

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
ЛАБОРАТОРИЈА ЗА МИКРОПРОЦЕСОРСКО УПРАВЉАЊЕ ЕЛЕКТРОМОТОРНИМ ПОГОНИМА

**АНАЛИЗА ВАЛОВИТОСТИ МОМЕНТА СИНХРОНОГ МОТОРА СА СТАЛНИМ
МАГНЕТИМА НА РОТОРУ И ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПРОГРАМСКОГ РЕШЕЊА ЗА
ПРЕДИКЦИЈУ И КОМПЕНЗАЦИЈУ**

Ментор

Проф. др Слободан Н. Вукосавић

Кандидат

Игор Стаменковић

Уводна разматрања

1/4

- ❑ више од две трећине произведене електричне енергије потроше електрични мотори
- ❑ у погоне са машинама наизменичне струје намењене водопривреди Енглеска годишње инвестира до 18 милиона стерлинга
- ❑ производња центара за машинску обраду у Немачкој током последње деценије достиже обим од 100 милијарди еура и има просечан годишњи раст од 7%
- ❑ продаја сервопојачавача и електричних мотора у САД на почетку двадесет првог века достиже 4,5 милијарде долара, од чега више од једне петине отпада на синхроне сервомоторе
- ❑ стална потреба за повећањем квалитета производње и увећањем прецизности управљања електричних погона

Уводна разматрања

2/4

карактеристике/ сервомотор	<i>brushless DC</i>	<i>brushless AC</i>	асинхрони мотор	релуктантни мотор
ефикасност мотора	+	+		
робусност на валовитост момента		+*	+	
<i>open loop</i> управљачки алгоритми		+	+	
једноставност <i>closed loop</i> управљачких алгоритама	+			+
минимални број сензора за потребе управљања	+			
проширење опсега брзине		+	+	+
робусност мотора и цена израде			+	+

+* валовитост момента услед несавршености геометрије магнетског и струјног кола мотора је знатно мања, али постоји

Уводна разматрања

3/4

Предност синхроних сервомотора са сталним магнетима на ротору (ПМСМ):

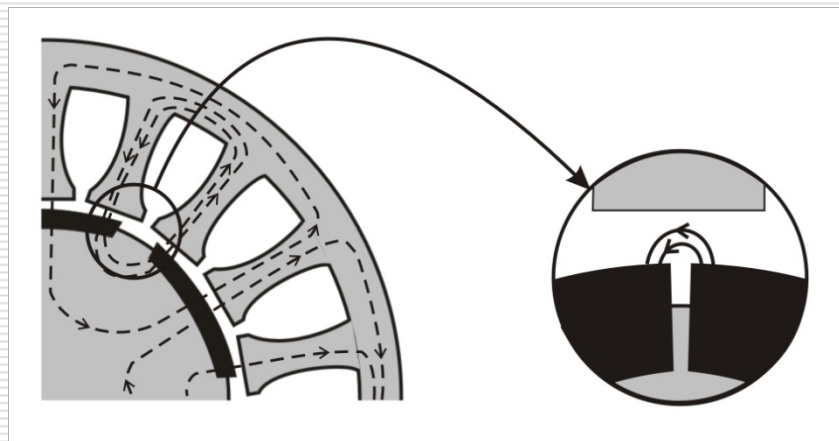
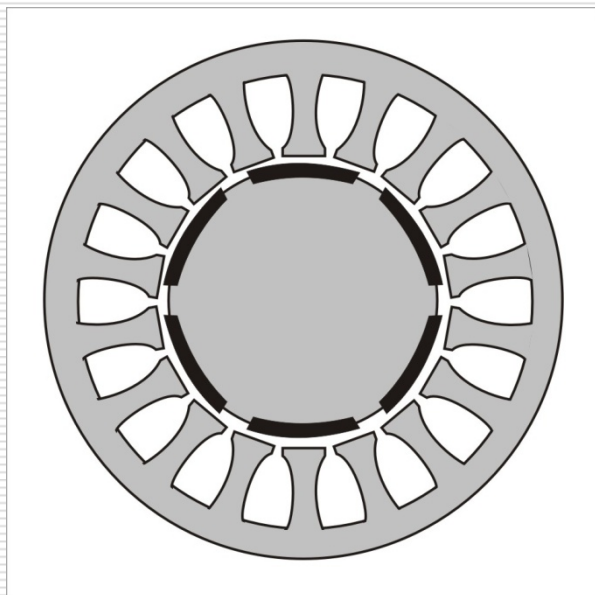
- 😊 већа ефикасност јер нема губитака енергије и загревања у намотајима ротора
- 😊 високе вредности специфичне снаге (односа Nm/kg) и односа моменат-инерција (T_c/J), што омогућава најбржи динамички одзив на задату управљачку команду
- 😞 скупа израда сталних магнета
- 😞 валовитост момента услед несавршености геометрије магнетског и струјног кола мотора

Уводна разматрања

4/4

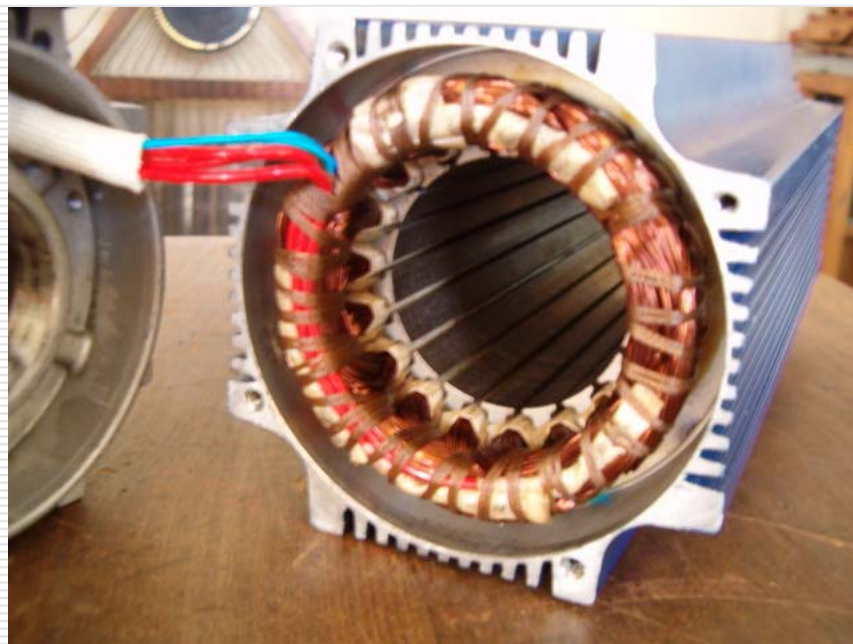
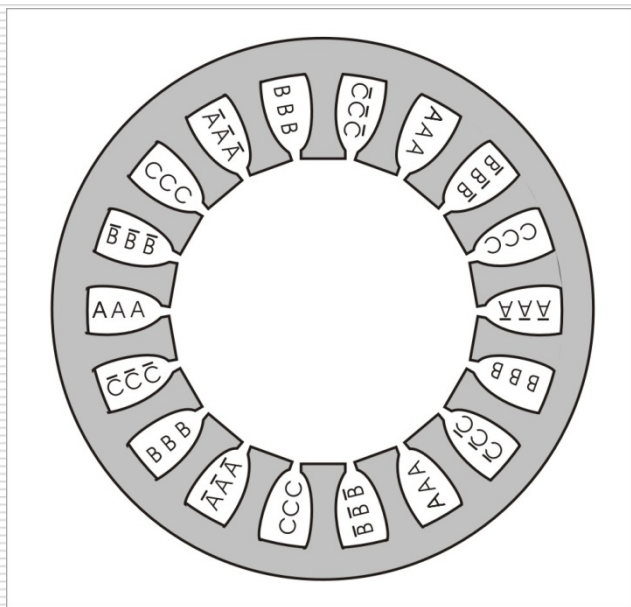
- Валовитост електромагнетског момента представља сложенопериодичну паразитну компоненту суперпонирану на жељени моменат која настаје услед несавршености магнетског и струјног кола мотора
- Предложена решења компензације валовитости момента се генерално могу поделити у две групе:
 - Хардверски
 - Софтверски
- Потреба за моделом валовитости момента која узима у обзир све електричне, магнетске и геометријске карактеристике мотора

Магнетско коло синхронног мотора са сталним магнетима на ротору



АНАЛИЗА ВАЛОВИТОСТИ МОМЕНТА СИНХРОНОГ МОТОРА СА СТАЛНИМ МАГНЕТИМА НА РОТОРУ И ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПРОГРАМСКОГ РЕШЕЊА ЗА ПРЕДИКЦИЈУ И КОМПЕНЗАЦИЈУ

Струјно коло синхронног мотора са сталним магнетима на ротору



Енергетски биланс синхроне машине

1/2

- **Обртни моменат синхроног мотора са сталним магнетом на ротору настаје као резултат интеракције магнетског поља ротора и магнетопобудне силе статора, где се дејство сталних магнета на ротору може представити еквивалентном струјом ротора (i_r); отуда је прираштај електричне енергије:**

$$dW_e = e_s \cdot i_s \cdot dt + e_r \cdot i_r \cdot dt = i_s \cdot d\Phi_s + i_r \cdot d\Phi_r$$

- **практична занемарења:**
 - занемарују су губици и засићење у гвожђу (**линеарно магнетско поље и једнаке међусобне индуктивности намотаја**);
 - претпоставља да је меки феромагнетски материјал идеалан ($\mu_{fe} \rightarrow \infty$) (**енергија поља се углавном налази у ваздушном процепу**)

$$T_e = \frac{dW_p}{d\theta} \Big|_{i=const} = \frac{1}{2} \cdot i_s^2 \cdot \frac{dL_s}{d\theta} + \frac{1}{2} \cdot i_r^2 \cdot \frac{dL_r}{d\theta} + i_s \cdot i_r \cdot \frac{dM}{d\theta}$$

Енергетски биланс синхроне машине

2/2

$$T_{em} = \frac{1}{2} \cdot F_s^2 \cdot \frac{dP}{d\theta} - \frac{1}{2} \cdot \Phi_r^2 \cdot \frac{d\mathcal{R}}{d\theta} - F_s \cdot \Phi_r \cdot \sin \theta$$

- Прва два сабирка другог дела једначине представљају моменат који настаје деловањем само једне струје, и изражава поље које тежи да смањи магнетски отпор магнетског кола.
- Последњи сабирак истог израза указује на тежњу магнетских поља статора и ротора да се поравњају, и извор је обртног момента синхронног мотора.

