

Пуштање у рад МЈС са независном побудом променом отпорности у колу ротора

Жељко Станојевић ; Велемир Гавриловић
студенти мастер- студија
Електротехнички факултет
Источно Сарајево, Република Српска, БиХ
zeljkosta@hotmail.com
velemir.gavrilovic@yahoo.com

Садржај— Циљ овог рада је да се опишу начини пуштања у рад мотора једносмерне струје, са посебним акцентом на покретање мотора помоћу додатних отпорника. Извршен је кратак опис мотора једносмерне струје и опис његовог покретања. Анализиран је математички модел МЈС који се састоји из низа једначина. У оквиру рада је урађена и симулација у Матлаб-у.

Кључне речи-МЈС; модел; симулација; Matlab.

I. УВОД

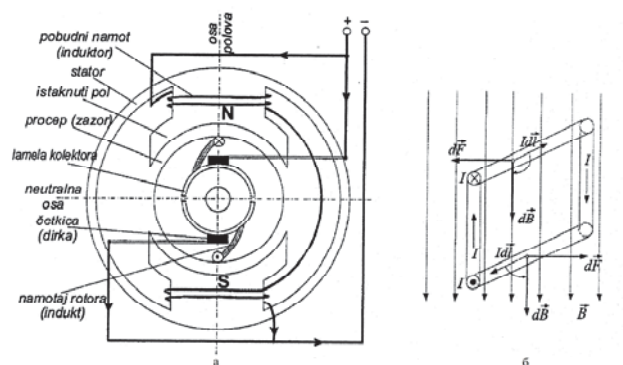
У пракси, пуштање у рад електромоторних погона представља веома важан процес. Због лаког управљања и могућности континуалне промене брзине обртања, мотори једносмерне струје су највећу примену пронашли у електромоторним погонима. До данас су развијени бројни поступци за пуштање у рад мотора једносмерне струје. У овом раду је описана метода промене отпорности у колу ротора.

II. ОСНОВНИ ДЕЛОВИ И ПРИНЦИП РАДА МОТОРА ЈЕДНОСМЕРНЕ СТРУЈЕ

A. Основни делови МЈС

Основни делови МЈС су непокретни део (статор) и обртни део (ротор). Између непокретног и обртног дела налази се међугвожђе (ваздушни процеп, зазор). Статор је начињен од јарма у облику шупљег ваљка од масивног гвожђа, на чијој су унутрашњој периферији причвршћена $2n$ истакнута пола сложених од феромагнетских лимова. На половима статора је смештен концентрисан побудни намотај (индуктор), повезан између полова на одређени начин и изведен на два прикључна краја. Ротор је цилиндричног облика и састављен од танких феромагнетских лимова и равномерно је ожљебљен по свом обиму. Пакет лимова ротора чврсто је спојен са вратилом машине. Намотај на ротору (индукт, арматура) је расподељен, смештен у жлебовима и затворен сам са собом. Комутатор (колектор) је састављен од бакарних сегмената (кришки) који су изоловани међусобно и у односу на масу. Постављен је са једне стране ротора и обрће се заједно са њим. На површину комутатора налаже изванредан број дирки (четкица), које су смештене на симетрали међу половима, у "неутралној зони" и

непомичне (механички учвршћене за статор), спојене на два прикључна краја на статору [1].



Слика 1. Пресек МЈС и навојак ротора у магнетном пољу статора [2]

B. Принцип рада МЈС

На слици 1 је представљен мотор једносмерне струје. Прикључењем на извор напона електрична струја протиче намотајима статора (индуктор) и намотајима ротора (индукт). Захваљујући колектору који је издељен на кришке, једносмерна струја која се доводи мења смер у проводницима ротора, када при обртању ротора они прелазе у другу паралелну грану, тј. када се налазе у простору испод другог пола. Тако, смер струје у проводницима ротора, који се налазе под датим полом, остаје све време непромењен.

