

Određivanje dinamičkih karakteristika regulatora napona statora i struje pobude elektromašinskog pobudnog sistema sa jednosmernom budilicom

Dorđe Stojić, Slavko Veinović, Milan Milinković, Zoran Ćirić, Dušan Joksimović, Nemanja Miložić, Dušan Arnautović

Elektrotehnički Institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija
djordje.stojic@ieent.org

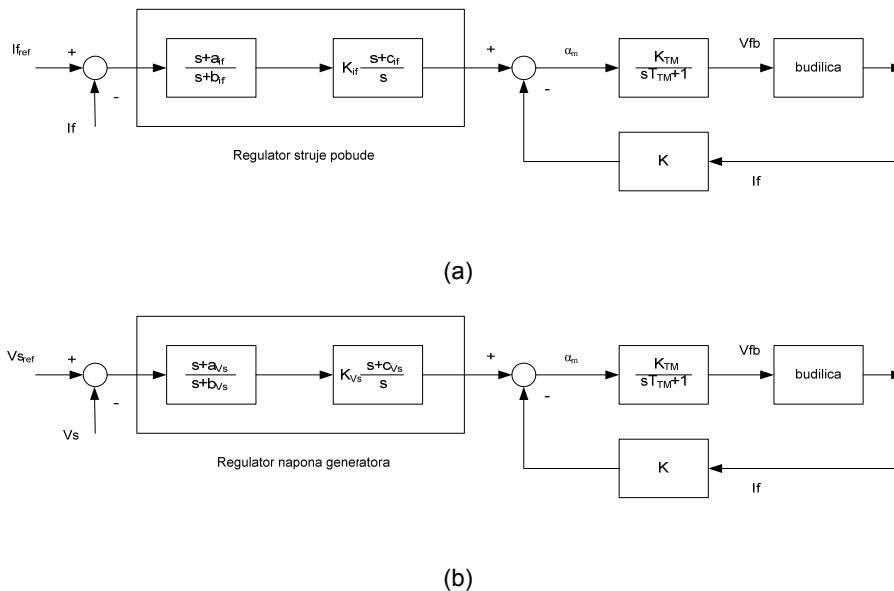
Kratak sadržaj: U ovom radu dat je prikaz procedure za određivanje vrednosti parametara regulatora pobude na osnovu step promene reference u praznom hodu. Regulator pobude sastoji se od PID regulatora i tiristorskog mosta kao izvršnog organa. U sistemu pobude zatvorene su dve povratne spregne: unutrašnja povratna sprega po struji pobude i spoljašnja povratna sprega po struji pobude u slučaju strujnog regulatora odnosno povratna sprega po naponu statora u slučaju naponskog regulatora. Procedura za određivanje parametara opisuje određivanje ekvivalentnog pojačanja regulatora i tiristorskog mosta. U radu su određeni parametri regulatora na osnovu merenja i snimaka sa agregata A5 u TE "Kolubara A".

Ključne reči: Pobudni sistem, Strujni regulator, Naponski regulator, Jednosmerna budilica, Tiristorski most

1. Uvod

Primer elektromašinskog pobudnog sistema sa jednosmernom budilicom nalazi se u TE "Kolubara A" na agregatu A5. Izvršni organ regulatora pobude je punoupravljeni tiristorski most koji napaja jednosmernu budilicu. U ovom radu predstavljena je procedura za određivanje vrednosti parametara regulatora korišćenjem merenja njihovih ulaznih i izlaznih veličina snimljenih na akvizicionim sistemom na agregatu A5 u TE "Kolubara A".

Prilikom projektovanja regulatora napona statora i struje rotora sinhronog generatora realizovane su strukture, čiji su ekvivalentni modeli u kontinualnom domenu dati na Slikama 1 (a) i (b).



Slika 1. Ekvivalentni modeli u kontinualnom domenu regulatora (a) struje pobude i (b) napona statora

Ekvivalentan model regulatora sastoji se iz dve celine: linearnog regulatora i ekvivalentnog modela izvršnog organa – punoupravljivog tiristorskog mosta. U slučaju da pobudni sistem ima i budilicu zatvara se još jedna lokalna povratna sprega po struji pobude generatora kao što je to prikazano na slici 1.

