

4. ОГЛЕД ПРАЗНОГ ХОДА И КРАТКОГ СПОЈА АСИНХРОНЕ МАШИНЕ СА НАМОТАНИМ РОТОРОМ

4.1. ТЕОРИЈСКИ ДЕО

Еквивалентна шема асинхроне машине се добија следећим поступком:

- изведу се еквивалентне шеме кола фазног навоја статора (у даљем тексту статорског кола) и кола фазног навоја ротора (роторског кола), и
- спајају се оба кола у једно, при чему се претходно врши свођење роторских величина на статор (чиме се елиминише дејство обртања ротора).

Еквивалентно коло статора

Талас резултантног флуksа у зазору обрће се синхронно у односу на навоје статора и у њима индукује емс. Напон на крајевима статора се разликује од индуковане емс за пад напона у омском отпору R_1 и реактанси расипања фазног навоја статора X_1 :

$$\underline{U}_1 = (R_1 + jX_1) \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1$$

Индукована емс по фази статора \underline{E}_1 је једнака :

$$\underline{E}_1 = -j\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \Phi \cdot N_z \cdot k_t \cdot m \cdot k_p \cdot p$$

при чему су:

- f - фреквенција прикључног напона
- Φ - средња вредност магнетног флуksа
- N_z - број проводника у жлебу
- k_t, k_p - тетивни и појасни навојни сачинилац
- m - број жлебова по полу и фази
- p - број пари полова

Индукована емс \underline{E}_1 се може изразити преко струје празног хода \underline{I}_0 и комплексног сачиниоца пропорционалности \underline{Z}_0 који представља импедансу магнећења.

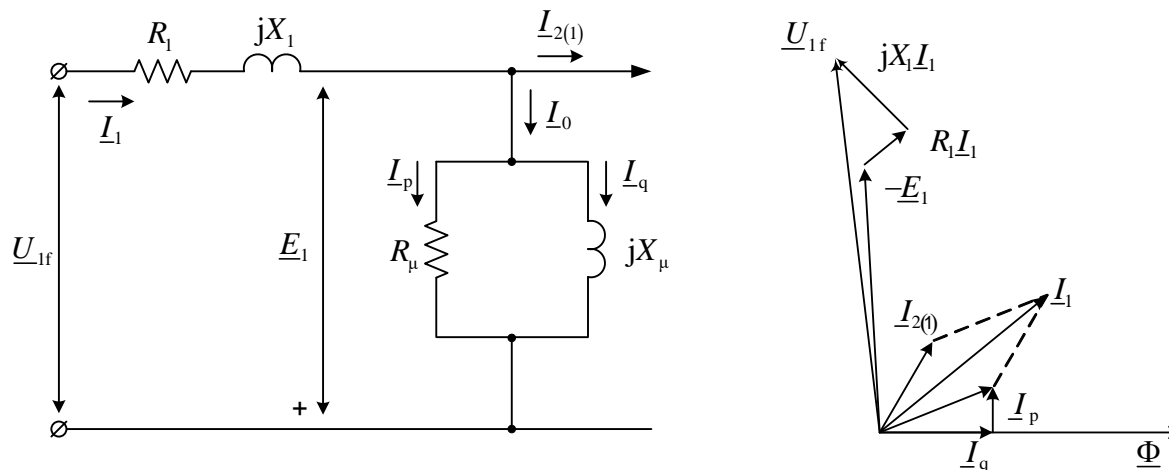
$$\underline{E}_1 = -\underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_0$$

Струја празног хода I_0 покрива губитке активне и реактивне снаге у идеалном празном ходу. При празном ходу се механички губици асинхроног мотора покривају енергијом из електричне мреже на коју је мотор прикључен. Реактивној снази која служи за магнећење машине одговара реактивна компонента струје празног хода I_q (струја магнећења), а активној снази која се троши на губитке у гвожђу одговара активна компонента струје празног хода I_p . У еквивалентној шеми се активна и реактивна компонента струје празног хода представљају као струје које пролазе кроз паралелну везу активне отпорности R_μ и реактансе X_μ .

