

DOI: [10.46793/CIGRE37.C2.10](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C2.10)**C2.10****ODREĐIVANJE MOMENTA INERCIJE TURBOAGREGATA****DETERMINATION OF THE MOMENT OF INERTIA OF A UNIT IN A THERMAL POWER PLANT****Žarko Janda, Jasna Dragosavac, Ilija Klasnić, Anita Mijajlović, Milan Đorđević, Igor Damjanac, Miloš Brdarević***

Kratak sadržaj: U konvencionalnoj strukturi elektroenergetskog sistema sinhroni generatori obezbeđuju tranzijentnu i frekvencijsku stabilnost zahvaljujući kinetičkoj energiji obrtnih masa. Povećana penetracija obnovljivih izvora energije i postepeni prelazak na zelenu agendu rezultuju gašenjem postojećih proizvodnih jedinica koje se oslanjaju na fosilna goriva, čime sistem postaje podložniji poremećajima usled nedostatka inercije. Problemi koji se javljaju u sistemu suočenim sa manjkom inercije mogu da izazovu značajan finansijski gubitak, te je jako bitno sagledati koliku inerciju obezbeđuju postojeći agregati u elektranama i odrediti minimalnu kritičnu vrednost inercije kojom sistem treba da raspolaže u svakom trenutku. Za konvencionalne proizvodne jedinice podatak o inerciji generatora jedan je od parametara koji se mogu pronaći u tehničkoj dokumentaciji generatora, ali nije moguće doći do istog podatka za turbine, a naročito za parne turbine. U radu je predstavljen metod za proračun inercije turboagregata na osnovu snimaka zaustavljanja termobloka B1 u TE “Nikola Tesla B”, polazeći od Njutnove jednačine obrtnog kretanja, s ciljem da predloženi proračun doprinese boljem sagledavanju ukupne inercije sistema.

Ključne reči: *moment inercije, generator, parna turbina, Njutnova jednačina*

Abstract: In a conventional power system structure, synchronous generators provide transient and frequency stability due to the kinetic energy of rotating masses. Increased penetration of renewable energy sources and the gradual shift towards the green agenda result in the shutdown of existing power generation units that rely on fossil fuels, making the system more susceptible to disturbances due to a lack of inertia. Problems that arise in a system facing a lack of inertia can lead to significant financial losses, so it is crucial to assess the amount of inertia provided by the existing units in power plants and determine the minimum critical inertia value that the system should always have.

* Žarko Janda, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, zarko.janda@ieent.org
Jasna Dragosavac, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, jasna.dragosavac@ieent.org
Ilija Klasnić, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, ilija.klasnic@ieent.org
Anita Mijajlović, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, anita.mijajlovic@ieent.org
Milan Đorđević, JP Elektroprivreda Srbije, djordjevic.milan@eps.rs
Igor Damjanac, JP Elektroprivreda Srbije, Ogranak TENT B, igor.damjanac@eps.rs
Miloš Brdarević, JP Elektroprivreda Srbije, Ogranak TENT B, milos.brdarevic@eps.rs

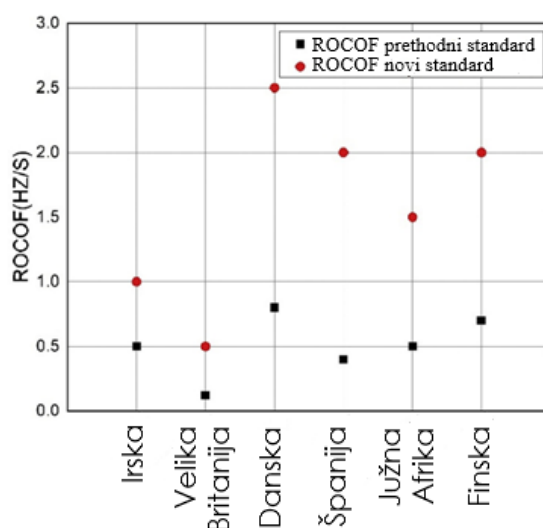
For conventional power generation units, the inertia data of the generator is one of the parameters that can be found in the technical documentation of the generator. However, it is not possible to obtain the same data for turbines, especially for steam turbines. This paper presents a method for calculating the inertia of turbo generators based on the stop recordings of thermal block B1 in the "Nikola Tesla B" power plant, starting from Newton's equation of rotational motion, with the aim of contributing to a better understanding of the overall inertia of the system.

Key words: *moment of inertia, generator, steam turbine, Newton's equation*

1 UVOD

Konvencionalni izvori energije, kakvi su sinhroni generatori, poseduju kinetičku energiju obrtnih masa na kojoj se zasniva stabilnost sistema i njegova otpornost u pogledu nepredviđenih poremećaja. Integracijom obnovljivih izvora energije (OIE), postojeći sistem se decentralizuje i postaje osetljiviji na poremećaje, posebno u pogledu frekvencijske i tranzijentne stabilnosti. Do toga dolazi jer se jedinice obnovljivih izvora energije vezuju na mrežu preko uređaja energetske elektronike, koji ne poseduju ili poseduju jako malu inerciju. Smanjena inercija sistema dovodi do povećanja brzine promene frekvencije (ROCOF - *rate of change of frequency*) pri odskočnoj promeni tereta, koja po dostizanju kritične vrednosti prouzrokuje neželjeno rasterećenje sistema i skraćuje raspoloživo vreme operaterima da pravilno odreaguju na iznenadne disbalanse u sistemu, a koji su naročito prisutni usled promenljivosti i nepredvidljivosti proizvodnje iz OIE. Velika vrednost ROCOF-a može da izazove i druge negativne posledice po sistem, kao što je nepotrebno reagovanje zaštitnih releja [1].