Струја намота статора ствара основно магнетно поље што је на слици 1б означено индукцијом \vec{B} , због чега намот статора називамо побудним намотом. Обзиром да се у магнетном пољу статора нашао навојак ротора, кроз који протиче струја I_a , поље статора ће на дати проводник деловати електромагнетном силом \vec{F} . Правац деловања електромагнетне силе нормалан је на раван у којој леже вектори $I\vec{dl}$ и \vec{B} , а смер њеног деловања дефинисан је правилом десног завртња. Уколико десни завртња обрћемо у смеру најкраћег поклапања вектора са $I\vec{dl}$ вектором \vec{B} , тада смер напредовања завртња представља смер деловања силе. Како проводници једног

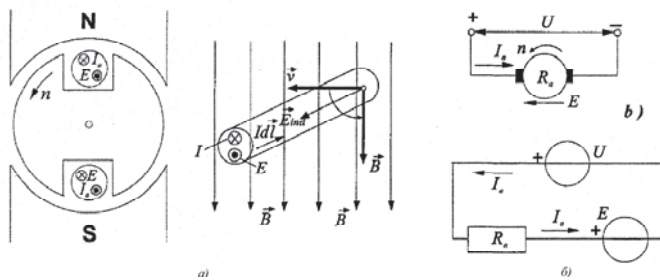
навојка ротора заузимају супротна места по обиму ротора, смерови струја кроз проводнике навојка ће бити супротни. Промена смера струје кроз проводнике једног навојка узрокује и промену смера електромагнетних сила \vec{F} на дате проводнике, стварајући на тај начин спрег сила. Дати спрег сила ствара електромагнетни момент \vec{M}_m који доводи до закретања ротора, односно његовог ротирања [2].

С. Електромоторна сила индукта

При обртању ротора мотора мења се број линија магнетне индукције које захвата један навојак, односно мења се магнетни флуks кроз навојак ротора. Промена флуksа доводи до појаве електромагнетне индукције (динамичке), односно индуковања електромоторне силе која је дефинисана изразом :

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = \int \vec{E}_{ind} d\vec{l} = \int (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{l} = vBl \quad (1)$$

Смер деловања индукованог електричног поља истовремено представљаи смер деловања индуковане електромоторне силе у колу ротора. Правац деловања индукованог електричног поља нормалан је на раван у којој леже вектори \vec{v} и \vec{B} , а смер му се одређује правилом десног завртња. Уколико се десни завртњ обрће у смеру најкраћег поклапања вектора \vec{v} са вектором \vec{B} , тада смер напредовања завртња представља и смер деловања индукованог електричног поља E_{ind} а тиме и смер индуковане електромоторне силе у колу ротора (слика 3а). Како проводници једног навојка ротора заузимају супротна места по обиму ротора, смерови вектора брзине \vec{v} проводника навојка ће бити супротни (слика 3а). Промена смера вектора брзине \vec{v} узрокује и промену смера индуковане електромоторне силе у проводницима навојка ротора .



Слика 2. а) Поједностављена шема МЈС; б) електрична шема МЈС [2]

Посматрајући слику 3б очигледно је да је смер индуковане електромоторне силе супротан смеру струје навојка ротора а самим тим и напону напајања U на који је прикључен намот ротора. Због тога се индукована ЕМС сила ротора назива контраелектромоторна сила.

Када се други Кирхофов закон примени на електрично коло ротора добија се следећа једначина:

$$U = E + R_a I_a \quad (2)$$

где је R_a укупна отпорност индукта у коју су укључене галванске отпорности свих намотаја у колу индукта и прелазна отпорност на четкицама.

Једначина (2) показује да је доведени напон већи од контраелектромоторне силе за падове напона у намотима ротора. Како је отпорност ротора мала то је и пад напона на њему мали, па је напон U незнатно већи од контраелектромоторне силе E (наравно уколико је реч о мотору) [2].

III. МЕХАНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ МЈС СА НЕЗАВИСНОМ ПОБУДОМ

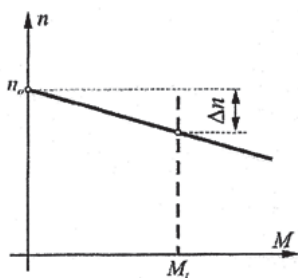
Побудни намот овог мотора је прикључен независно од намота индукта (арматуре) на мрежу. Основна карактеристика овог мотора је да његова побудна струја не зависи од струје арматуре, јер је напајање побудног намотаја у суштини независно. Уколико је напон напајања константан, без обзира шта се дешавало у колу ротора побудна струја остаје непромењена. То значи да, уколико се при константном напону напајања занемари деловање реакције индукта, може се сматрати да магнетни флуks остаје сталан при промени оптерећења.

Коначан израз за брзину обртања МЈС у стационарном режиму рада има следећи облик:

$$n = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{R_a + R_p}{k_e k_m \Phi^2} M_t \quad (3)$$

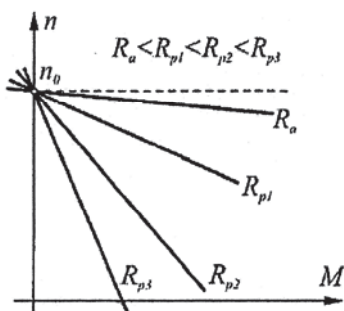
где је: U -напон напајања, Φ - побудни флуks, k_e, k_m - конструкционе константе, R_a, R_p - отпорности индукта и M_t -момент терета који мотор погони.

Једначина (3) представља механичку карактеристику независно побуђеног мотора. Први члан са десне стране представља брзину у идеалном празном ходу n_0 а други део представља пад брзине услед оптерећења Δn . Имајући при томе у виду да је пад брзине пропорционалан струји оптерећења, односно моменту терета, механичка карактеристика ће представљати правац одређеног нагиба у односу на апсцисну осу, а величину тог нагиба дефинише пад брзине Δn , као што је приказано на слици 3.



Слика 3. Природна механичка крива МЈС са независном побудом [2]

Уколико при испуњеним условима $U = \text{const}$, $\Phi = \text{const}$ мењамо вредност отпора R_p у кругу индукта, уз исти терет, пад брзине Δn ће се мењати, односно нагиб механичке карактеристике, чиме добијамо фамилију праваца као што је приказано на слици 4. Нагиб правца је тим већи што је већи укупни отпор у колу ротора. Природна карактеристика независно побуђеног мотора R_a (без R_p) има најмањи нагиб, односно она је најтврђа у целој фамилији карактеристика, а то значи да се у том случају брзина мотора незнатно мења са променом оптерећења. Код мотора са независном побудом са помоћним половима вредност брзине од празног хода до пуног оптерећења се мења у границама (3-8%) [2].



Слика 4. Фамилија карактеристика независно побуђеног МЈС [2]

IV. ПОКРЕТАЊЕ ЕЛЕКТРОМОТОРНИХ ПОГОНА СА МЈС

A. Увод

Сваки електромотор се оцењује на основу три врсте карактеристика: механичких, регулационих и полазних. Полазне карактеристике мотора су у тесној вези са његовим радним, односно механичким карактеристикама. У пракси, пуштање мотора у рад представља веома важан процес. При томе су вредности полазне струје и полазног момента две најважније величине на основу којих се оцењује успешно извођење операције пуштања у рад.