Струја статора се састоји из две компоненте: компоненте побуђивања I_0 и компоненте оптерећења сведене на статор $I_{2(1)}$. Компонента оптерећења $I_{2(1)}$ се јавља само ако је мотор оптерећен, у празном ходу једнака је нули и струја статора се изједначава са струјом празног хода:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}_{2(1)}$$

Фазорски дијаграм и еквивалентно коло статора асинхроне машине су приказани на слици 4.1:



Слика 4.1: Фазорски дијаграм и еквивалентно коло статора асинхроне машине

Еквивалентно коло ротора

У колу ротора делује активна отпорност ротора R_2 и реактанса расипања ротора X_2 , тако да једначина напонске равнотеже има облик:

$$\underline{E}_2 = (R_2 + jX_2) \cdot \underline{I}_2$$

Пошто се поље статора обрће синхроним брзином обртања n_1 а ротор се обрће у истом смеру брзином n , деловање поља статора на ротор се може замислити као да је ротор непомичан, а поље статора се врти у односу на непомичан ротор брзином обртања $n_2 = n_1 - n$ у супротном смеру. Тада се у ротору индукују напони и струје чија је фреквенција f_2 (фреквенција клизања):

$$f_2 = \frac{p \cdot n_2}{60} = \frac{p \cdot n_1 \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1}}{60} = f_1 \cdot s \Leftrightarrow f_1 = \frac{p \cdot n_1}{60} \quad \text{и} \quad s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

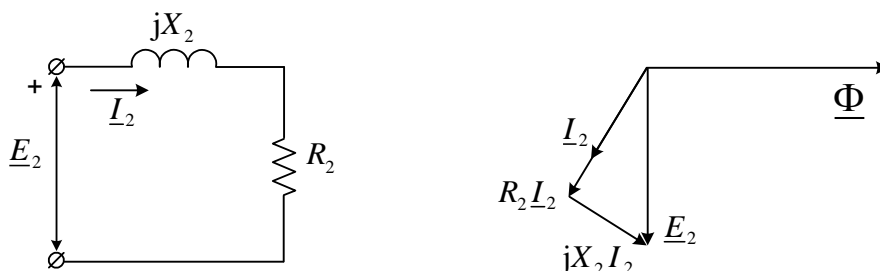
Са променом фреквенције ротора мењају се и све величине које од ње зависе: индуковани напон E_2 и индуктивни отпор X_2 . Ако се величине E_2 и X_2 изразе преко вредности E_{2k} и X_{2k} при укоченом ротору ($n=0 \Rightarrow s = (n_1 - n_2)/n_1 = 1$) добија се:

$$E_2 = s \cdot E_{2k} \quad X_2 = s \cdot X_{2k}$$

Електрична отпорност роторског кола не зависи од клизања s па је:

$$R_2 = s \cdot R_{2k}$$

Фазорски дијаграм и еквивалентно коло ротора асинхроне машине су приказани на слици 4.2:



Слика 4.2: Фазорски дијаграм и еквивалентно коло ротора асинхроне машине

Свођење роторских величина на статор

Да би се могла нацртати еквивалентна шема АМ потребно је извршити свођење роторских величина на статор (слично свођењу секундарних величина на примар трансформатора). Овим свођењем се добија:

$$\underline{E}_2 \Rightarrow \underline{E}_{2(1)}, R_2 \Rightarrow R_{2(1)}, X_2 \Rightarrow X_{2(1)}, I_2 \Rightarrow I_{2(1)}$$

Поред овог свођења потребно је извршити модификацију кола ротора (замену ротирајућег са еквивалентним непокретним ротором):

$$\underline{E}_{2(1)} = (R_{2(1)} + jX_{2(1)}) \cdot I_{2(1)} \quad /: s$$

$$\frac{\underline{E}_{2(1)}}{s} = \left(\frac{R_{2(1)}}{s} + \frac{jX_{2(1)}}{s} \right) \cdot I_{2(1)}$$

$$\underline{E}_{2k(1)} = \left(\frac{R_{2k(1)}}{s} + X_{2k(1)} \right) \cdot I_{2(1)}$$