Узроци валовитости момента синхроне машине 1/3

- 1. Просторни хармоници таласа магнетопобудне силе статора**
настају услед коначног броја статорских жлебова који онемогућују идеалну, простопериодичну расподелу густине статорских проводника по обиму машине.

$$F_s = \frac{3}{2} \cdot F_{\max} \cdot \left[\cos(\theta - wt) + \frac{1}{5} \cdot \cos(5 \cdot \theta + wt) + \frac{1}{7} \cdot \cos(7 \cdot \theta - wt) + \frac{1}{11} \cdot \cos(11 \cdot \theta + wt) + \dots \right]$$

Узроци валовитости момента синхроне машине 2/3

2. Просторни хармоници магнетског поља ротора

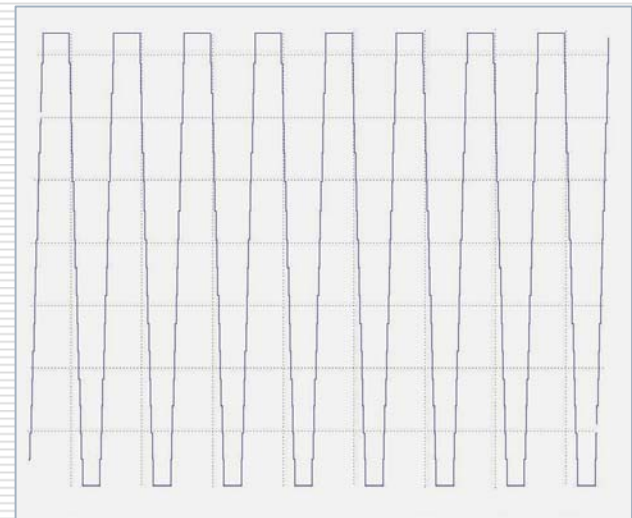
потичу од наизменично постављених сталних магнета са међусобно супротним усмерењима магнетског поља која дају правоугаону просторну расподелу.

$$\Phi_r = \Phi_{\max h} \cdot \sum_{i=1}^{2k+1} \frac{1}{i} \cdot \cos(i \cdot \theta + i \cdot \omega t) = \Phi_{\max h} \cdot \left[\cos(\theta + \omega t) + \frac{1}{3} \cdot \cos(3\theta + 3\omega t) + \frac{1}{5} \cdot \cos(5\theta + 5\omega t) + \dots \right]$$

Узроци валовитости момента синхроне машине 3/3

- 3. Просторна расподела релуктансе ваздушног процепа**
настају услед анизотропије проузроковане ожљебљењем статора и специфичним обликом магнетског кола ротора.

*Таласни облик просторне расподеле
релуктансе ваздушног процепа*



$$\mathcal{R} \approx \mathcal{R}_0 + \mathcal{R}_{\max} \cdot \cos(Q \cdot \theta); \quad Q - \text{број статорских жлебова}$$

Компоненте момента синхроне машине

1/3

1. Електромагнетска валовитост (*ripple torque*) као интеракција просторних хармоника магнетопобудне силе статора и магнетског поља ротора

$$T_{e1} = \frac{dW_{m1}}{d\theta} = C_1 \cdot \sin(\theta + \theta_m) + C_5 \cdot \sin(10 \cdot \theta + \theta_{m5} + 6 \cdot \omega t) + C_7 \cdot \sin(14 \cdot \theta + \theta_{m7} + 6 \cdot \omega t) + \\ + C_{11} \cdot \sin(22 \cdot \theta + \theta_{m11} + 12 \cdot \omega t) + C_{13} \cdot \sin(26 \cdot \theta + \theta_{m13} + 12 \cdot \omega t) + \dots$$

θ – угао између магнетопобудне силе статора или магнетског поља ротора;

θ_m – корак од почетне позиције до произвољне просторне позиције;

- први сабирак, који је различит од нуле и константан у времену, представља користан моменат
- остали сабирци представљају пулсацију момента нулте средње вредности, а доминанти временски хармоници су шести, дванаести...

Компоненте момента синхроне машине

2/3

- 2. Магнетска валовитост (*cogging, detent torque*) као интеракција просторних хармоника магнетског поља ротора и релуктансе ваздушног процепа**

$$T_{e2} = \frac{dW_{m2}}{d\theta} = \frac{d}{d\theta} \left\{ -\Phi_{\max r}^2 \cdot \frac{1}{2Q} \cdot \mathfrak{R}_{const} \cdot \frac{1}{2} \cdot [\sin(Q \cdot \omega t) + \sin(2Q \cdot \theta + Q \cdot \omega t)] \right\} = \\ = C_Q \cdot \cos(2Q \cdot \theta + Q \cdot \omega t)$$

- наизменична компонента момента има нулту средњу вредност и учестаност која одговара броју зубаца статора

Компоненте момента синхроне машине

3/3

3. Интеракција просторних хармоника магнетопобудне силе статора и релуктансе ваздушног процепа

$$T_{e3} = \frac{dW_{m3}}{d\theta} = \frac{d}{d\theta} \left\{ - \left(\frac{3}{2} \cdot F_{\max} \right)^2 \cdot \frac{1}{2Q} \cdot P_{const} \cdot \frac{1}{2} \cdot [\sin(\pm 2wt) + \sin(2Q \cdot \theta \pm 2wt)] \right\} =$$
$$= C_Q \cdot \cos(2Q \cdot \theta \pm 2wt)$$

- наизменична компонента момента има средњу вредност једнаку нули и учестаност која одговара двострукој вредности угаоне брзине, осим у случају када је број зубаца статора једанак 6, 18, 30, 42 итд (будући да је двострука вредност просторних хармоника магнетопобудне силе статора једанак 2, 10, 14, 22 итд.).

Концепт програмског решења

- Резултат анализе валовитости момента је **универзални упрошћени модел синхроног сервомотора** који узима у обзир електромагнетску и магнетску валовитост момента. Уобичајене претпоставке:
 - занемарен ефекат крајева
 - занемарено засићење и губици у гвожђу
 - **Улазни параметри** модела синхроног сервомотора су **основни геометријски, магнетски и електрични параметри** мотора. На основу њих модел израчунава електромоторну силу, струју, магнетску индукцију и моменат у функцији времена и угаоног положаја
 - Резултати фреквентне анализе таласних облика ових величина омогућавају једноставно пројектовање активних и пасивних филтера за компензацију валовитости момента
 - Уобичајене претпоставке проверавају се симулацијом **методом коначних елемената**. Величине које се упоређују између две симулације представљају вредност магнетске индукције у ваздушном процепу машине, јачина струје у проводницима статора и вредност момента у функцији положаја ротора у односу на статор
 - Резултати симулације се упоређују са **експерименталним мерењима** која су остварена на сетапу који се састоји из **DBS сервопогона и FASK синхроног сервомотора** са сталним магнетима на ротору, произвођача Vickers, Италија
-

Називни подаци модела синхроног мотора са сталним магнетима на ротору

U_n [V]	n_n [ob/min]	број пари полова	I_n [A]	T_n [Nm]
180	3000	3	9,1	7,3

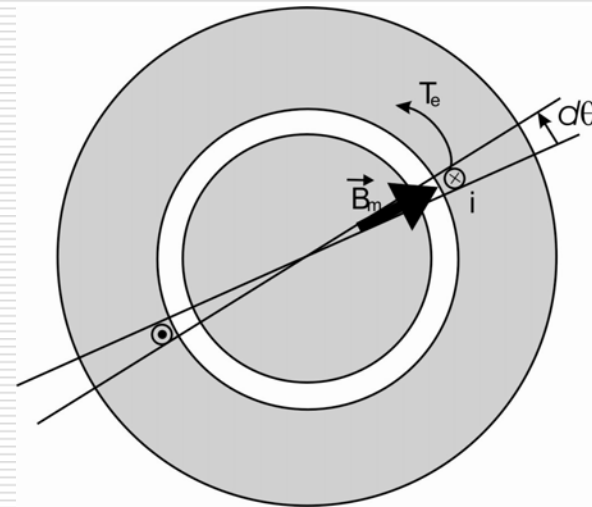
- број жлебова на статору $Q = 18$
- број пари полова $p = 3$
- полупречник ротора [mm] $R = 25.2$
- дужина ваздушног процепа жлеба [mm] $l_{01} = 14.975$
- дужина ваздушног процепа зупца [mm] $l_{02} = 1$
- дебљина сталног магнета [mm] $l_m = 2.5$
- аксијална дужина осовине мотора [mm] $L = 30$
- ширина магнетског пола [степен] $D = 205/4$
- ширина жлеба [степен] $d_1 = 4$
- ширина зупца [степен] $d_2 = 16$
- ширина статора по жлебу са проводницима [степен] $d_{z1} = 73/4$
- ширина статора по жлебу са меким феромагнетом [степен] $d_{z2} = 7/4$
- број проводника по фази по жлебу $N_f = 13$

Модел електромагнетске валовитости

1/2

- Упрошћена двополна електрична машина, дијаметрално постављен проводник на статору ствара степенасту магнетопобудну силу статора, док магнетско поље потиче од сталних магнета који се налазе на површини ротора

- Еквивалентна дужина ваздушног процепа узима у обзир повећање линија флукса у процепу услед постојања жлебова



- Укупан електромагнетски моменат који потиче од сталног магнета на површини ротора и струје која протиче кроз проводник статора:
- $$T_e = i_s \cdot i_r \cdot \frac{\partial M}{\partial \theta} = i_s \cdot \frac{\partial \lambda_r}{\partial \theta}$$