Да би се приликом пуштања у рад мотор заиста покренуо неопходно је да полазни момент мотора буде већи од момента терета који делује на вратило мотора. С друге стране вредност полазне струје, која ствара полазни момент, не сме прекорачити одговарајућу допуштену вредност како не би дошло до прекомерног загревања а тиме и оштећења мотора као и недозвољених падова напона. Да би се то

спречило, зависно од врсте мотора, развијени су разни поступци упуштања. Скоро сви ти поступци заснивају се на смањењу напона мотора, било директним смањењем или индиректним преко укључења отпорника, реактанси или преклапањем намотаја. Ређе се примењују други поступци, као што су промена учестаности или залет помоћним мотором.

Мотори једносмерне струје се најчешће упуштају убацивањем отпорника у роторски струјни круг или директним смањењем напона напајања помоћу специјалних уређаја [2].

B. Пуштање у рад МЈС убацивањем отпора у коло ротора

Када би смо моторе једносмерне струје пуштали у рад без претходних припрема, исти би повукли врло велику полазну струју, која је неколико пута већа од називне струје мотора. У тренутку укључења мотора полазна струја мотора ограничена је само омским отпором намота ротора. У нормалном режиму рада мотора једносмерне струје струја ротора дефинисана је релацијом:

$$I_{an} = \frac{U - E}{R_a} = \frac{U - k_e \Phi n}{R_a} \quad (4)$$

У тренутку пуштања у рад ротор мотора је непокретан ($n=0$). Уколико дату чињеницу ($n=0$) уврстимо у горњу релацију то израз за полазну струју мотора постаје облика:

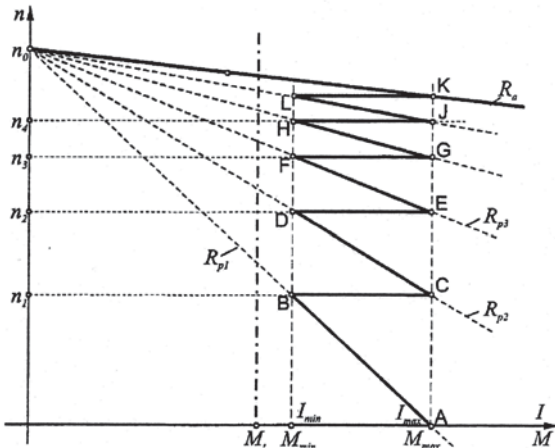
$$I_p = \frac{U}{R_a} \gg I_{an} \quad (5)$$

Имајући у виду да је омски отпор намота ротора релативно мали то се на основу последње релације да закључити да ако би намот ротора био прикључен на пуни напон мреже, исти би повукао недопустиво велику вредност струје ротора која је и до 10 пута већа од називне струје.

Појава тако великих полазних струја може изазвати велике потешкоће на мотору, односно појаву кружне ватре на комутатору. Осим тога, при тако великим полазним струјама мотор развија велики полазни момент који може довести до механичких оштећења обртних делова погонске машине. Појава великих вредности полазне струје има за последицу и велики пад напона напојне мреже што утиче на рад других потрошача који су прикључени на исту мрежу са датим мотором.

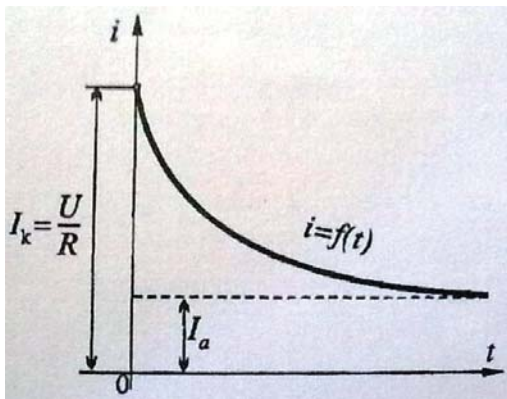
Дакле, приликом пуштања мотора у рад неопходно је ограничити вредност полазне струје, како би се избегле горе наведене последице, а пре свега појава кружне ватре на комутатору. Максимална вредност полазне струје не сме прећи двоструку вредност називне струје ($I_{pmax} \leq 2I_{an}$) а у специјалним конструкцијама не већу од троструке вредности називне струје ($I_{pmax} \leq 3I_{an}$).