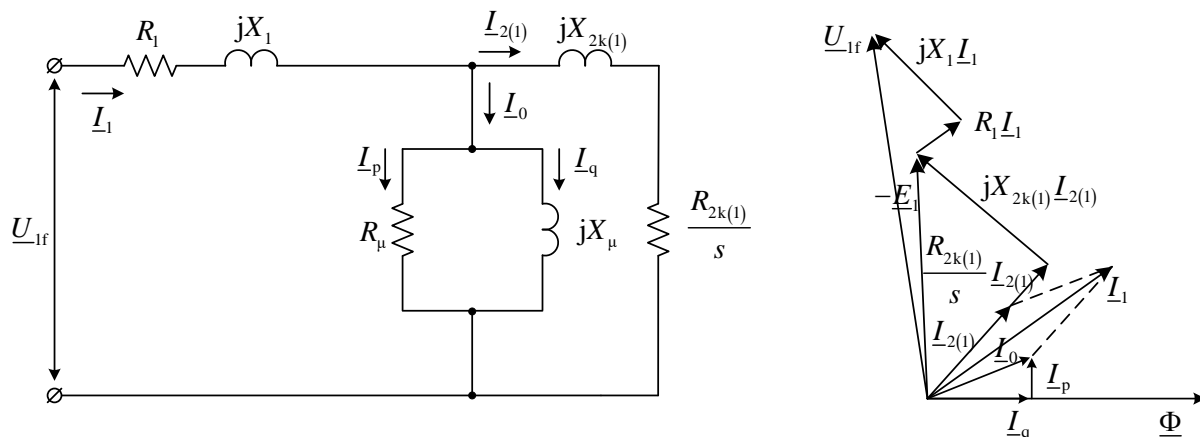
Када је ротор укочен, за асинхронну машину кажемо да је у **кратком споју**, јер се тако и понаша у односу на електричну мрежу, и тада се понаша као трансформатор у кратком споју!

Вредност емс индуковане у укоченом ротору сведена на страну статора $E_{2k(1)}$ једнака је индукованој емс E_1 :

$$\underline{E}_{2k(1)} = \underline{E}_1$$

па се коло статора и ротора могу спојити образујући еквивалентну шему асинхроне машине.

Фазорски дијаграм и еквивалентна шема асинхроне машине су приказани на слици 4.3:



Слика 4.3: Еквивалентна шема и фазорски дијаграм асинхроне машине

Испитивања у огледу празног хода:

Под празним ходом машине подразумева се стање у којем је статорски намотај прикључен на називни напон, а ротор није механички оптерећен. Подразумева се да је:

- клизање приближно једнако нули
- Џулови губици у ротору једнаки нули
- струја магнећења једнака је струји празног хода.

Дакле, подразумева се да Џулови губици у ротору не учествују у губицима празног хода. Пре огледа празног хода, потребно је измерити отпорност статорског намотаја.

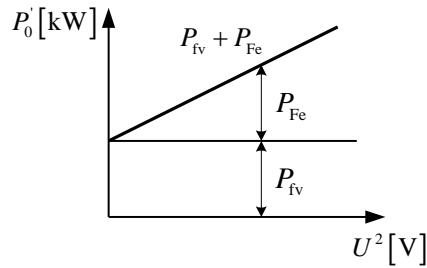
Током извођења огледа мере се следеће величине:

- напон напајања – напон празног хода, U_0
- струја напајања – струја празног хода, I_0
- снага празног хода, P_0

У асинхроној машини се током извођења огледа празног хода јављају следећи губици:

- губици услед магнећења магнетског кола (губици у гвожђу статора), P_{Fe}
- Џулови губици у намоту статора, $P_{Cu1}=3 R_1 I_0^2$
- Механички губици услед трења и вентилације P_{fv}

Ради потребе одређивања степена искоришћења, односно укупних губитака, потребно је раздвојити механичке губитке и губитке у гвожђу. То се постиже екстраполацијом криве губитака празног хода у функцији прикључног напона до ординате, чиме се добијају механички губици P_{fv} који зависе само од брзине. Будући да је овај поступак екстраполације недовољно тачан, препоручује се поступак линеарне екстраполације. У поступку линеарне екстраполације се, користећи квадратну зависност губитака у гвожђу од напона напајања, добија права губитака која се једноставно екстраполира до ординате:



Слика 4.4: Екстраполациона крива

Испитивања у огледу кратког споја:

Под кратким спојем асинхроне машине подразумева се стање у којем је намотај статора прикључен на напајање, а ротор је механички укочен. Оглед кратког споја врши се или при називној струји, са циљем одређивања параметара еквивалентне шеме, или при називном или сниженом напону, са циљем мерења полазних карактеристика: полазне струје и полазног момента.

