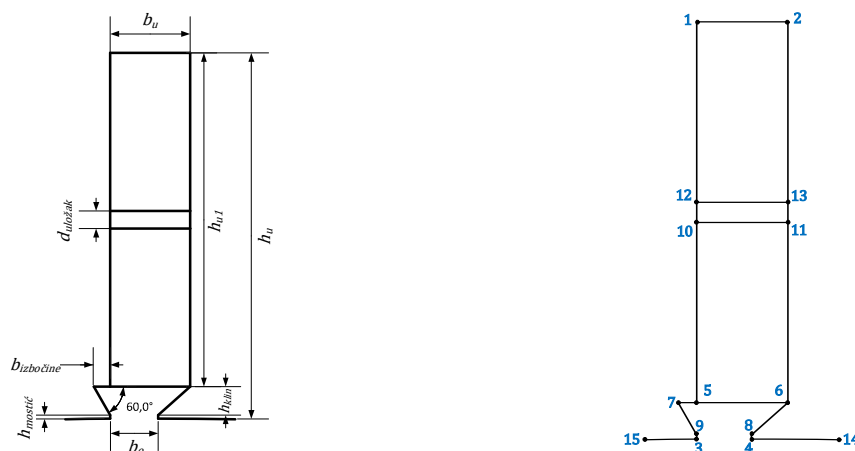
Točka 9  $x_9 = -\frac{b_u}{2}, y_9 = R_s + h_{mostić}$  (32)

Točka 10  $x_{10} = -\frac{b_u}{2}, y_{10} = R_s + h_{klin} + h_{mostić} + \frac{h_{u1}}{2} - \frac{d_{uložak}}{2}$  (33)

Točka 11  $x_{11} = \frac{b_u}{2}, y_{11} = R_s + h_{klin} + h_{mostić} + \frac{h_{u1}}{2} - \frac{d_{uložak}}{2}$  (34)

Točka 12  $x_{12} = -\frac{b_u}{2}, y_{12} = R_s + h_{klin} + h_{mostić} + \frac{h_{u1}}{2} + \frac{d_{uložak}}{2}$  (35)

Točka 13  $x_{13} = \frac{b_u}{2}, y_{13} = R_s + h_{klin} + h_{mostić} + \frac{h_{u1}}{2} + \frac{d_{uložak}}{2}$  (36)



Sl. 4.: Utor statora s dimenzijama i brojčanim oznakama rubnih točaka

### 2.3 Parametri namota statora

Za stator je odabrano  $N = 216$  utora i  $2p = 48$  polova. Radi se o razlomljenom namotu čiji broj utora po polu i fazi iznosi  $q = 3/2 = a_q/b_q$ . Nazivnik  $b_q = 2$  označava broj polova nakon kojega se magnetska slika u stroju ponavlja. To je ujedno i minimalni broj polova koje je potrebno modelirati u MagNet-u kako bi se ispravno izračunao moment, inducirani naponi, induktiviteti itd. Polni korak iznosi  $\tau_p = \frac{N}{2p} = \frac{216}{48} = 4,5$  pa je odabrani korak svitka  $y = 4$ . Tablica namota za prva dva pola dana je u tablici 2., a raspored vodiča po fazama i referentni smjerovi struja u vodičima koji se definiraju u MagNet softveru su prikazani na sl. 5. Brojevi u tablici namota označavaju redne brojeve utora u kojima se nalaze počeci svitaka u donjem sloju utora. Krajevi svitaka pomaknuti su za korak svitka  $y$ .

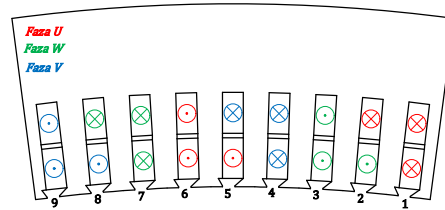
Odabrana gustoća struje u statorskom namotu iznosi  $J = 3,5 \text{ A/mm}^2$ . Kako bi se dobio potrebni linijski napon 690 V, namot je izveden s  $a = 12$  paralelnih grana. U tom slučaju broj vodiča po utoru iznosi  $z_u = 16$  pa broj zavoja po svitku koji zauzima jednu polovicu utora u dvoslojnom namotu iznosi 8. Presjek vodiča iznosi  $q_1 = 17,2746 \text{ mm}^2$ . Strujni oblog stroja može se odrediti prema izrazu

$$A = \frac{z_u \cdot \frac{I_n}{a} \cdot N}{D_s \cdot \pi} \cdot f_n = \frac{16 \cdot \frac{719,596}{12} \cdot 216}{1670 \cdot \pi} \cdot 0,9452 = 37,3375 \frac{\text{A}}{\text{mm}} \quad (37)$$

Izoliranje svitaka u utoru te konačne dimenzije štancanog utora navedene su u tablici 3.