Дакле, у циљу ограничења полазне струје мотора неколико тренутака пре укључења ротора на номинални напон који је исправљен помоћу диодног исправљача, у коло ротора се укључује адекватан предотпор R_p . Са повећањем брзине обртања мотора, искључује се део по део предотпора све док се мотор не залети до номиналне брзине тј. док не почне да ради по природној механичкој карактеристици. Механичке криве у току залетања мотора су приказане на слици 5.



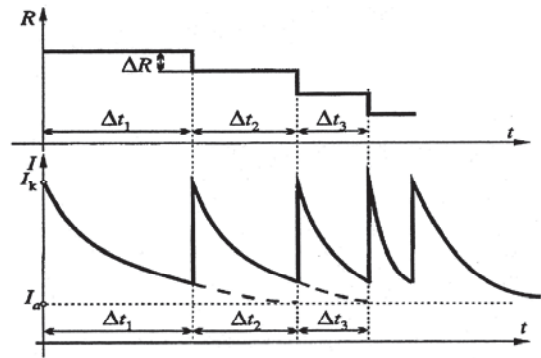
Слика 5. Механичке криве МЈС у току залетања [2]

У процесу пуштања у рад мотора једносмерне струје, полазна струја а тиме и полазни момент мотора опадају по експоненцијалном закону од неке максималне струје кратког споја I_k , односно момента M_k до неке коначне вредности струје оптерећења I_{an} (слика 6).



Слика 6. Облик полазне струје при пуштању у рад МЈС [2]

Дакле, ако би се при константном моменту терета M_t и исправљеном напону мреже U , мењала вредност отпора R у роторском струјном кругу, за исту вредност отпора побудног намота R_f у различитим временским интервалима t_i онда се у сваком од тих интервала мења и струја по експоненцијалном закону, што се и види са слике 7.



Слика 7. Дијаграм промене полазне струје при $U=const; M_t=const$ [2]

V. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ МЈС

A. Отите једначине МЈС

Математички модел мотора једносмерне струје се састоји из скупа диференцијалних и алгебарских једначина. Прва диференцијална једначина је напонска једначина кола индукта (ротора), и она гласи:

$$U_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \omega \Phi_f \quad (6)$$

Овде су U_a и i_a напон и струја индукта, Φ_f побудни флуks обухваћен индуктом, а ω угаона брзина ротора. Прва два члана са десне стране представљају падове напона услед отпорности R_a и самоиндуктивности L_a индукта. Трећи члан представља контраелектромоторну силу услед ротације. Овај члан је доминантан и обично се означава са:

$$e = \omega \Phi_f \quad (7)$$

Друга диференцијална једначина је напонска једначина побудног кола (статора), која гласи:

$$U_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (8)$$

Овде су U_f и i_f напон и струја побудног кола, а R_p и L_p представљају активну отпорност и самоиндуктивност намота статора.

Трећа диференцијална једначина је Њутнова једначина кретања (ротације), која гласи :

$$J \frac{\partial \omega}{\partial t} = m_e - m_m \quad (9)$$

Овде је J момент инерције свих обртних делова погона (сведен на ротор мотора), m_e (електрични) момент мотора, а m_m (механички) момент оптерећења. У овој једначини је занемарено деловање трења.

Електрични момент је једнак производу струје индукта и побудног флукса:

$$m_e = i_a \Phi_f \quad (10)$$

а механички момент је у општем случају функција брзине, угла ротора и времена:

$$m_m = f(\omega, \vartheta, t) \quad (11)$$

али у пракси најчешће функција само брзине [3].