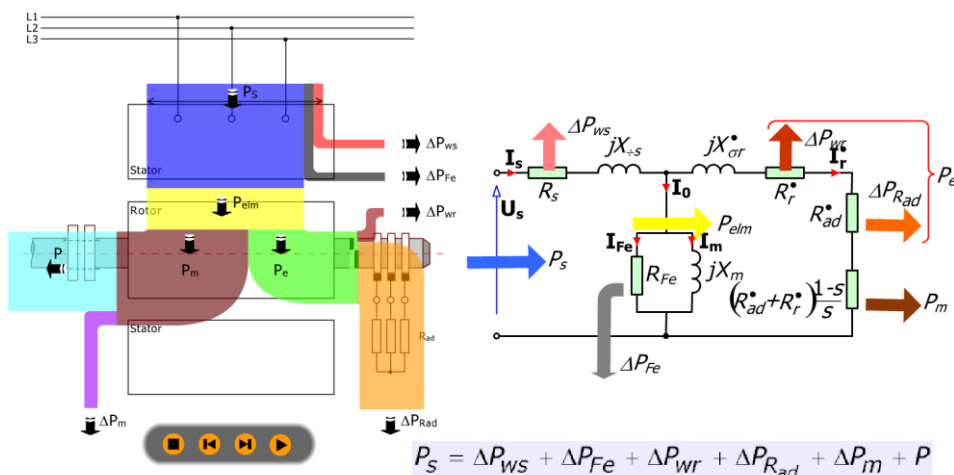
Приликом огледа кратког споја при називној струји, напон се постепено повећава док се не постигне струја нешто већа вредност од називне. Током огледа мере се и бележе, за неколико вредности напона, а у циљу да се постигне вредност струје што ближа називној, следеће величине:

- напон напајања – напон кратког споја, U_1 и струја статора – струја кратког споја, I_k , у све три фазе
- снага кратког споја, P_k

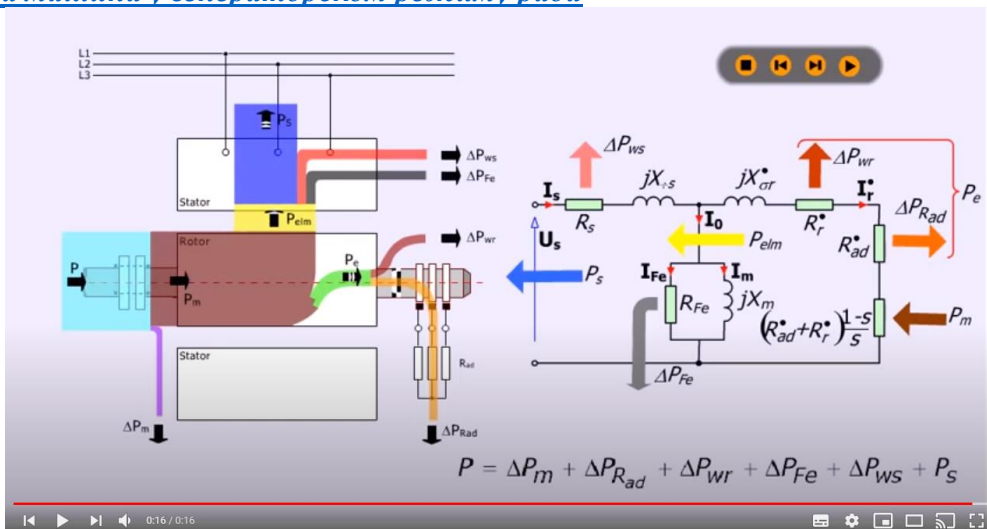
4.2. СИМУЛАЦИОНЕ ВЕЖБЕ

Анализирајући следеће swf фајлове и видео записе може разумети енергетски биланс трофазне асинхроне машине у моторном, генераторском и кочном режиму рада..