Модел електромагнетске валовитости

2/2

- Ако се у обзир узму сви проводници једне фазе статорског намотаја једног жлеба реалне машине

$$T_e = N \cdot i_s \cdot \frac{\partial \left(\frac{\lambda_r}{N} \right)}{\partial \theta} = F_s \cdot \frac{\partial \varphi_r}{\partial \theta}$$

- Прираштај магнетског флукса при угаоном померају ротора за $d\theta$ одговара

$$\frac{\partial \varphi_r}{\partial \theta} = B_0 \cdot l_0' \cdot r$$

- Електромоторна сила фазе А

$$e = B_0 \cdot l \cdot r \cdot N \cdot v \quad e_{fazaA} = \sum_{i=1}^Q e_{fazaAi}$$

- Укупни моменат T_e представља збир електромагнетског момента и електромагнетске валовитости

$$T_{eA} = \frac{1}{2} \cdot i_{sA} \cdot \frac{e_{fazaA}}{\omega_0} \quad T_e = T_{eA} + T_{eB} + T_{eC}$$

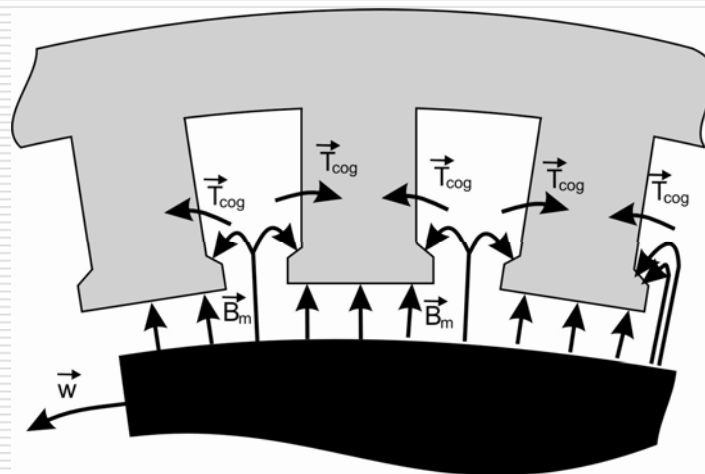
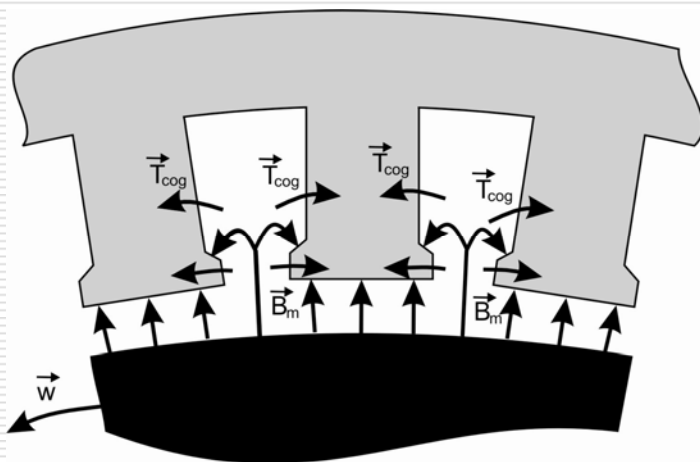
Модел магнетске валовитости

1/2

- **Магнетска валовитост** као промена флукса који је последица помераја вратила мотора за угаони померај $d\theta$ који тежи да смањи магнетски отпор

$$T_{cogg} = \frac{1}{2} \cdot i_r^2 \cdot \frac{\partial L_r}{\partial \theta} = -\frac{1}{2} \cdot \Phi_0^2 \cdot \frac{\partial \mathcal{R}}{\partial \theta}$$

- Положаји сталног магнета на ротору у односу на анизотропију статора који су одређени минималном магнетском енергијом система и непосредно после стабилног положаја

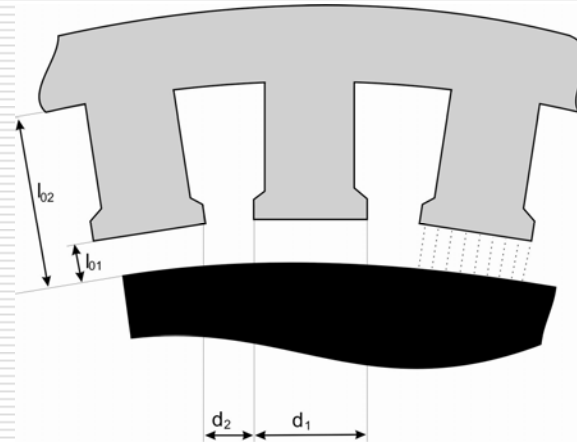


Модел магнетске валовитости

2/2

- Промена магнетске енергије може се посматрати преко промене магнетске проводности или пермеансе.

$$P_{\Sigma} = \mu_0 \cdot \left(s_1 \cdot L \cdot \frac{d_1}{l_{01}} + s_2 \cdot L \cdot \frac{d_2}{l_{02}} \right)$$



- Еквивалентна релуктанса магнетског пола једнака је реципрочној вредности еквивалентне пермеансе.

$$\mathfrak{R}_{\Sigma} = \frac{1}{P_{\Sigma}}$$

- Магнетски флуks у ваздушном процепу приказан једначином

$$\Phi_0 = B_0 \cdot L \cdot D$$

Утицај реакције индукта и засићености феромагнетског материјала

- Реакција индукта – магнетско поље које стварају струје статора, доводи до повећања јачине поља ваздушног процепа непосредно у околини предњег краја сталног магнета, док се јачина поља процепа смањује непосредно у околини задњег краја сталног магнета.
 - Неравномерна расподела магнетског поља процепа ствара неједнаку расподелу густине магнетског флукса у зубцима статора стварају могућност засићења меког феромагнетског материјала и појаву нелинеарности магнетског кола.
-

Основе методе коначних елемената

- Метод коначних елемената (*Finite Element Method* – FEM, или *Finite Element Analysis* – FEA) се заснива на решавању Максвелових једначина на површини или запремини која је сачињена од великог броја троуглова или тетраедрова

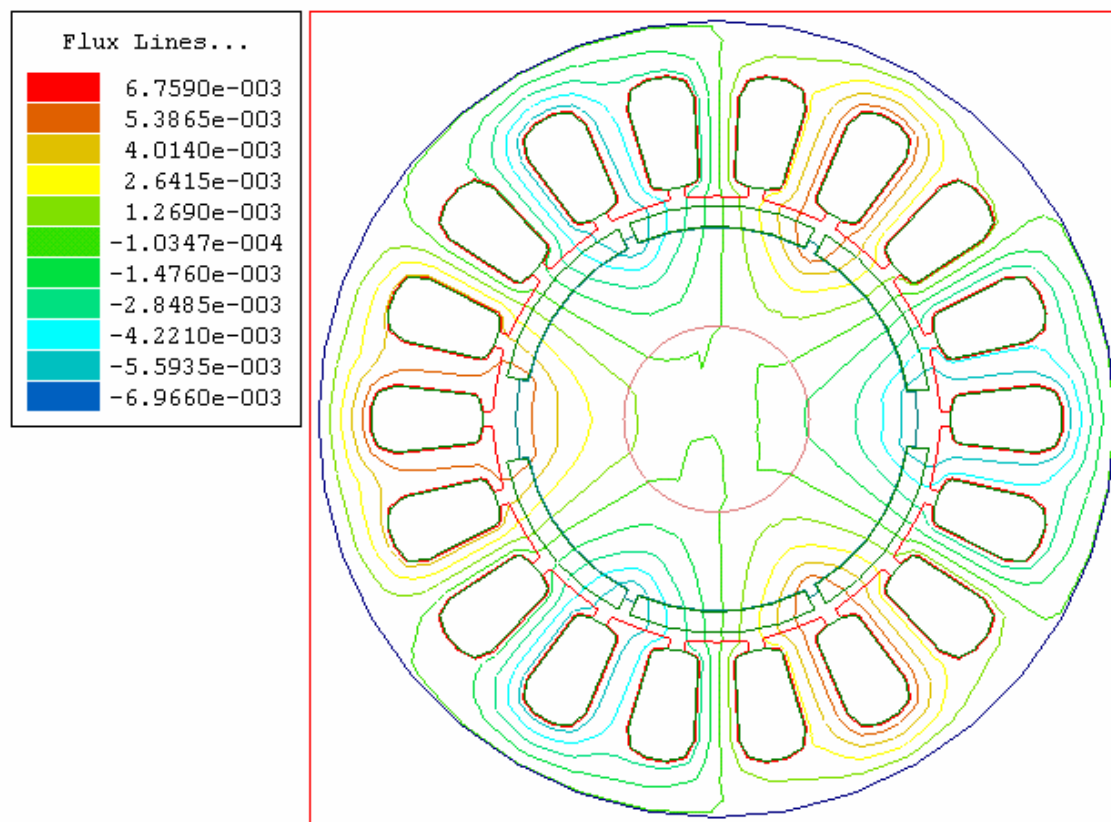
 - На овај начин, вредности електричног или магнетског поља се, у зависности од једначина које се користе, прецизно рачунају у тачкама које представљају темена троуглова

 - Интензитет поља у било којој тачки од интереса се рачуна интерполацијом вредности поља суседних темена

 - Дводимензиони модели се користе у случају структура чије је поље униформно дуж једне осе, тако да се модел приказује попречним пресеком у одговарајућем координатном систему
-