У појединим случајевима (позициони сервосистеми, зависност момента оптерећења од угла, торзија вратила) потребно је додати и четврту диференцијалну једначину:

$$\omega = \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \quad (12)$$

V. Динамички математички модел МЈС

У нормализованом систему једначине које описују мотор једносмерне струје гласе:

$$T_a \frac{di_a}{dt} = \frac{u_a}{R_a} - \frac{\omega \Phi_f}{R_a} - i_a; T_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (13)$$

$$T_f \frac{d\Phi_f}{dt} = u_f - i_f (\Phi_f); T_f = n \frac{\Phi_f}{u_f} \quad (14)$$

$$T_m \frac{d\omega}{dt} = i_a \Phi_f - m_m; T_m = J \frac{\omega_n}{m_b}; K = 0 \quad (15)$$

$$T_\Theta \frac{d\Theta}{dt} = \omega; T_\Theta = \frac{\Theta_b}{\omega_n} \quad (16)$$

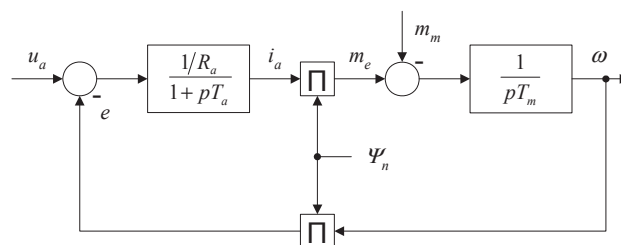
C. Анализа динамике мотора са сталном побудом

За формирање блок-дијаграма мотора једносмерне струје коришћеног у симулацији треба узети две од горње четири једначине. Под претпоставком да је флукс номиналан и сталан и да угао ротора није од значаја, у игри остају само једначине (13) и (14). Вршењем Лапласове трансформације на њима оне добијају следећи облик:

$$T_a p i_a = \frac{u_a}{R_a} - \frac{\omega \Phi_f}{R_a} - i_a \Rightarrow i_a = \left(u_a - \omega \Phi_f \right) \frac{1/R_a}{1 + p T_a} \quad (17)$$

$$T_m p \omega = i_a \Phi_f - m_m \Rightarrow \omega = \left(i_a \Phi_f - m_m \right) \frac{1}{p T_m} \quad (18)$$

Модел мотора једносмерне струје који се добија на овај начин је приказан на слици 8.



Слика 8. Модел мотора једносмерне струје [3]

VI. СИМУЛАЦИЈА ПУШТАЊА У РАД МЈС

Мотор једносмерне струје који је коришћен у симулацији има следеће податке:

$$U_n=220V; I_{an}=16,5A; n_n=2880 \text{ o/min}; R_a=1,37\Omega; L_a=1mH; J=0,5 \text{ kgm}^2$$

Мотор се напаја са излаза диодног исправљача који је преко регулационог трансформатора повезан на мрежу. Побуда је номинална и независна. Губици на трење и вентилацију и у гвожђу се занемарују. Момент терета је једнак половини номиналног оптерећења ($M_t=0,5M_n$). Отпорници за пуштање у рад имају следеће отпорности:

$$R_{d1}=3,5 \Omega, R_{d2}=3,5 \Omega, R_{d3}=2 \Omega$$

На следећој слици је приказана шема која је коришћена у симулацији у Матлаб Симулинк окружењу.

Слика 12. Промена момента мотора у току залета

VII. ЗАКЉУЧАК

У оквиру овог рада је анализирана варијанта покретања мотора једносмерне струје променом отпора у колу ротора. Установљено је да ова метода представља једноставно и поуздано решење. Отпорници за пуштање у рад су везани у коло ротора само у току покретања мотора тако да не морају бити димензионисани за сталан рад што самим тим снижава њихову цену.

Симулацијом у Матлаб-у су приказани таласни облици полазне струје, брзине обртања и момента мотора. Упоредивањем таласног облика полазне струје добијеног у симулацији са таласним обликом струје са слике 7 утврђено је да се поприлично подударају, што доводи до закључка да модел мотора једносмерне струје који је коришћен у симулацији даје добре резултате.