Tablica 2. Tablica namota ( $N = 215$ ,  
 $2p = 48$ )

	U		W		V	
N	1	2	3	4	5	
S		6	7	8	9	



Sl. 5.: Raspored vodiča po fazama

Tablica 3.: Izoliranje svitka u statorskom utoru

	Svitak	
	Širina / mm	Visina / mm
Parcijalni vodič	4,5	2
Parcijalni vodič - izoliran	4,8	2,3
Broj parcijalnih vodiča u vodiču	2	1
Dimenzije vodiča	9,6	2,3
Broj vodiča u svitku	1	8
<b>Dimenzije svih vodiča u svitku</b>	<b>9,6</b>	<b>18,4</b>
Vertikalni uložak	0,16	-
Horizontalni uložak	-	-
Ovez	0,3	0,3
Dopušteno odstupanje svitka	0,14	0,1
<b>Dimenzije svitka</b>	<b>10,2</b>	<b>18,8</b>
Dimenzije svitaka u utoru	10,2	37,6
Podloga na dnu utora	-	0,5
Podloga pod klinom	-	0,5
Međuslojni uložak	-	2,5
Utorski oblog	0,6	0,9
Dopušteno odstupanje ulaganja	0,2	0,2
Dopušteno odstupanje pakiranja	0,3	0,3
<b>Dimenzije štancanog utora</b>	<b>11,3</b>	<b>42,5</b>

Višestrukim ponavljanjem proračuna određene su glavne dimenzije stroja koje zadovoljavaju tražene nazivne podatke. Pri tome je dobiveno:

Vanjski promjer stroja:  $D_v = 1840$  mm

Duljina paketa:  $l_{Fe} = 412$  mm

Promjer provrta statora:  $D = 1670$  mm

Promjer vratila:  $D_{in} = 700$  mm

#### 2.4. Proračun otpora namota i rasipnog induktiviteta glave namota

Otpor i rasipni induktivitet glava statorskog namota potrebno je odrediti analitički jer geometrija 2D modela ne obuhvaća čeoone dijelove namota. Oni se dodaju u električni krug u MagNet modelu u seriju s „Coil“ objektom svake faze (sl. 6.) jer utječu na ukupni fazni napon. Skraćenje namota statora iznosi  $\beta_y = \frac{y}{\tau_p} = \frac{4}{4,5}$ . Utorski korak iznosi  $\tau_u = \frac{D_s \pi}{N} = \frac{1670 \cdot \pi}{216} = 24,29$  mm. Za dvoslojni namot duljina vodiča u glavi namota statora računa se prema izrazu [2]

$$l_{gl} = \frac{\pi(D_u + h_u)\beta_y}{2p \sqrt{1 - \left(\frac{b_u + d_1}{\tau_u}\right)^2}} + 2A_1 + 1,6h_{u1} = \frac{\pi \cdot (1670 + 30) \cdot 0,8889}{48 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{11,3 + 3}{24,29}\right)^2}} + 2 \cdot 30 + 1,6 \cdot 42,5 = 251,6 \text{ mm} \quad (38)$$

gdje je  $A_1$  duljina ravnog dijela glave na izlazu iz utora,  $d_1$  je razmak između svitaka u glavi, a  $h_{u1}$  je visina utora do klina. Statorski namot je projektiran za klasu izolacije F, dok je njegovo zagrijavanje unutar B klase izolacije te se pretpostavlja da srednja temperatura namota iznosi 120 °C. Isti iznos temperature definira se i za magnetne, dok ostatak stroja ima temperaturu 100 °C. Vodljivost bakra na temperaturi namota iznosi  $\sigma_{Cu} = 41,66$  MS/m. Otpor jedne faze statorskog namota na radnoj temperaturi određuje se prema izrazu

$$R_f = \frac{1}{\sigma_{Cu}} \frac{z}{a} \frac{l_{gl} + l_{Fe}}{q_1} = \frac{1}{41,66 \cdot 10^6} \cdot \frac{96}{12} \cdot \frac{(251,58 + 413) \cdot 10^{-3}}{17,2746 \cdot 10^{-6}} = 7,38 \text{ m}\Omega. \quad (39)$$