Резултати симулације методом коначних елемената

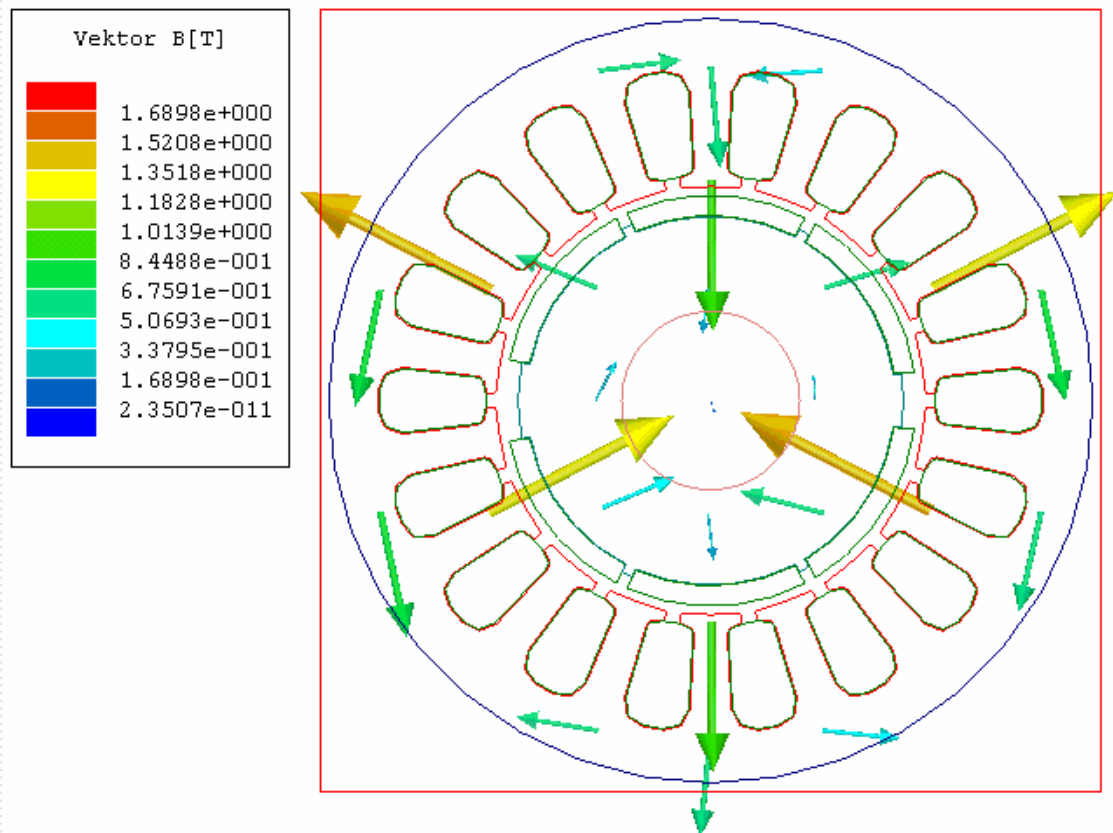
1/4



*Расподела линија
магнетског флуksа на
попречном пресеку
ПМСМ-а*

Резултати симулације методом коначних елемената

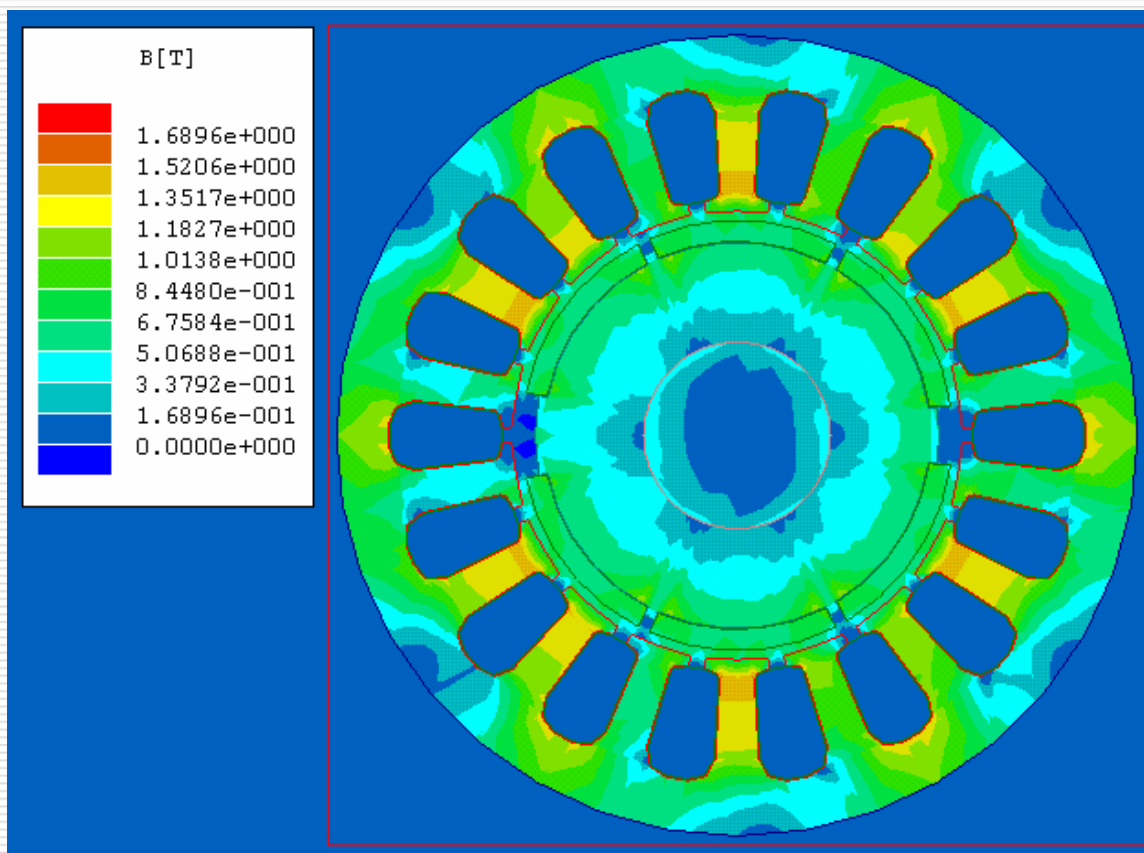
2/4



*Расподела вектора
магнетеске индукције на
попречном пресеку
ПМСМ-а*

Резултати симулације методом коначних елемената

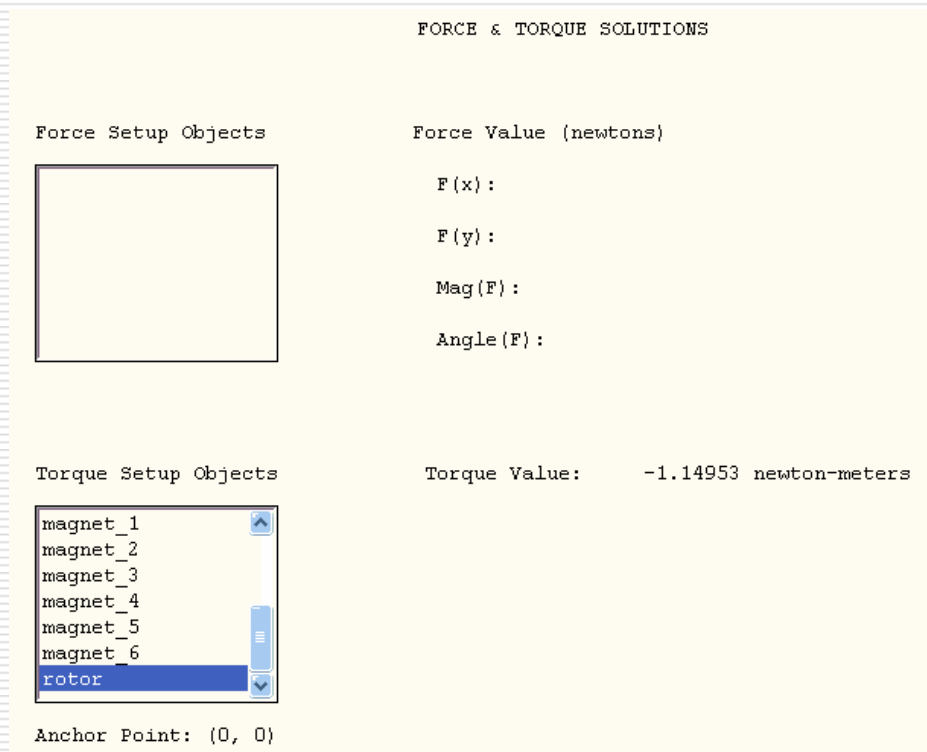
3/4



*Расподела интензитета
магнетске индукције на
попречном пресеку
ПМСМ-а*

Резултати симулације методом коначних елемената

4/4



Резултантна вредност магнетске индукције износи 0.865Т, док вредност електромагнетског момента износи -1.15Nm.

Резултати програмског решења

1/17

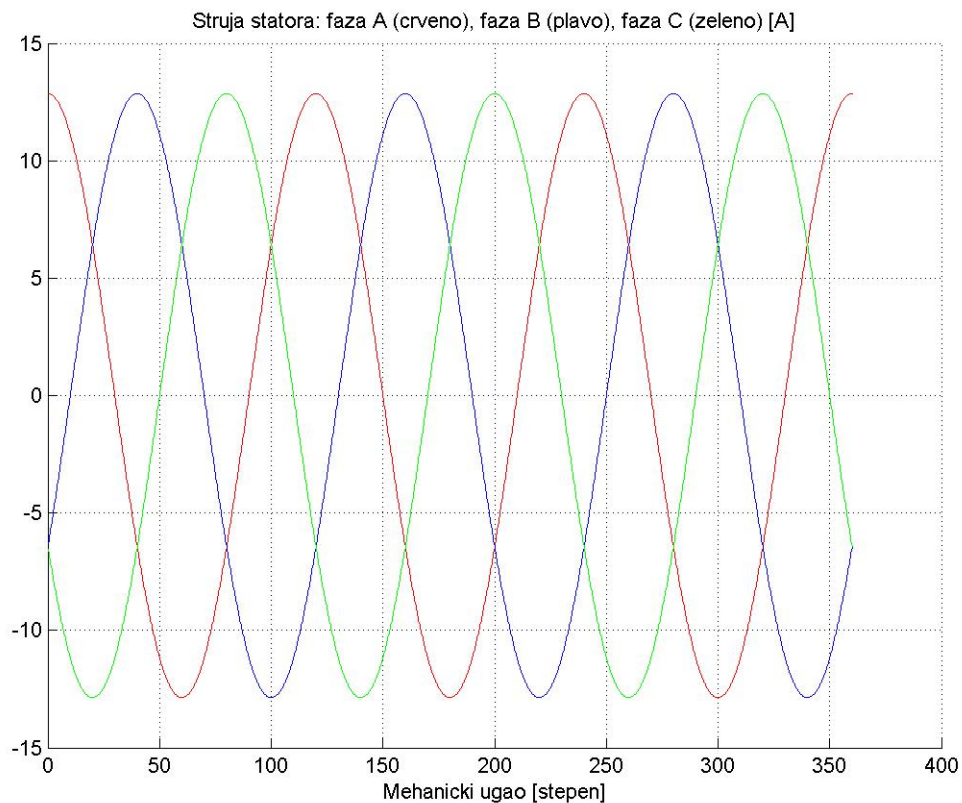
- **Случај 1:** различито растојање између сталних магнета на ротору, осовина мотора реализована од прстенова који су међусобно померени за 5°