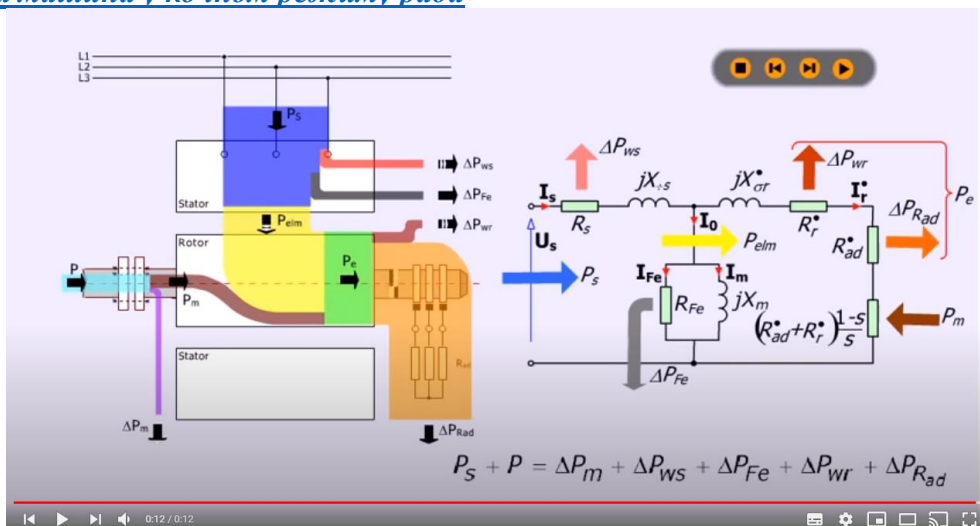
Асинхрона машина у моторном режиму рада



<https://www.youtube.com/watch?v=418ZtmnlpEg&list=PLsXBNMuIU-4tSsJarIIA9QObOrT2wgPua&index=35>

Асинхрона машина у генераторском режиму рада

https://www.youtube.com/watch?v=7_1jMR3370I&list=PLsXBNMuIU-4tSsJarIIA9QObOrT2wgPua&index=37

Асинхрона машина у кочном режиму рада

<https://www.youtube.com/watch?v=obnr5CdC0Yo&list=PLsXBNMuIU-4tSsJarIIA9QObOrT2wgPua&index=36>

4.3. ЛАБОРАТОРИЈСКА ВЕЖБА**Задатак вежбе:**

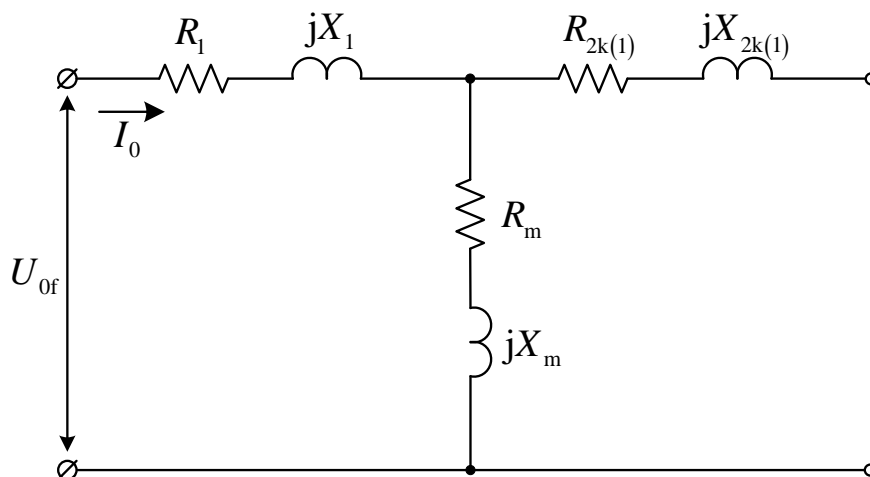
1. На основу података добијених при огледу кратког споја и празног хода одредити елементе еквивалентне шеме претпостављајући да је реактанса расипања статора једнака реактанси расипања ротора сведена на статор.

2. Линеарном екстраполацијом криве $P_1=f(U_1^2)$ при празном ходу асинхроног мотора до ординате одредити механичке губитке асинхроног мотора P_f .

Примењена метода и опис вежбе:

Са асинхроним мотором се изводи оглед празног хода, при чему се машина прикључује на називни напон U_n . У режиму празног хода се сматра да је брзина обртања ротора једнака синхроној брзини обртања ($s=0$). У том случају нема струја нити губитака у колу ротора.

Из огледа празног хода се добијају вредности: напон празног хода $U_0=U_n$, струја празног хода I_0 , и снага празног хода P_0 . Електрична шема и једначине за режим празног хода су следеће:



$$Z_0 = \frac{U_{0f}}{I_0}$$

$$Z_0 = R_0 + jX_0$$

$$R_0 = R_1 + R_m$$

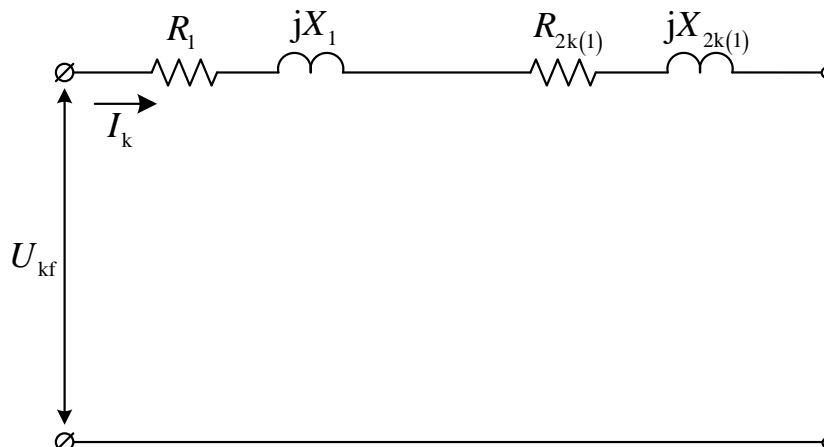
$$X_0 = X_1 + X_m$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$$

Слика 4.4: Електрична шема за режим празног хода

У огледу кратког споја ротор је уочен. Испитивање се врши при називној струји статора I_n .

Из огледа кратког споја се добијају вредности: напон кратког споја U_k , струја кратког споја $I_k=I_n$, и снага кратког споја P_k . Електрична шема и једначине за режим кратког споја су следеће:



$$Z_k = \frac{U_{kf}}{I_k}$$

$$Z_k = R_k + jX_k$$

$$R_k = R_1 + R_{2k(1)}$$

$$X_k = X_1 + X_{2k(1)}$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

Слика 4.5: Електрична шема и једначине за режим кратког споја

Елементи еквивалентне шеме асинхроне машине се одређују следећим редоследом: R_0 се добија директним мерењем електричне отпорности између прикључака статорских намотаја.

$$R_{2k(1)} = R_k - R_1 \Leftrightarrow R_k = \frac{P_k}{3 \cdot I_k^2}$$

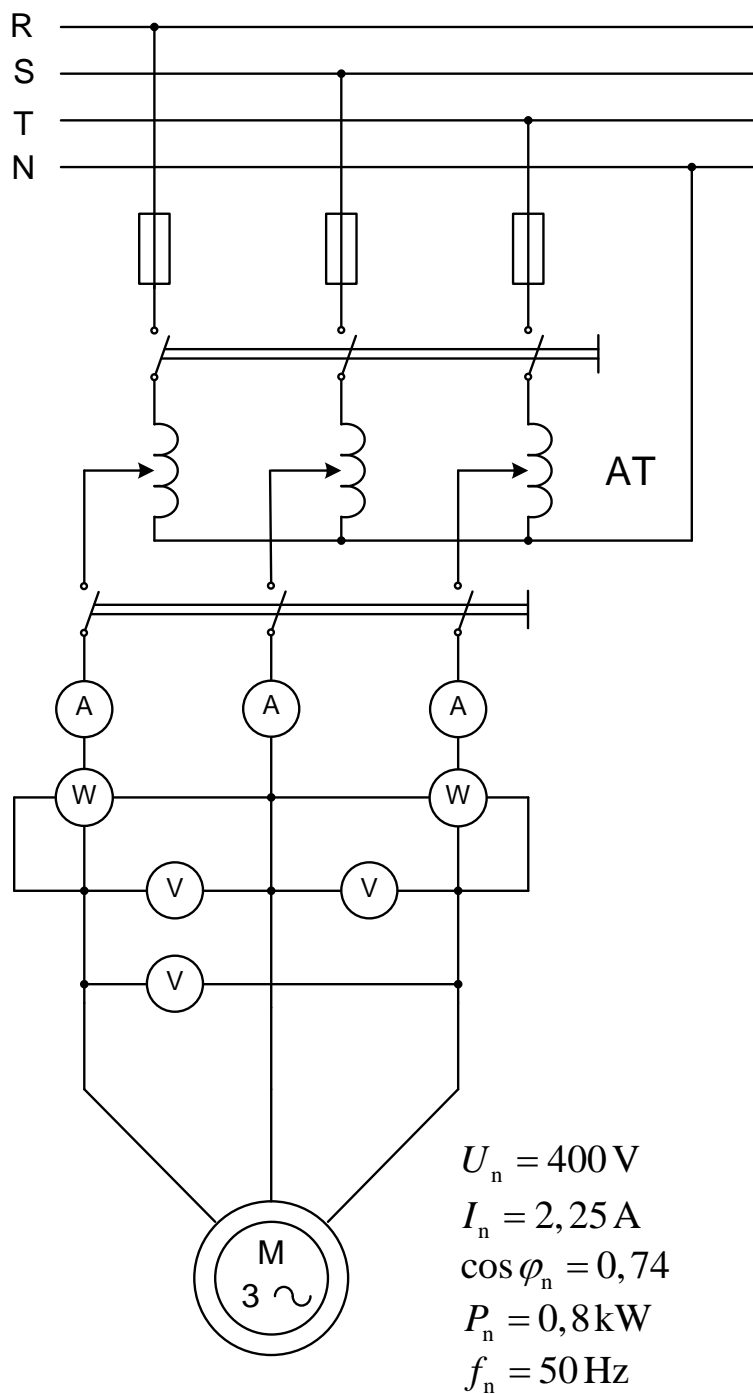
$$R_m = \frac{P_{Fe}}{3 \cdot I_0^2} \Leftrightarrow (P_{Fe} = P_0 - P_{Cu} - P_{fv}, P_{Cu} = 3 \cdot R_1 \cdot I_0^2)$$