Pošto punoupravljivi tiristorski most predstavlja nelinearni izvršni organ, njegova funkcija prenosa data je u formi modela linearizovanog u okolini radne tačke generatora definisane njegovom nominalnom veličinama.

Takodje, u slučaju pobuda sa samopobudnim sistemom napajanja tiristorskog mosta ekvivalentno pojačanje tiristorskog pretvarača izmereno je za slučaj nominalne vrednosti napona statora generatora, koja se koristi za napajanje transformatora pobude, odnosno, za napajanje tiristorskih mostova.

2. Određivanje parametara ekvivalentnog linearizovanog modela tiristorskog pretvarača

Ekvivalentno pojačanje tiristorskog pojačavača određuje se linearizacijom u okolini radne tačke tiristorskog pretvarača definisane nominalnim veličinama regulatora, pošto tiristorski pretvarač predstavlja izvršni organ sa nelinearnom izlaznom karakteristikom.

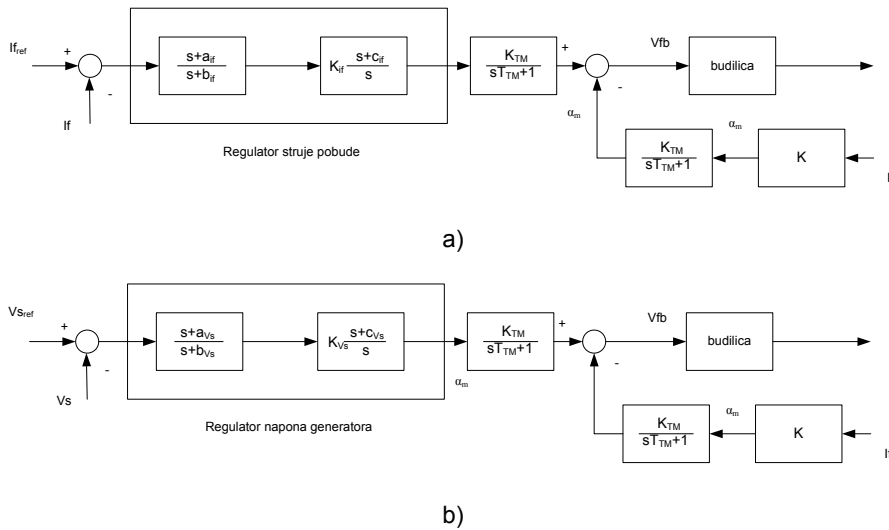
Merenje vrednosti ekvivalentnog pojačanja bi će izvršeno zajedno sa određivanjem vrednosti ekvivalentnog pojačanja regulatora. Pored pojačanja,

od interesa je i vremenska konstanta kašnjenja tiristorskog mosta, koja je fiksna i koja iznosi $T_{TM} = 0.001s$. Otuda, ekvivalentna funkcija prenosa tiristorskog pretvarača može se izraziti kao

$$\frac{V_f(s)}{\Delta\alpha_m(s)} = \frac{K_{TM}}{0,001s + 1} \quad (1)$$

3. Određivanje parametara regulatora na osnovu odziva regulisanih i upravljačkih veličina

U nastavku date su procedure za određivanje vrednosti parametara regulacije struje pobude i napona statora. Za određivanje parametara modela regulatora koristiće se ekvivalentan model strukture regulatora dat na slici 2. Pojačanja regulatora koji će se dobiti identifikacijom parametara uključuju i pojačanje tiristorskog mosta.



Slika 2. Ekvivalentni modeli u kontinualnom domenu regulatora (a) struje pobude i (b) napona statora

3.1. Određivanje parametara regulatora struje pobude na osnovu odziva struje pobude generatora i napona pobude budilice

Određivanje modela regulatora struje pobude u kontinualnom domenu na osnovu odziva struje pobude generatora i napona pobude budilice vrši na osnovu poznatih vrednosti reda, strukture, i odnosa parametara digitalnog regulatora, uz merenje njegovog ekvivalentnog pojačanja korišćenjem odziva upravljačkih veličina u realnom vremenu. Naime, ekvivalentni diskretni model regulatora struje pobude moguće je definisati u formi matrične diferencne jednačine odgovarajućeg reda, sa signalom greške struje pobude kao ulaznom i komandom ugla tiristorskog pretvarača kao izlaznom veličinom.