ЗАХВАЛНИЦА

Истраживања у овом раду су рађена у склопу израде дипломског рада на првом циклусу академских студија на Електротехничком факултету Универзитета у Источној Сарајеву под менторством проф.др Томислава Шекаре.

VIII. ЛИТЕРАТУРА

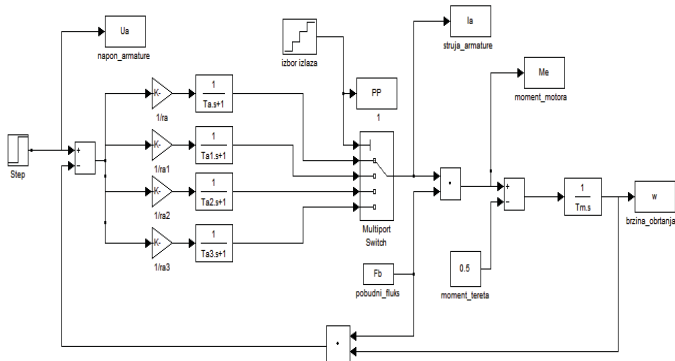
- [1] Б. Митраковић, „Машине за једносмерну струју“, Сл. лист СФРЈ, Београд, 1981.
- [2] Л.Сикимић, „Електромоторни погони“, скрипта са предавања, 2011.
- [3] В.Бучковић, „Електрични погони“, Електротехнички факултет, Београд, 1997.

ABSTRACT

Paper describes DC shunt motor's starting techniques. It is especially described starting with external resistance included in armature circuit. Paper also gives a short description of DC motor, and describes starting process. It was analyzed mathematical model of DC motor, which consists of a number of equations. At the end, simulation of starting DC motor has been done. The simulation was realized in Matlab Simulink environment, and the results are shown in the paper.

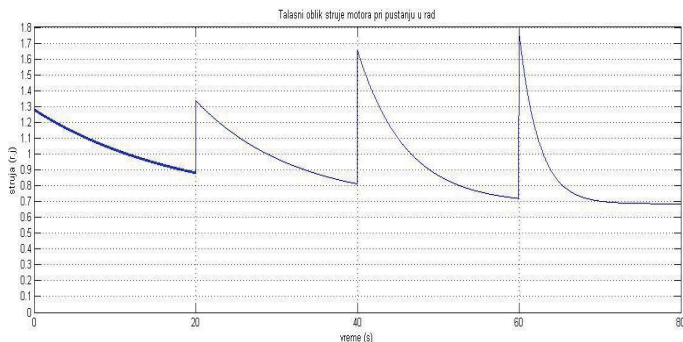
STARTING A DC SHUNT MOTOR BY CHANGING ARMATURE RESISTANCE

Zeljko Stanojevic ; Velemir GavriloVIC

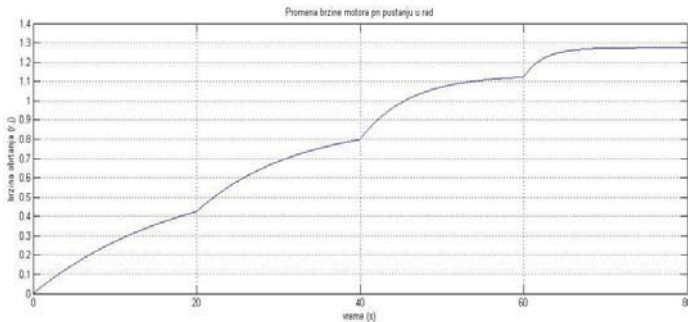


Слика 9. Модел МЈС у Матлаб симулинк окружењу

На наредним сликама су приказани таласни облици струје арматуре, брзине обртања и момента мотора у току пуштања у рад.



Слика 10. Таласни облик струје мотора у току залета



Слика 11. Промена брзине обртања мотора у току залета