Budući da se u MagNet-u ne modelira cijeli stroj već samo jedan njegov dio, otpor faze modela može se odrediti prema izrazu

$$R_{model} = R_f \frac{a^2 b_q}{2p} = 0,0074 \cdot \frac{12^2 \cdot 2}{48} = 0,0446 \Omega. \quad (40)$$

Otpor glave namota u modelu računa se prema sljedećem omjeru

$$R_{gl} = R_{model} \frac{l_{gl}}{l_{Fe} + l_{gl}} = 0,0446 \cdot \frac{251,5782}{412 + 251,5782} = 0,016866 \Omega. \quad (41)$$

Utorski korak statora na sredini visine utora iznosi

$$\tau'_u = \frac{(D_s + h_u)\pi}{N} = \frac{(1670 + 47) \cdot \pi}{216} = 24,97 \text{ mm}. \quad (42)$$

Istak glave namota određuje se prema

$$m_{gl} = \frac{y \tau'_u (b_u + d_1)}{2 \sqrt{\tau'^2_u - (b_u + d_1)^2}} = \frac{4 \cdot 24,97 \cdot (11,3 + 3)}{2 \cdot \sqrt{24,97^2 - (11,3 + 3)^2}} = 34,89 \text{ mm}. \quad (43)$$

Rasipna vodljivost glave namota računa se prema izrazu

$$\begin{aligned} \Lambda_g &= 1,13 f_t^2 (A_1 + 0,5 m_{gl}) q \mu_0 = \\ &= 1,13 \cdot 0,9848^2 \cdot (30 + 0,5 \cdot 34,8858) \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} = 9,8006 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{A}}. \end{aligned} \quad (44)$$

Rasipna reaktancija glave namota po fazi stroja iznosi

$$X_{gl} = 12,56 f p q \left(\frac{z_u}{a}\right)^2 \Lambda_g = 12,56 \cdot 100 \cdot 24 \cdot 1,5 \cdot \left(\frac{16}{12}\right)^2 \cdot 9,8006 \cdot 10^{-8} = 0,0079 \Omega. \quad (45)$$

Rasipna reaktancija glave namota modela se računa prema izrazu

$$X_{model} = X_{gl} \frac{a^2 b_q}{2p} = 0,0079 \cdot \frac{12^2 \cdot 2}{48} = 0,0473 \Omega. \quad (46)$$

Rasipni induktivitet glave namota modela iznosi

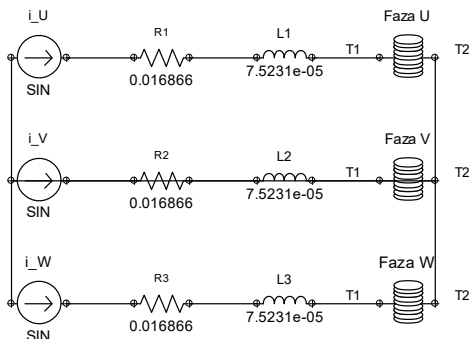
$$L_{\sigma gl} = \frac{X_{model}}{2\pi \cdot f} = \frac{0,0473}{2\pi \cdot 100} = 7,5231 \cdot 10^{-5} \text{ H}. \quad (47)$$