Analizom funkcije prenosa regulatora struje pobude, date na Slici 2 (a), može se zaključiti da se radi o sistemu drugog reda. Pošto je u slučaju agregata „A5” TE „Kolubara A” Lead-Lag član regulatora neaktivan, odnosno $a_{if} = b_{if} = 0$, potrebno je odrediti vrednosti parametara funkcije prenosa prvog reda regulatora struje pobude.

U jednačini (4) dat je prikaz diferencne jednačine, koja predstavlja diskretni model kontinualne funkcije prenosa koja povezuje signal greške struje pobude generatora i deo napona pobude budilice koji potiče od greške struje pobude (2). Drugi deo napona pobude potiče od lokalne povratne sprege tj. struje pobude generatora. Kako se struja pobude ne menja trenutno sa promenom napona pobude možemo da pretpostavimo da ukupna promena napona pobude budilice u trenutku promene reference struje pobude potiče od greške struje pobude. Pošto je dinamika tiristorskog mosta (1) za više redova veličine brža u poređenju sa dinamikom regulatora, prilikom identifikacije parametara strujnog regulatora tiristorski pretvarač biće modelovan ekvivalentnim pojačanjem K_{TM} . Otuda sledi da ekvivalentna funkcija prenosa između signala greške i napona pobude budilice ima oblik:

$$G(s) = \frac{V_{fb}(s)}{e_{if}(s)} = K_{TM} K_{if} \frac{s + c_{if}}{s} \quad (2)$$

Posle diskretizacije prenosne funkcije (2) periodom odabiranja $T = 0,02s$ dobijamo prenosnu funkciju modela u Z domenu:

$$G(z) = \frac{V_{fb}(z)}{e_{if}(z)} = K_1 \frac{z - \frac{K_2}{K_1}}{z - 1} \quad (3)$$

gde K_1 definiše proporcionalno dejstvo a K_2 / K_1 definiše integralno dejstvo, Kada jednačinu (3) napišemo u vremenskom domenu dobijamo:

$$V_{fb}(k) = V_{fb}(k-1) + K_1 e_{if}(k) - K_2 e_{if}(k-1) \quad (4)$$

Pošto je na pobudi agregata „A5“ u TE „KOLUBARA“ podešena vrednost odnosa parametara $K_2 / K_1 = 0,988$, jednačinu (4) moguće je izraziti kao

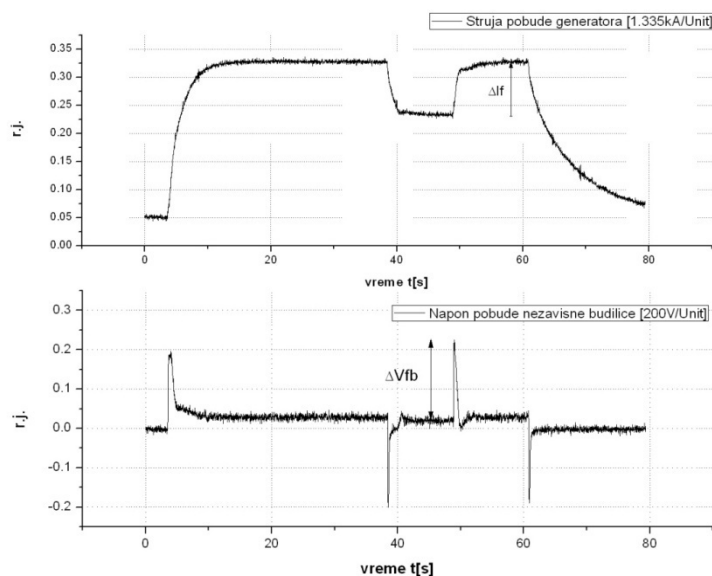
$$V_{fb}(k) - V_{fb}(k-1) = K_1 [e_{If}(k) - 0,988 e_{If}(k-1)] \quad (5)$$

gde su veličine $V_{fb}(k)$ i $e_{If}(k)$ dobijene merenjem odziva regulatora prilikom step poremećaja reference regulatora. Signal greške struje pobude dobija se na osnovu izmerene vrednosti struje pobude i referentne vrednosti struje pobude, poznate prilikom izvođenja eksperimenta step poremećaja, kao

$$e_{If}(k) = I_f^*(k) - I_f(k) \quad (6)$$

Na osnovu diferencne jednačine (5), merenja struje i napona pobude budilice, kao odgovarajuće reference struje pobude i moguće je izmeriti vrednost pojačanja K_1 iz (5) korišćenjem rezultata eksperimenta step promene referentne vrednosti struje pobude generatora.