где су P_{Cu} , губици у бакру статора, и P_{fv} механички губици асинхроне машине, који се добијају екстраполацијом криве празног хода до ординате.

$$X_1 = X_{2k(1)} = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \Leftrightarrow \left(Z_k = \frac{U_{kf}}{I_k}, R_k = \frac{P_k}{3 \cdot I_k^2} \right)$$

$$X_m = X_0 - X_1 \Leftrightarrow \left(X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, Z_0 = \frac{U_{0f}}{I_0}, R_0 = R_1 + R_m \right)$$

Електрична шема:



Слика 4.6: Електрична шема

Спецификација опреме и прибора за вежбу:

Трофазни аутотрансформатор:
произвођач: ЗИП
врста: аналогни
напонски опсег: 250 V
максимална струја: 4 A



Ватметар 2 ком.:
произвођач: Iskra
врста: аналогни
класа тачности: 0.5
мерни опсег: 2400 W



Волтметар 3 ком.:
произвођач: Iskra
врста: аналогни
класа тачности: 0.5
мерни опсег: 400 V



Амперметар 3 ком.:
произвођач: Iskra
врста: аналогни
класа тачности: 1.5
мерни опсег: 6 A



Асинхрони мотор:
снага
напон
струја
брзина обртања
фреквенција
спрега

**Поступак извођења вежбе:**

1. повезати коло за оглед празног хода према електричној шеми;
2. преконтролисати везе и позвати асистента ради контроле;
3. напон на прикључницама постепено повећавати од нуле док се не постигне називни напон, при чему читавања почети са доњом границом прикључног напона $U = 160 \text{ V}$;
4. измерити струју празног хода I_0 и снагу губитака празног хода P_0 ;
5. после извршених мерења аутотрансформатор вратити у нулти положај;
6. повезати везе за оглед кратког споја према електричној шеми;
7. везе преконтролисати и позвати асистента ради контроле;

8. укочити ротор;
9. постепено повећавати напон при чему треба очитавати напон кратког споја U_k , струју кратког споја I_k и снагу губитака кратког споја P_k ;
10. напон повећавати док струја мотора не достигне називну вредност $I_k = I_n$;
11. после завршеног мерења прибор и апаратуру вратити у првобитно стање.
12. резултате мерења унети у програм [prazan hod i kratak spoj AM.xls](#) који ће их аутоматски обрадити.