## 2.5. Modeliranje električnog kruga

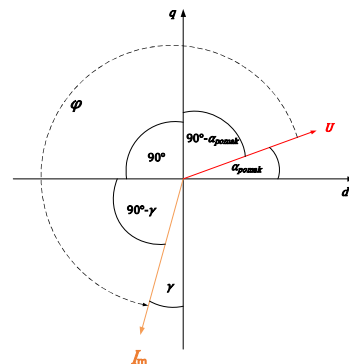
Vremensku promjenu struja u strujnim izvorima na sl. 6. potrebno je definirati tako da se vektor struje nalazi u 4. kvadrantu  $d$ - $q$  sustava (generatorski rad u motorskom koordinatnom sustavu) pod kutom  $\gamma$  u odnosu na negativnu  $q$  os (sl. 7.). Os  $d$  je postavljena u smjeru djelovanja permanentnih magneta, a magnetska os faze U je prema rasporedu vodiča na sl. 5 pomaknuta u odnosu na os  $d$  za kut

$$\alpha_{pomak} = \left(\frac{a_q - 1}{m \cdot a_q} + \frac{y_k}{m \cdot q} - 1\right) \cdot 90^\circ + \frac{180^\circ}{N} p = \left(\frac{3-1}{3 \cdot 3} + \frac{4}{3 \cdot 1,5} - 1\right) \cdot 90^\circ + \frac{180^\circ}{216} \cdot 24 = 30^\circ \text{ el}. \quad (48)$$

U tom slučaju se struja faze U mijenja prema izrazu  $i_U(t) = I_m \cdot \sin(\omega t - \alpha_{pomak} - \gamma)$ . Struje ostalih faza pomaknute su za  $120^\circ$ , odnosno  $240^\circ$ . Za referentnu fazu amplituda struje izračunava se prema izrazu  $I_m = \frac{I_n \sqrt{2}}{a} = \frac{719,596 \sqrt{2}}{12} = 84,805 \text{ A}$ .



Sl. 6.: Električni krug u MagNet modelu



Sl. 7.: Položaj vektora struje u odnosu na os faze U



## 2.6. Postavke permanentnih magneta

Materijal N38UH na 120 °C ima sljedeće karakteristike: remanencija  $B_r=1,11$  T, koercitivna sila  $H_c=-846355$  A/m, relativna permeabilnost  $\mu_r=1,044$ . Magneti su magnetizirani okomito na dulju stranicu pločice magneta pri čemu je za unos podataka u MagNet potrebno odrediti smjer vektora normale na površinu magneta (sl. 8). Kut koji odgovara zakretu magneta  $i$ -tog pola računa se pomoću izraza

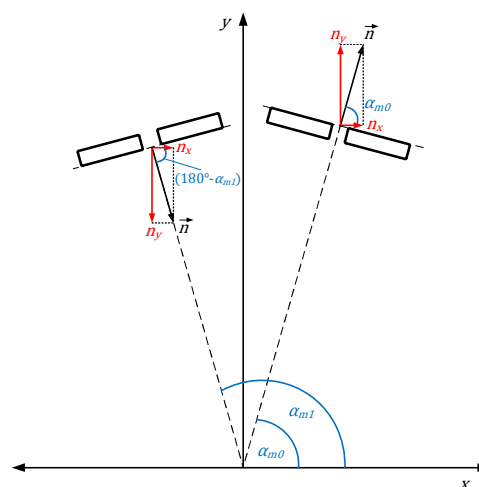
$$\alpha_{m(i-1)} = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_p}{2} + (i-1)\alpha_p \quad (49)$$

gdje je  $\alpha_p = 2\pi/(2p)$ . Komponente vektora normale prvog pola računaju se prema izrazima