Naime, na Slici 3 dati su prikazi struje pobude generatora i napona pobude budilice za step poremećaj generatora u praznom hodu.



Slika 3. Odzivi (a) napona pobude budilice i (b) struje pobude generatora za step promenu referentne vrednosti struje pobude sa 90%-100% struje praznog hoda, u strujnoj regulaciji

Na osnovu snimaka step odziva struje pobude generatora i napona pobude budilice, odnosno vrednosti promene struje pobude i napona pobude

budilice ΔI_f i ΔV_{fb} na Slici 3, kao i jednačine (4), moguće je izračunati vrednost ekvivalentnog pojačanja K_f regulatora struje pobude i tiristorskog pretvarača kao

$$K_1 = \frac{\Delta V_{fb}}{\Delta I_f} = \frac{44V - 4V}{440A - 313A} = 0,31 \left[\frac{V}{A} \right], \quad (7)$$

pošto je u trenutku step promene reference struje pobude $\Delta V_{fb} = V_{fb}(k) - V_{fb}(k-1)$, $e_{if}(k) = \Delta I_f$ i $e_{if}(k-1) = 0$.

Na osnovu jednačina (3) i (7) može se predstaviti diskretni ekvivalent regulatora struje pobude sa tiristorskim pretvaračem modelovanim ekvivalentnim pojačanjem, za periodu odabiranja $T_s = 0,02$ s kao

$$G_f(z) = K_1 \frac{z - 0,988}{z - 1} = 0,31 \frac{z - 0,988}{z - 1} \quad (8)$$

Kontinualni ekvivalent (9) funkcije prenosa (8) može se dobiti primenom bilinearne transformacije

$$G_{fc}(s) = 0,31 \frac{s + 0,6}{s} \quad (9)$$

Takođe, linearizovana funkcija prenosa između signala greške struje pobude i napona pobude, sa uključenom dinamikom tiristorskog pretvarača, može se predstaviti kao

$$G_{fcm}(s) = 0,31 \frac{s + 0,6}{s} \frac{1}{0,001s + 1} \quad (10)$$

3.2. Određivanje parametara regulatora napona statora na osnovu odziva napona statora i napona pobude budilice

Model regulatora napona statora u kontinualnom domenu određuje se na sličan način metodi primenjenoj u poglavlju 3.1. za određivanje vrednosti parametara regulatora struje.

Analizom funkcije prenosa regulatora napona statora, date na Slici 2 (b), može se zaključiti da se radi o sistemu drugog reda. Pošto je u slučaju Agregata "A5" TE "Kolubara A" Lead-Lag član regulatora neaktivan, odnosno $a_{Vs} = b_{Vs} = 0$, potrebno je odrediti vrednosti parametara funkcije prenosa prvog reda regulatora napona statora.

U jednačini (13) dat je prikaz diferencne jednačine, koja predstavlja diskretni model kontinualne funkcije prenosa koja povezuje signal greške napona statora i deo napona pobude budilice koji potiče od greške napona statora (11). Drugi deo napona pobude potiče od lokalne povratne sprege tj. struje pobude generatora. Kako se struja pobude ne menja trenutno sa promenom napona pobude možemo da pretpostavimo da ukupna promena napona pobude budilice u trenutku promene reference napona statora potiče od greške napona statora. Pošto je dinamika tiristorskog mosta (1) za više redova veličine brža u poređenju sa dinamikom regulatora, prilikom identifikacije parametara strujnog regulatora tiristorski pretvarač biće modelovan ekvivalentnim pojačanjem K_{TM} . Otuda sledi da ekvivalentna funkcija prenosa između signala greške napona statora i napona pobude ima oblik

$$G_v(s) = \frac{V_{fb}(s)}{e_{V_s}(s)} = K_{TM} K_{V_s} \frac{s + c_{V_s}}{s} \quad (11)$$