- **Случај 2:** различито растојање између сталних магнета на ротору, осовина мотора реализована је равномерно
- **Случај 3:** једнака растојања између сталних магнета на ротору, осовина мотора реализована равномерно

Резултати програмског решења – Случај 1

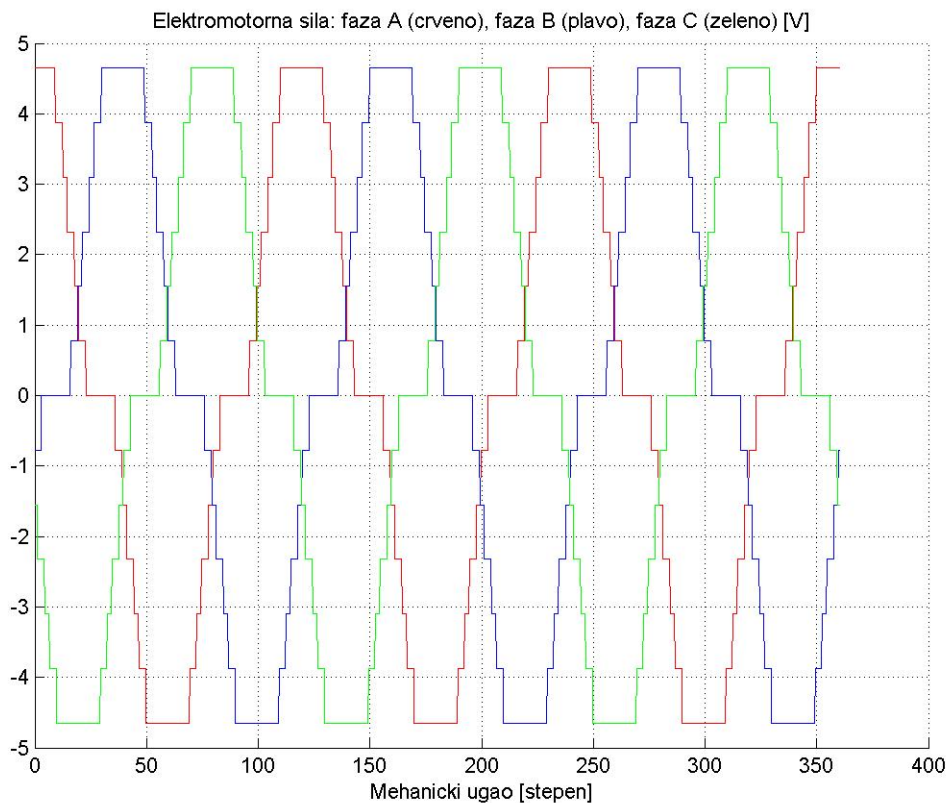
2/17



*Таласни облици струје
статора чија је
амплитуда $I_m = 12.87A$*

Резултати програмског решења – Случај 1

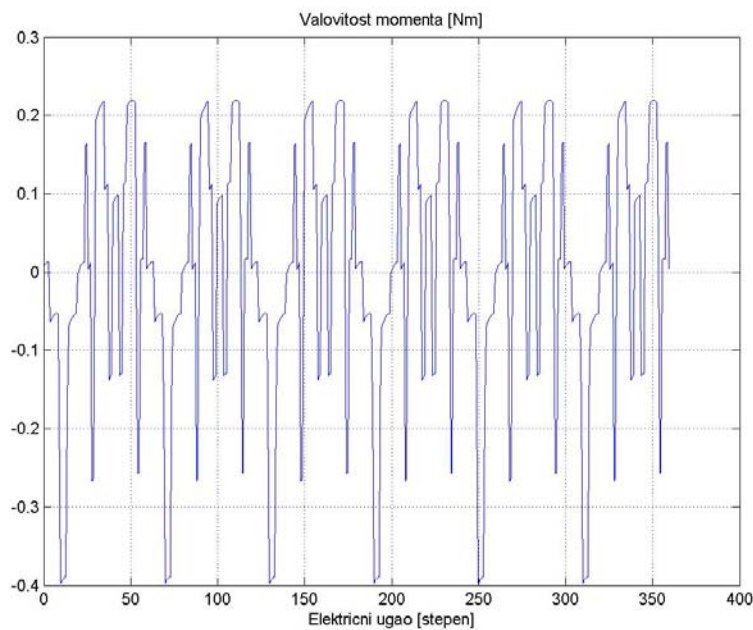
3/17



*Таласни облици
електромоторне силе
при брзини обртања
ротора $n=300$ об/мин*

Резултати програмског решења – Случај 1

4/17

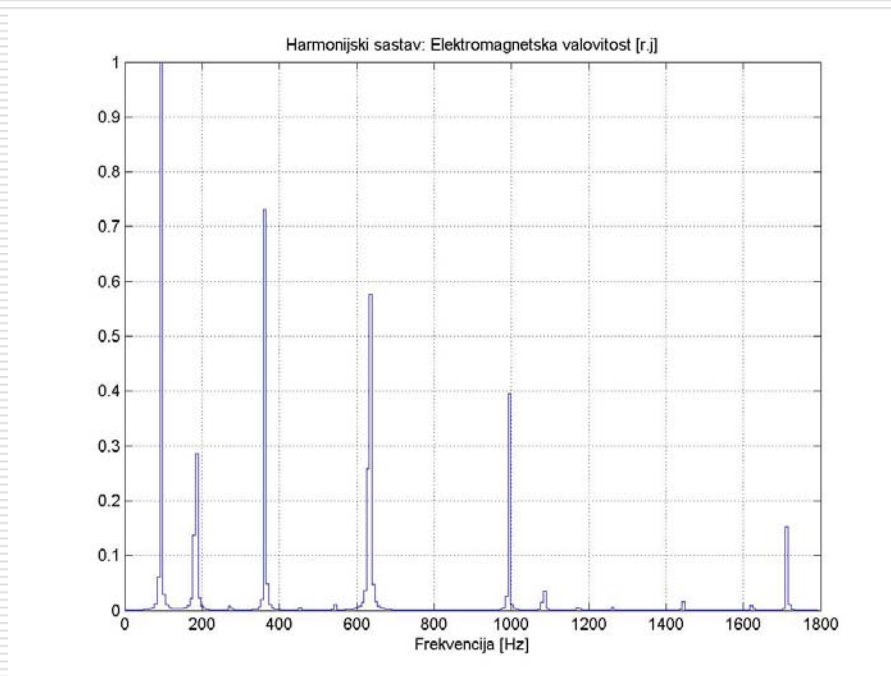


*Таласни облици
електромагнетске
валовитости [Nm] при
брзини обртања ротора
 $n=300$ об/мин и струји
статора амплитуде 12.87А
у функцији електричног угла*

На основу слике може се закључити да електромагнетска валавитост при брзини обртања ротора 300 об/мин и струји статора 12.87А достиже врхове од 0.4 Nm, што представља 4.5% вредности момента.

Резултати програмског решења – Случај 1

5/17

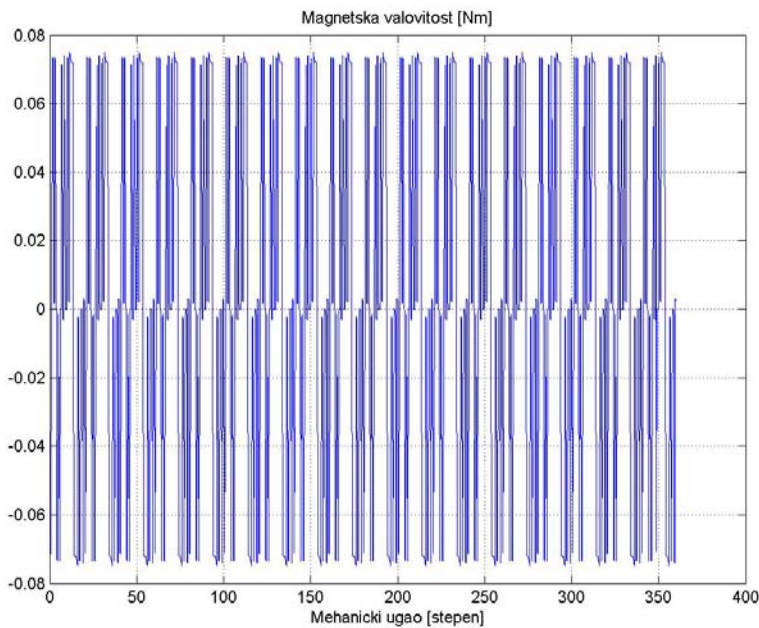


*Хармонијски спектар
Електромагнетске
валовитости при брзини
обртања ротора
 $n=300$ об/мин и струји
статора амплитуде 12.87А*

Хармонијски спектар на слици показује да најзначајније хармонијске компоненте имају учестаност 6, 12, 18 итд. пута већу од електричне брзине обртања ротора. Ипак, појавиле су се и друге хармонијске компоненте са мањом амплитудом услед реализације ротора која доводи до промене фаза хармоника.