$$n_x = \cos(\alpha_{m0}), \quad n_y = \sin(\alpha_{m0}), \quad (50)$$

a drugog pola prema izrazima

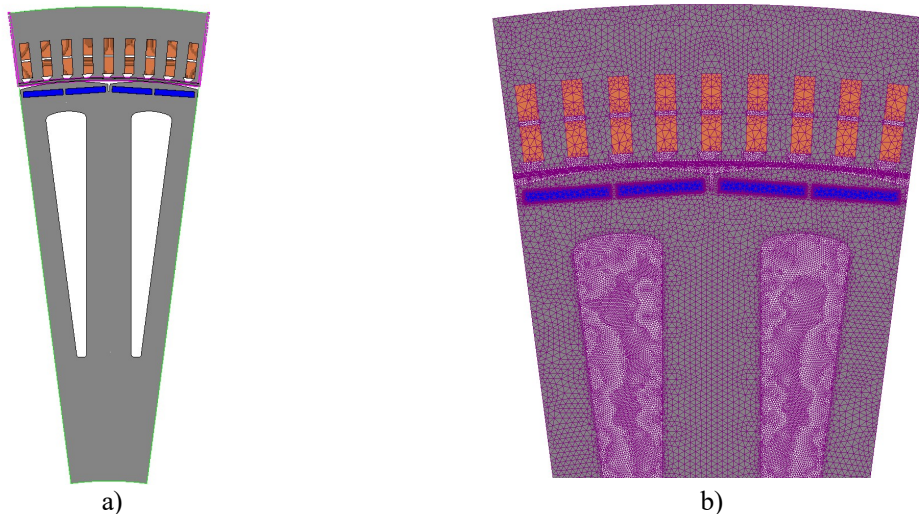
$$n_x = -\cos(\alpha_{m1}), \quad n_y = -\sin(\alpha_{m1}). \quad (51)$$



Sl. 8.: Smjer magnetizacije permanentnih magneta

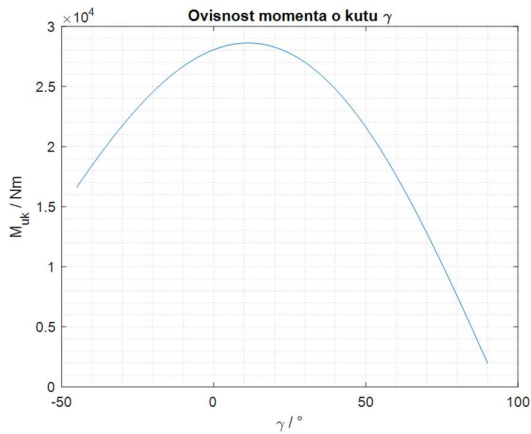
## 3. REZULTATI PRORAČUNA

Nakon izvođenja Matlab koda za automatiziranu definiciju modela generatora s permanentnim magnetima dobiven je model prikazan na sl. 9. Proračun polja porođen je „Transient 2D with Motion“ simulacijom u trajanju 10 ms (jedna perioda) u koracima po 0,1 ms čime se dobiva 100 točaka po periodi. Izvršen je niz proračuna s različitim vrijednostima kuta  $\gamma$  (sl. 7.) s ciljem pronalaska one vrijednosti kuta pri kojoj se postiže maksimalni moment stroja (MTPA radna točka). To je ujedno i nazivna radna točka. Sl. 10 pokazuje da je MTPA radna točka dobivena pri kutu  $\gamma=11^\circ$ . Magnetsko polje i indukcija u nazivnoj radnoj točki prikazani su na sl. 11.

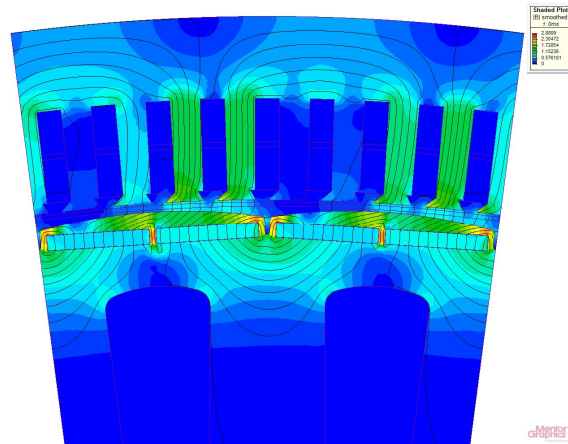


Sl. 9.: Model generatora s permanentnim magnetima u MagNet softveru, a) solid model, b) detalj mreže