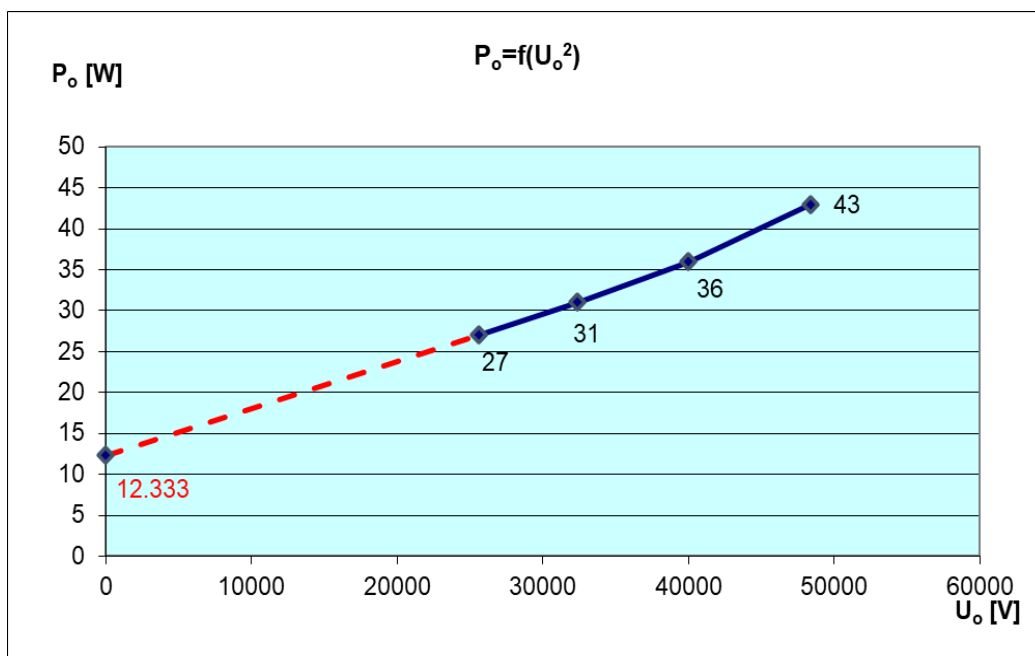
Резултати мерења:

U_0 [V]	I_0 [A]	P_0 [W]
220	0,64	43
U_k [V]	I_k [A]	P_k [W]
93	2	203

Обрада резултата

Овде ће бити приказан поступак израчунавања параметара за једну вредност напона празног хода, док је за остале напоне овај поступак аналоган.

За вредност напона празног хода 160 V, измерене су следеће вредности снаге и струје празног хода $P_0=27$ W, $I_0=0,45$ A. Величине израчунате у огледу кратког споја имају следеће вредности: $I_k = 2$ A; $P_k = 203$ W; $U_k = 93$ V. Губици услед трења и вентилације, добијени екстраполацијом, износе $P_{fv} = 7,5$ W.



Вредност статорске отпорности добијена је директним мерењем и износи $R_1 = 8,78\Omega$.

Мерења су извршена за 5 вредности напона напајања (220, 200, 180 и 160 V) при струји кратког споја од 2 А.

Изведено је више мерења да би се одредили губици P_{fv} .

Отпорности у секундарној грани и грани магнећења добијају на следећи начин:

$$R_k = \frac{P_k}{3I_k^2} = \frac{203}{3 \cdot 2^2} = 16,92\Omega \Rightarrow R_{2k(1)} = R_k - R_1 = 8,14\Omega$$

$$R_m = \frac{P_{Fe}}{3I_0^2}; P_{Fe} = P_0 - P_{Cu} - P_{fv} = P_0 - 3 \cdot R_1 \cdot I_0^2 - P_{fv}$$

$$P_{Fe} = 43 - 3 \cdot 8,78 \cdot 0,64^2 - 12,33 = 19,88 \text{ W}$$

$$R_m = \frac{19,88}{3 \cdot 0,64^2} = 16,18\Omega$$

$$R_0 = R_1 + R_m = 24,96\Omega$$

$$X_1 = X_{2k(1)} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}; Z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3} \cdot I_k} = 26,85\Omega$$

$$X_1 = X_{2k(1)} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{26,85^2 - 16,92^2} = 10,42\Omega$$

$$X_m = X_0 - X_1; Z_0 = \frac{U_0}{\sqrt{3} \cdot I_0} = \frac{220}{\sqrt{3} \cdot 0,64} = 186,47\Omega$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{186,47^2 - 24,96^2} = 186,89\Omega$$

$$X_m = X_0 - X_1 = 186,89 - 10,42 = 176,47\Omega$$

Празан ход	Кратак спој	R_1 [Ω]	R_k [Ω]	$R_{2k(1)}$ [Ω]	R_m [Ω]	R_0 [Ω]	$X_1 = X_{2k(1)}$ [Ω]	X_0 [Ω]	X_m [Ω]
$U_0 = 220 \text{ V}$	$I_k = 2 \text{ A}$	8,78	16,92	8,14	16,18	24,96	10,42	186,89	176,47
$P_0 = 43 \text{ W}$	$U_k = 93 \text{ V}$								
$I_0 = 0,64 \text{ A}$	$P_k = 203 \text{ W}$								

Табела: Параметри еквивалентне шеме израчунати из огледа кратког споја и празног хода