Резултати програмског решења – Случај 1

6/17

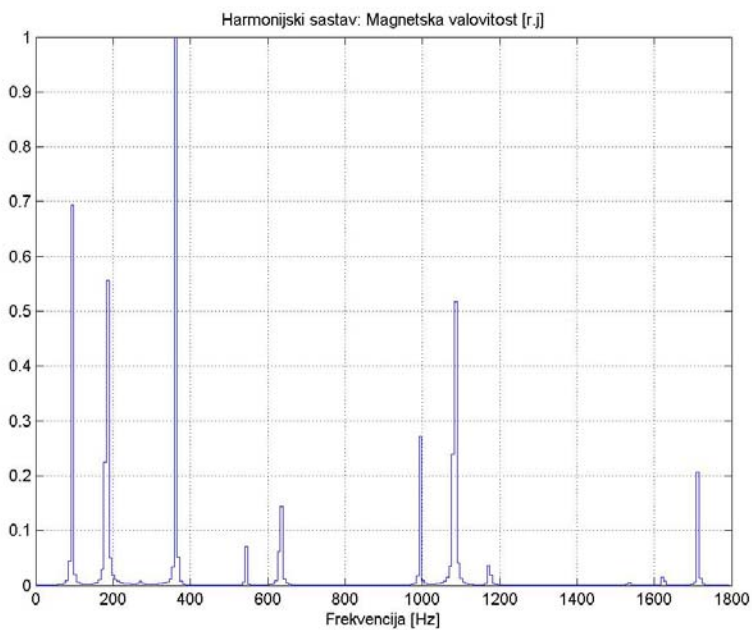


Таласни облици магнетске валовитости [Nm] при брзини обртања ротора $n=300$ об/мин и струји статора амплитуде 12.87А

На основу слике може се закључити да за овакву реализацију ротора амплитуда магнетске валовитости износи 0.07Nm, односно свега 1% називне вредности момента. Такође се може уочити да је број периода једнак броју жлебова.

Резултати програмског решења – Случај 1

7/17

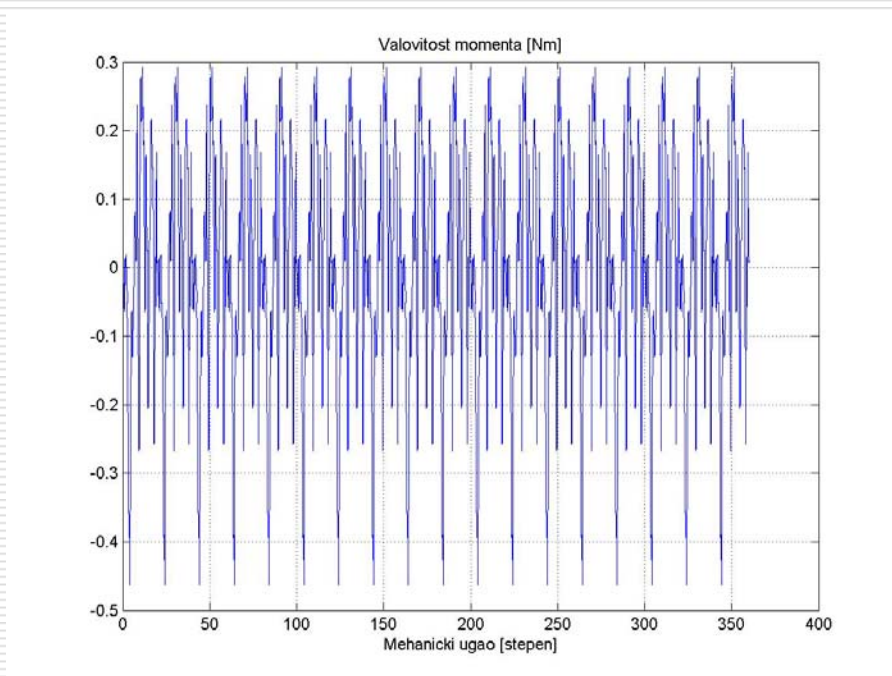


Хармонијски спектар магнетске валовитости при брзини обртања ротора $n=300$ об/мин и струји статора амплитуде 12.87А

Потврда раније изнете констатације да оваква реализација ротора смањује амплитуду магнетске валовитости на рачун промењене фазе приказана је на слици. Наиме, најзначајније хармонијске компоненте нису само целобројни умношци броја жлебова

Резултати програмског решења – Случај 1

8/17

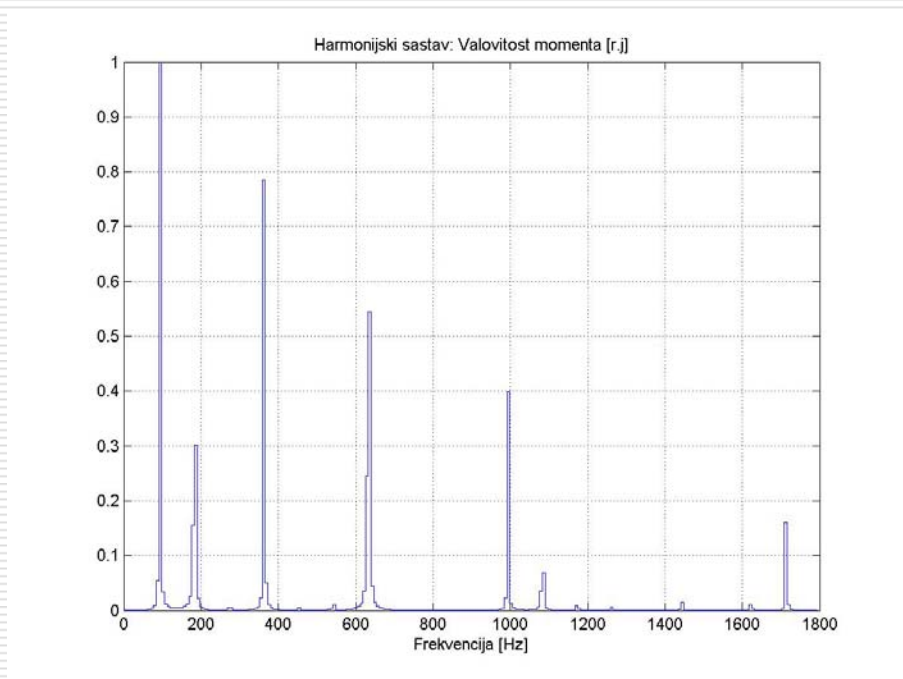


*Таласни облик валовитости
момента [Nm] при брзини
обртања ротора
 $n=300$ об/мин и струји
статора амплитуде 12.87А*

Укупна валовитост момента једнака је збиру магнетске и електромагнетске валовитости. На основу слике може се закључити да за овакву реализацију ротора укупна валовитост момента износи 0.4Nm, односно око 5% вредности момента.

Резултати програмског решења – Случај 1

9/17

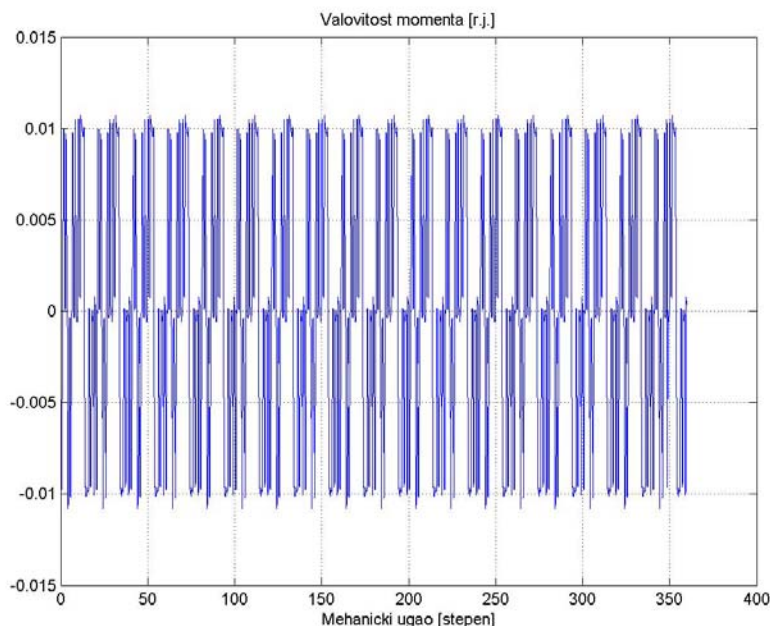


*Хармонијски спектар
валовитости момента при
брзини обртања ротора
 $n=300$ об/мин и струји
статора амплитуде 12.87А*

На слици су приказане најзначајније хармонијске компоненте у функцији фреквенције.

Резултати програмског решења – Случај 1

10/17

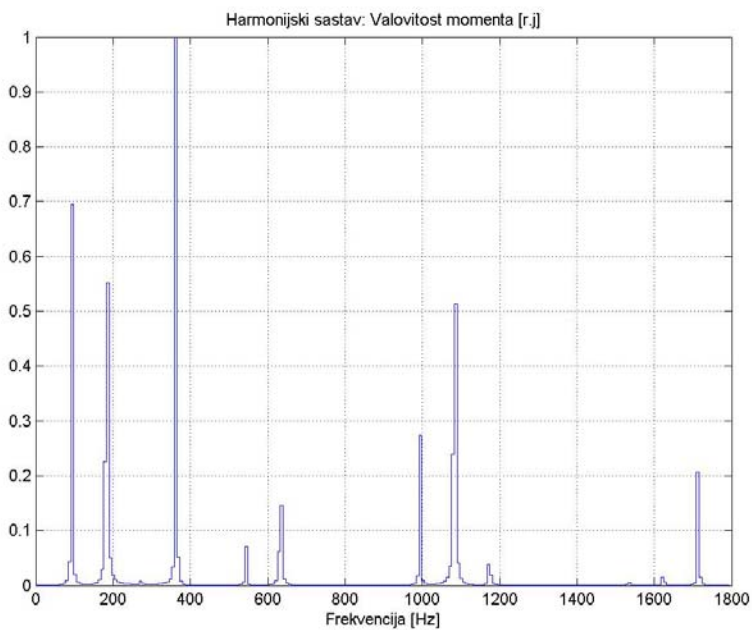


Таласни облик валовитости момента [p.j] при брзини обртања ротора $n=300$ об/мин и струји статора амплитуде 0.2A