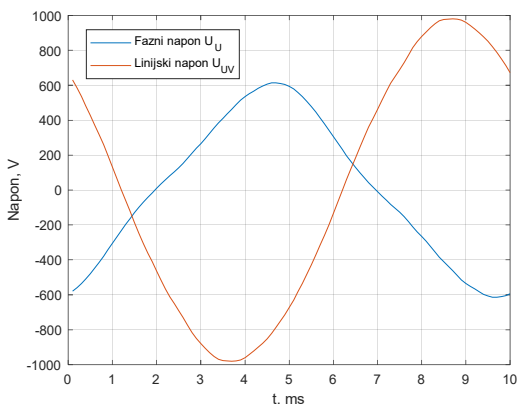
Induktiviteti namota u  $d$  i  $q$  osi izračunati su u nazivnoj radnoj točki metodom „smrzavanja permeabilnosti“ koja je detaljno opisana u [3]. Valni oblici faznog i linijskog napona opterećenog generatora prikazani su na sl. 12. Gubici u željezu izračunati su MagNet softverom koristeći Steinmetzov model u obliku  $P_{Fe} = K_h f^\alpha B^\beta + K_e f^2 B^2$ . Parametri  $K_h = 0,00778446$ ,  $\alpha = 1,23074$ ,  $\beta = 1.79023$ ,  $K_e = 6.42433 \cdot 10^{-5}$  su određeni MagNet softverom prema podacima o gubicima lima M250-50A u ovisnosti o frekvenciji i magnetskoj indukciji iz baze materijala MagNet-a. Izračunati gubici uvećani su množenjem s estimiranim faktorom obrade ( $K_{xFe} = 2$ ) koji uključuje i gubitke zbog harmonika u struji koje unosi pretvarač. Najvažniji izlazni rezultati sumirani su u tablici 4.



Sl. 10.: Ovisnost momenta o kutu  $\gamma$  pri nazivnoj struji namota statora



Sl. 11.: Magnetsko polje i indukcija u nazivnoj radnoj točki



Sl. 12.: Valni oblici faznog i linijskog napona u nazivnoj radnoj točki

Tablica 4.: Izlazni rezultati proračuna

Naziv	Vrijednost
Nazivni elektromagnetski moment ( $M_n$ )	-28627 Nm
Nazivni faktor snage ( $\cos \varphi$ )	0,842
Nazivni kut vektora struje – MTPA ( $\gamma$ )	11°
Otpor namota na 120 °C ( $R_{f120}$ )	7,38 mΩ
Induktivitet u $d$ osi ( $L_d$ )	0,5153 mH
Induktivitet u $q$ osi ( $L_q$ )	0,5821 mH
Induktivitet poprečne magnetizacije ( $L_{dq}$ )	-1,3488 μH
Ulančeni tok polja magneta u $d$ osi ( $\psi_{md}$ )	0,7764 Vs
Ulančeni tok polja magneta u $q$ osi ( $\psi_{mq}$ )	-0,01829 Vs
Magnetska indukcija u zubu ( $B_z$ )	1,55 T
Magnetska indukcija u jarmu ( $B_j$ )	0,75 T
Gubici u namotu ( $P_{Cu}$ )	11518 W
Gubici u željezu ( $P_{Fe}$ )	7535 W
Gubici u magnetima ( $P_{PM}$ )	34,7 W

## ZAKLJUČAK

U radu je opisan postupak modeliranja generatora s permanentnim magnetima snage 860 kVA za male hidroelektrane primjenom komercijalnog softvera MagNet čije izvođenje je automatizirano programskim kodom napisanim u Matlabu. Prikazan je postupak parametriranja geometrije i ostalih ulaznih podataka stroja te su navedeni najvažniji izlazni rezultati koji se mogu dobiti elektromagnetskim proračunom 2D metodom konačnih elemenata.

U sljedećim koracima trebalo bi provjeriti otpornost magneta na demagnetizaciju u slučaju udarnog kratkog spoja na stezaljkama generatora, izračunati mehaničke gubitke, gubitke u čeonim dijelovima stroja, dodatne gubitke u namotu zbog skin efekta, izvršiti detaljne toplinske proračune kako bi se utvrdile maksimalne temperature u namotima i magnetima te mehaničke proračune naprezanja u kritičnim dijelovima paketa rotora i statora.

## LITERATURA

- [1] Stručne smjernice-male hidroelektrane, IPA program Europske unije za Hrvatsku, Twinning Light projekt, EU HR/2011/IB/EN/02 TWL, Zagreb, rujan/listopad 2015.
- [2] D. Ban, D. Žarko: Projektiranje asinkronih strojeva, materijal iz kolegija Projektiranje u elektrostrojstvu, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2018.
- [3] D. Žarko, D. Ban, R. Klarić: Finite Element Approach to Calculation of Parameters of an Interior Permanent Magnet Motor, Automatika, 46(3–4), 2005., 113-122