Posle diskretizacije prenosne funkcije (11) periodom odabiranja $T = 0,02s$ dobijamo prenosnu funkciju modela u Z domenu

$$G(z) = \frac{V_{fb}(z)}{e_{V_s}(z)} = K_3 \frac{z - \frac{K_4}{K_3}}{z - 1}, \quad (12)$$

gde K_3 definiše proporcionalno dejstvo a K_4 / K_3 definiše integralno dejstvo. Kada jednačinu (12) napišemo u vremenskom domenu dobijamo

$$V_{fb}(k) = V_{fb}(k-1) + K_3 e_{V_s}(k) - K_4 e_{V_s}(k-1) \quad (13)$$

Pošto je na pobudi Agregata „A5“ u TE „Kolubara A“ podešena vrednost odnosa parametara $K_4 / K_3 = 0,998$, jednačinu (13) moguće je izraziti kao

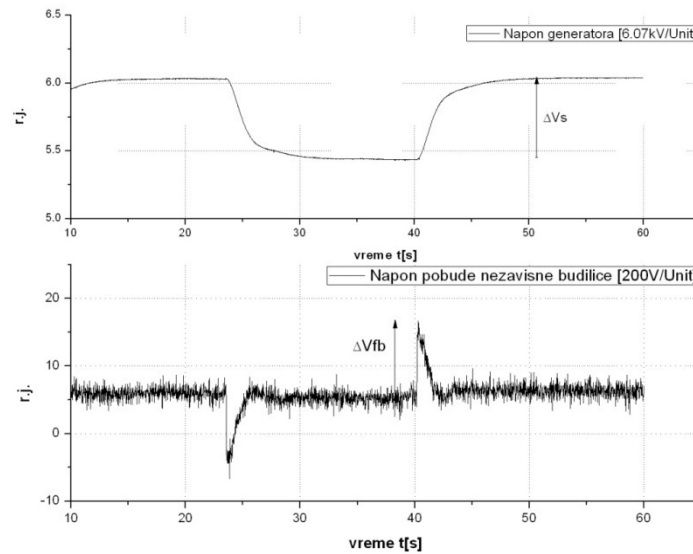
$$V_{fb}(k) - V_{fb}(k-1) = K_3 [e_{V_s}(k) - 0,998 e_{V_s}(k-1)] \quad (14)$$

gde su veličine $V_{fb}(k)$ i $e_{V_s}(k)$ dobijene merenjem odziva regulatora prilikom step poremećaja reference regulatora. Signal greške napona statora dobija se na osnovu izmerene vrednosti napona statora i referentne vrednosti napona statora poznate prilikom izvođenja eksperimenta step poremećaja kao

$$e_{V_s}(k) = V_s^*(k) - V_s(k) \quad (15)$$

Na osnovu diferencne jednačine (14), merenja napona statora i napona pobude budilice, kao odgovarajuće reference napona statora i moguće je izmeriti vrednost pojačanja K_3 iz (14) korišćenjem rezultata eksperimenta step promene referentne vrednosti napona statora.

Naime, na Slici 4 dati su prikazi napona statora i napona pobude budilice za step poremećaj generatora u praznom hodu.



Slika 4. Odzivi (a) napona pobude budilice i (b) napona statora za step promenu referentne vrednosti napona statora sa 90%-100% napona praznog hoda, u naponskoj regulaciji

Na osnovu snimaka step odziva napona statora i napona pobude, odnosno vrednosti promene napona statora i napona pobude ΔV_s i ΔV_{fb} na Slici 4, kao i jednačine (14), moguće je izračunati vrednost ekvivalentnog pojačanja K_3 regulatora struje pobude i tiristorskog pretvarača kao

$$K_3 = \frac{\Delta V_{fb}}{\Delta V_s} = \frac{10V}{1050V} = 0,0095 \left[\frac{V}{V} \right], \quad (16)$$

pošto je u trenutku step promene reference struje pobude $\Delta V_s = V_s(k) - V_s(k-1)$, $e_{Vs}(k) = \Delta V_s$ i $e_{Vs}(k-1) = 0$.