Примећује се да електромагнетска валовитост директно зависи од јачине струје и да је стога веома мала при раду мотора у режимима блиским празном ходу. Будући да не зависи од струје, магнетска валовитост не мења нити таласни облик нити амплитуду за различите режиме оптерећивања. **У режимима рада мотора који су блиски празном ходу магнетска валовитост доминантна, за разлику од случајева пуног оптерећења мотора када је доминантна електромагнетска.**

Резултати програмског решења – Случај 1

11/17

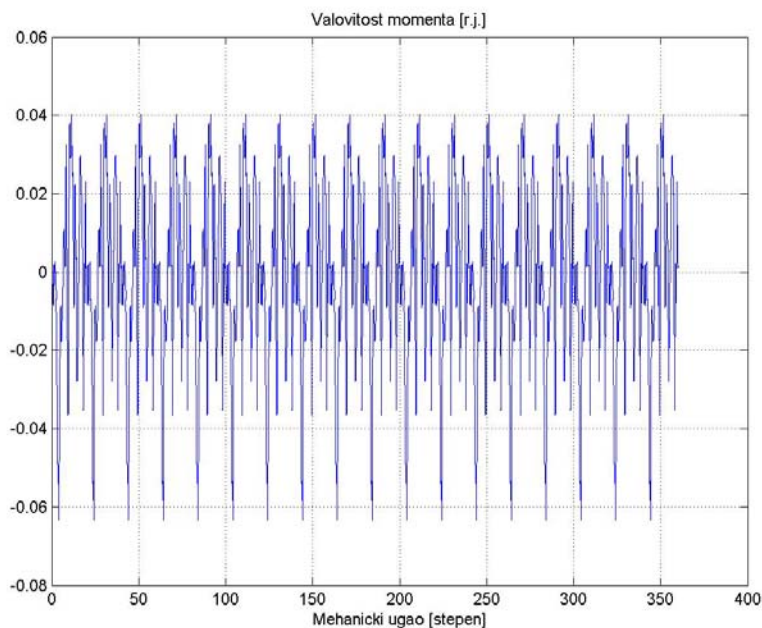


Хармонијски спектар валовитости момента при брзини обртања ротора $n=300$ об/мин и струји статора амплитуде $0.2A$

Током различитих режима оптерећивања мотора при истој брзини обртања ротора, хармонијски спектар валовитости укупног момента остаје квалитативно исти, са том разликом што се мењају само амплитуде доминантних хармоника.

Резултати програмског решења – Случај 1

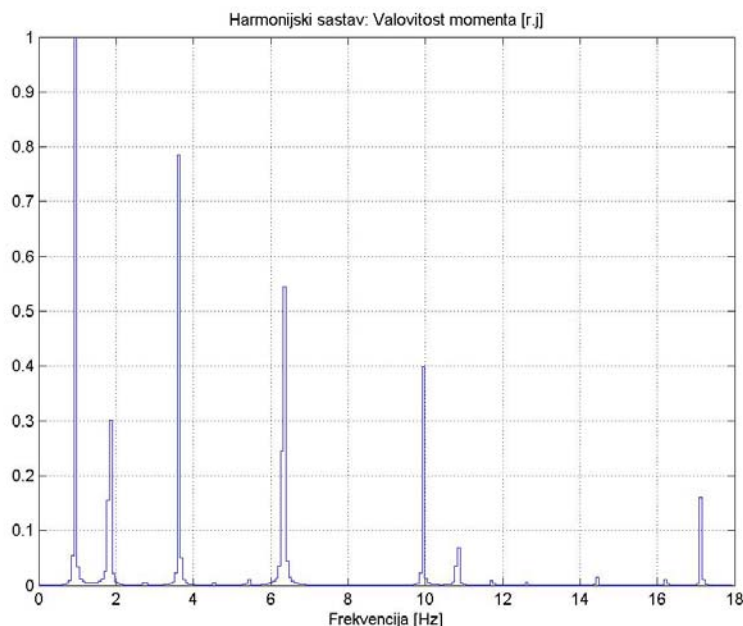
12/17



*Таласни облик валовитости
момента [р.ј] при брзини
обртања ротора $n=3$ об/мин
и струји статора
амплитуде 12.87А*

Резултати програмског решења – Случај 1

13/17

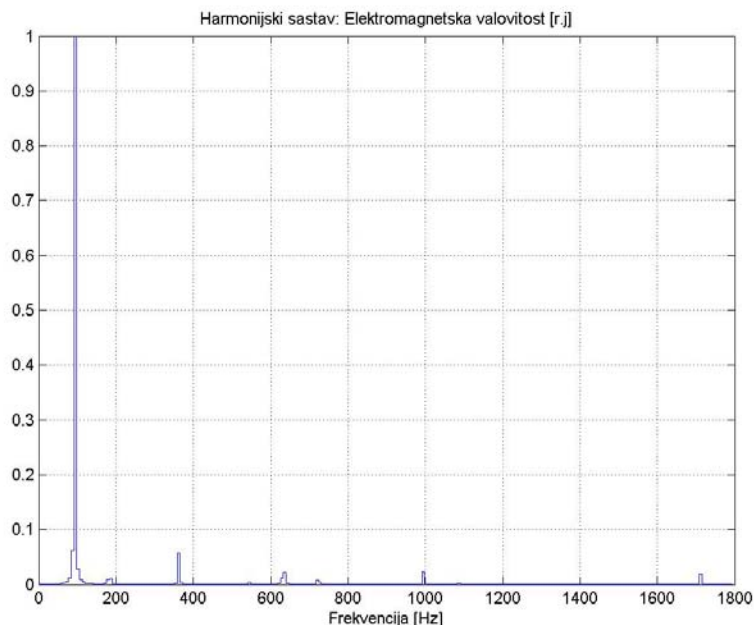


*Хармонијски спектар
валовитости момента при
брзини обртања ротора
 $n=3$ об/мин и струји
статора амплитуде 12.87А*

На основу резултата може се закључити да промена брзине не мења ни таласни облик ни амплитуду било које компоненте валовитости момента, али помера фазу. За мале брзине обртања ротора најзначајније хармонијске компоненте валовитости момента улазе у опсег деловања регулатора.

Резултати програмског решења – Случај 2

14/17

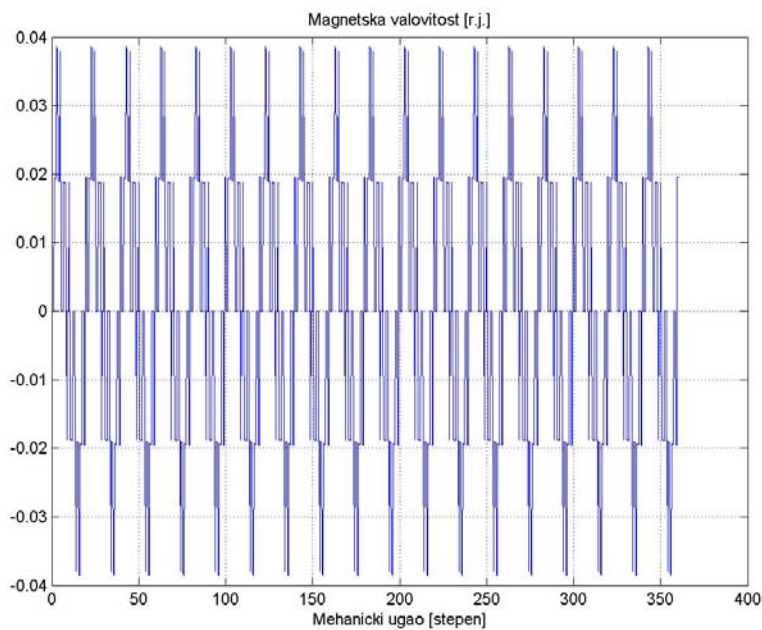


*Хармонијски спектар
електромагнетске
валовитости при брзини
обртања ротора
 $n=300$ об/мин и струји
статора амплитуде 12.87А*

Упоређујући резултате лако се закључује да **другачија геометрија ротора доводи до већих амплитуда и другачијег таласног облика електромагнетске валовитости**. У другом случају доминантне хармонијске компоненте у потпуности одговарају теоријским – њихова учестаност је 6, 12, 18 итд. пута већа од електричне брзине обртања ротора.

Резултати програмског решења – Случај 2

15/17

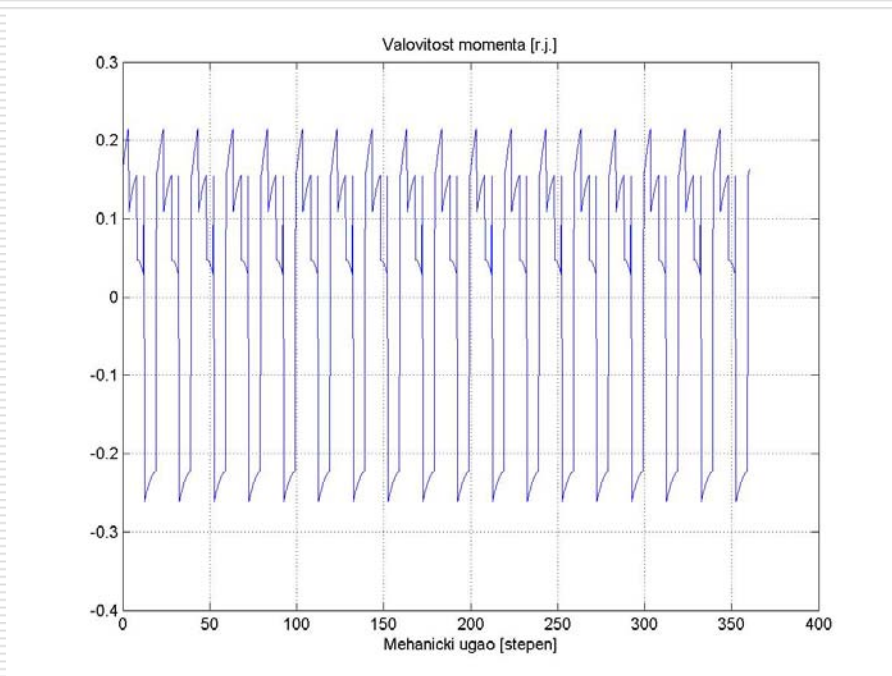


Таласни облик магнетске валовитости [р.ј] при брзини обртања ротора $n=300$ об/мин и струји статора амплитуде 12.87А

У случају један долази до потирања елементарних магнетских момената што знатно смањује резултантни магнетски моменат. Потврда за то је приказана на слици, где се види да је амплитуда магнетске валовитости чак четири пута већа, и сада износи 4% називног обртног момента мотора, док хармонијски спектар магнетске валовитости одговара теоријском.

Резултати програмског решења – Случај 3

16/17

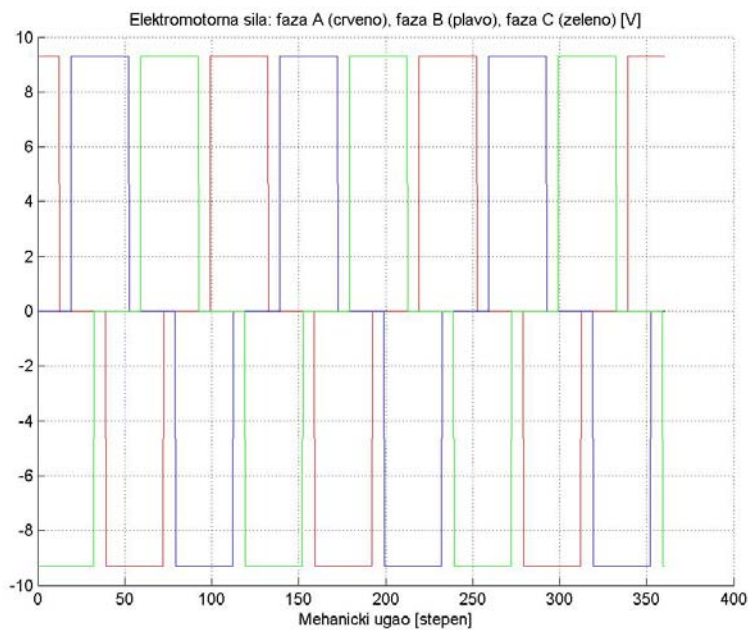


*Таласни облик валовитости
момента [r.j.] при брзини
обртања ротора
 $n=300$ об/мин и струји
статора амплитуде 12.87А*

Упоређујући таласне облике и амплитуде обе компоненте валовитости може се уочити да су оне знатно промењене: амплитуда електромагнетске валовитости износи 20%, а магнетске 12% од називне вредности обртног момента мотора. Амплитуда укупне валовитости достиже и до 25% називног момента.

Резултати програмског решења – Случај 3

17/17



*Таласни облик
електромоторне силе при
брзини обртања ротора
 $n=300$ об/мин*

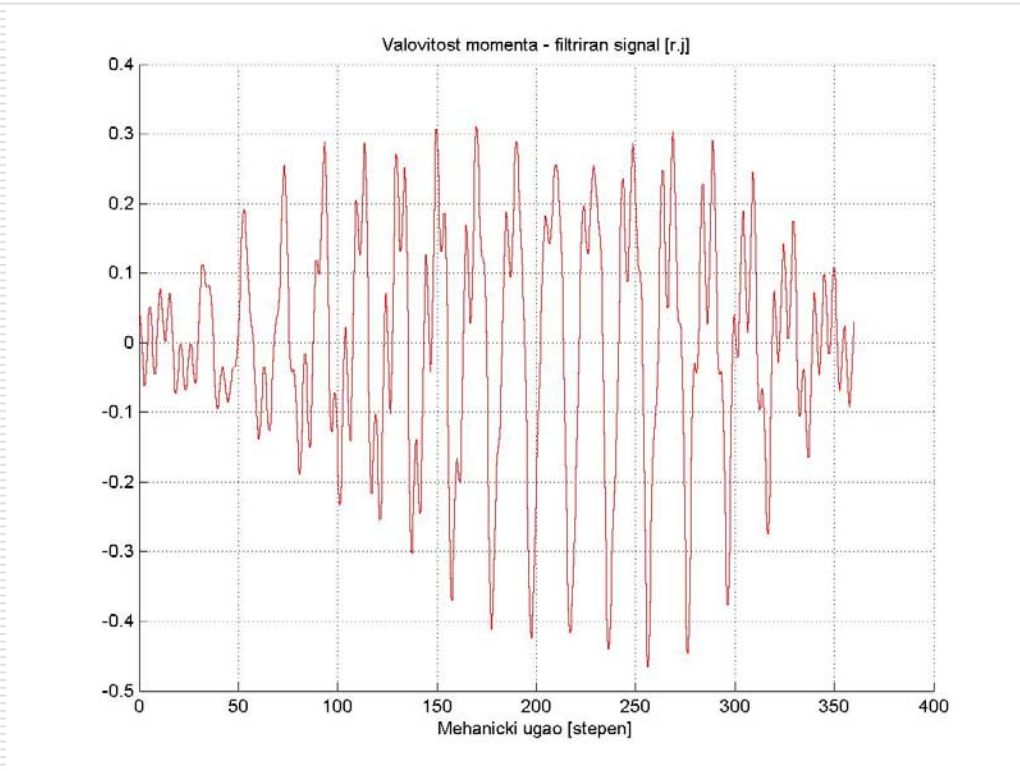
Другачији попречни пресек мотора променио је и таласни облик електро моторне силе.

Верификација програмског решења експерименталним путем 1/3

- Експериментални сетап обухвата:
 - Сервопогон – синхрони мотор са сталним магнетима на ротору и простопериодичном електромоторном силом, електромагнетски ризолвер причвршћен на вратилу мотора и дигитални сервопојачавач DBM03
 - Дигитални осцилоскоп LG3020 који има могућност да меморише мерене податке у осмобитној резолуцији и размењује их са персоналним рачунаром.

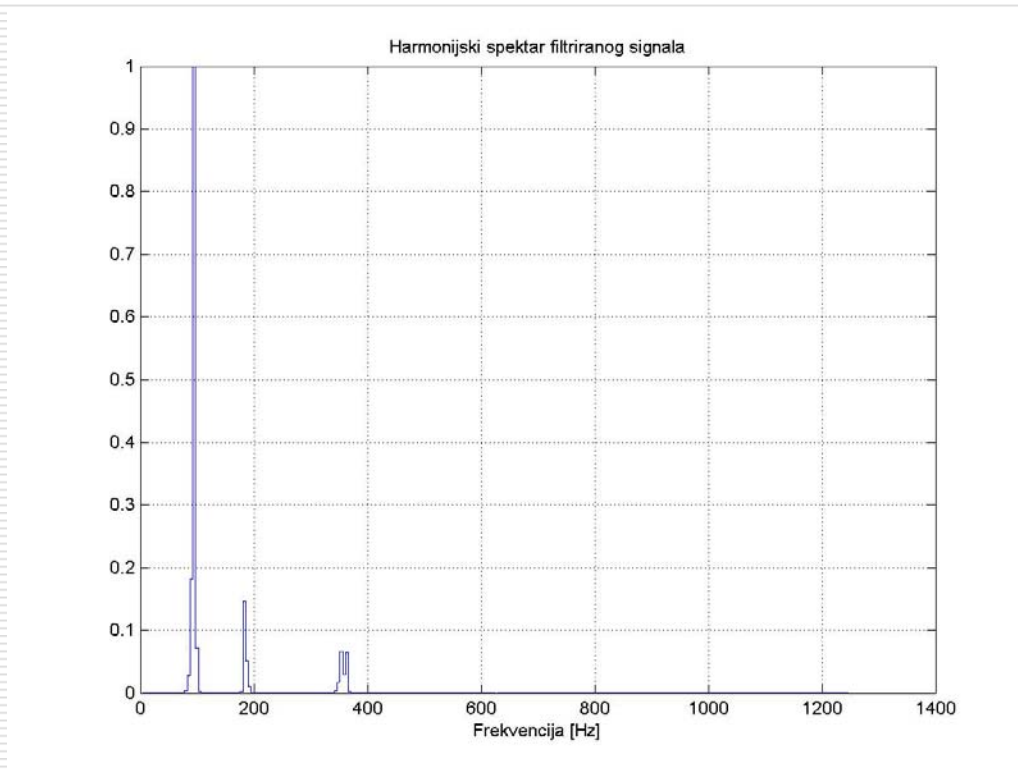
 - На мерењима се уочава да измерени сигнал q -компоненте статорске струје садржи велики број хармоника који су узрок различитих утицаја:
 - несавршеност магнетског и струјног кола
 - метода мерења
 - шум и квантизација код мерења позиције
 - системска кашњења
-

Верификација програмског решења експерименталним путем 2/3



*Таласни облик филтрираног сигнала q -компоненте статорске струје при брзини
обртања ротора $n=300$ об/мин и струји статора амплитуде $0.2A$*

Верификација програмског решења експерименталним путем 3/3



*Спектрални састав филтрираног сигнала q -компоненте статорске струје при брзини
обртања ротора $n=300$ об/мин и струји статора амплитуде $0.2A$*

Закључак

- У магистарском раду је анализирана и моделована валовитост момента синхронног мотора са сталним магнетима на ротору, која настаје услед несавршености магнетског и струјног кола мотора.
 - Као резултат свеобухватне анализе предложен је оригинални универзални упрошћени модел за предикцију момента синхронног сервомотора.
 - Утицај реакције индукта и засићења меког феромагнетског материјала на поље магнетске индукције у ваздушном процепу машине узети су у обзир симулацијом методом коначних елемената.
 - Коначно, резултати програмског решења су потврђени експерименталним мерењима оствареним на типичном синхронном сервопогону.
 - Резултати предложеног модела су корисни у пројектовању активних и пасивних компензација валовитости момента.
-