Na osnovu jednačina (12) i (16) može se izvesti diskretni ekvivalentni regulator napona statora sa tiristorskim pretvaračem modelovanim ekvivalentnim pojačanjem, za periodu odabirana $T_s = 0,02$ s kao

$$G_s(z) = K_3 \frac{z-0,998}{z-1} = 0,0095 \frac{z-0,998}{z-1} \quad (17)$$

Kontinualni ekvivalent (18) funkcije prenosa (17) može se dobiti primenom bilinearne transformacije.

$$G_{sc}(s) = 0,0095 \frac{s+0,1}{s} \quad (18)$$

Takođe, linearizovana funkcija prenosa između signala greške struje pobude i napona pobude, sa uključenom dinamikom tiristorskog pretvarača, može se predstaviti kao

$$G_{scm}(s) = 0,0095 \frac{s+0,1}{s} \frac{1}{0,001s+1} \quad (19)$$

3.3. Određivanje pojačanja lokalne povratne sprege

Ako se ukine spoljašnja povratna sprega po naponu generatora u slučaju naponskog regulatora ($K_{Vs} = 0$) ili spoljašnja povratna sprega po struji pobude u slučaju strujnog regulatora ($K_{If} = 0$) moguće je izmeriti pojačanje K lokalne povratne sprege, odnosno pojačanje lokalne povratne sprege zajedno sa pojačanjem mosta KK_{TM} . U tabeli 1. date su vrednosti napona pobude budilice koje odgovaraju određenim strujama pobude generatora. Struja pobude praznog hoda nalazi se u opsegu struja pobude iz tabele 1. Da bi se odredilo pojačanje lokalne povratne sprege potrebno je izračunati promene napona pobude budilice i struje pobude generatora.

Tabela 1.

If[A]	ugao[°]	Ufb[V]
133,5	17,24	24
200,25	7,8	11

$$KK_{TM} = \frac{\Delta U_f}{\Delta I_f} = \frac{-13V}{66,75A} = -0,19 \frac{[V]}{[A]} \quad (19)$$

4. Zaključak

Procedura za određivanje parametara regulatora pobude prikazana u ovom radu ne obuhvata određivanje pojačanja tiristorskog mosta. Da bi se odredilo ovo pojačanje potrebno bi bilo izmeriti i ugao vođenja tiristorskog mosta. Kako nam ovo merenje nije dostupno pristupilo se određivanju parametara regulatora u formi kao na slici 2. Određivanje ekvivalentnog pojačanja regulatora u direktnoj grani regulacione petlje izvršeno je na osnovu snimka odziva regulatora na step promenu reference. Za određivanje ekvivalentnog pojačanja u povratnoj grani lokalne povratne sprege potrebno je ukinuti pojačanje u direktnoj grani spoljašnje regulacione petlje.

Literatura

- [1] P. M. Anderson, A. A. Fouad, Power System Control and Stability, John Wiley & Sons, 2003.
- [2] Zve-Lee Gaing, A particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System, IEEE Transactions on Energy Conversion, June 2004.
- [3] Kiyong Kim, Richard C. Schaefer, Tuning a PID Controller for a Digital Excitation Control System, IEEE Transactions on Industry Applications, March/April 2005.
- [4] IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of Dynamic Performance of Excitation Control System, IEEE Std 421.2-1990, May 1990.
- [5] Zoran Ćirić, Đorđe Stojić, Dušan Joksimović, Nemanja Miložić, Milan Milinković, Rekonstrukcija sistema pobude bloka A5 u TE "Kolubara A" - izvedeno stanje, Projekat br. 211027, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd, 2011.

Abstract. In this paper, procedure for AVR parameter estimation is proposed, based on step responses when synchronous generator in idle run. The exciter system includes AVR, thyristor rectifier and DC exciter. AVR is realized in the form of cascade control structure with two control loops. PID controller in the outer loop represents the primary controller. P controller in the inner loop represents secondary controller which enables the faster field current response time. The aim of procedure is to determine equivalent gain of PID controller and thyristor rectifier. The measurements used in the parameter estimation procedure are taken from fossil power plant "Kolubara A", aggregate A5.

Keywords: Exciter system, Field current, Stator voltage, DC exciter, Thyristor rectifier

Dynamic Performance Estimation of Stator Voltage Regulator in Rotary Exciter System with DC Exciter

Rad primljen u uredništvo 11.09.2011. godine
Rad prihvaćen 5.10.2011. godine