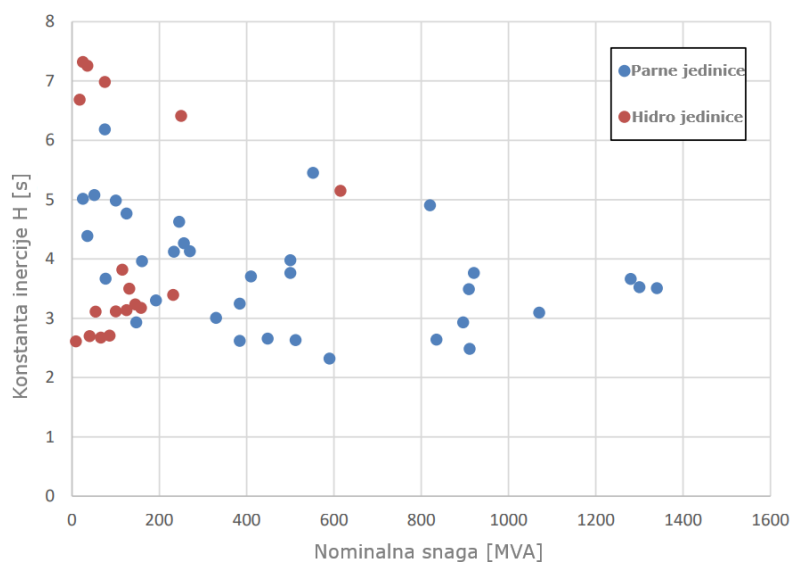
Iz perspektive stabilnosti mreže sa povećanim nivoom integracije OIE proizvodne jedinice moraju se uspešno suočavati sa posledično većom promenom frekvencije. Ova situacija je dovela do uvođenja preciznih zahteva u nekim mrežama. Neke zemlje su značajno spustile pragove reagovanja releja, odnosno podigle dozvoljene vrednosti ROCOF-a za koje releji neće reagovati, kako bi se postigao cilj integracije OIE za 2020. godinu, kao što je prikazano na Slici 1. Na primer, Danska je podigla prihvatljivu vrednost ROCOF-a sa oko 0.8 Hz/s na 2.5 Hz/s [2].



Slika 1: Dozvoljene vrednosti ROCOF-a u pojedinim zemljama sveta [3]

Na osnovu svega pobrojanog očigledan je značaj poznavanja vrednosti inercije delova sistema, jer je, pored poteškoća skladištenja proizvedene energije, nedostatak inercije najveći problem sa kojim se suočavaju sve više prisutni OIE. Odatle je proistekla potreba za uređajima energetske elektronike, kao što je VSG (*virtual synchronous generator*), koji mogu da emuliraju inerciju. Međutim, nije dovoljno ispitano da li na taj način emulirana inercija ima isto dejstvo na sistem kao i inercija koju poseduje sinhroni generator, prilikom kvara na mreži, na primer. Da bi se do tog, ali i sličnih zaključaka došlo, potrebno je poznavati koliku vrednost inercije obezbeđuju postojeći agregati, što nije jednostavno. Za tradicionalne proizvodne jedinice podatak o inerciji generatora jedan je od parametara koji se mogu pronaći u tehničkoj dokumentaciji generatora, ali nije moguće doći do istog podatka za turbine.

Konstante inercije za nekoliko termoelektrana i hidroelektrana različitih nazivnih snaga prikazane su na Slici 2. Uočava se da ne postoji jasna konzistencija u konstantama inercije za određeni tip elektrane ili snagu. Vrednost inercije jedne elektrane je stoga specifična za svaki pojedinačni slučaj i u velikoj meri zavisi od dizajna kako generatora, tako i turbine.



Slika 2: Zavisnost konstante inercije od naznačene snage za različite tipove jedinica [4]

Stabilnost elektroenergetskog sistema se klasifikuje u zavisnosti od promenljive sistema od interesa. Veličine od značaja na osnovu kojih se definiše stabilnost sistema su ugao snage, napon i frekvencija. U [5, 6] pokazano je da ne postoji direktna veza između smanjenja inercije sistema i stabilnosti rotorskog ugla ili napona. Ipak, inercija igra važnu ulogu u stabilnosti sistema po frekvenciji. [7] definiše stabilnost frekvencije kao sposobnost elektroenergetskog sistema da održi stabilnu frekvenciju nakon ozbiljnog poremećaja između proizvodnje i potrošnje. Nestabilnost frekvencije može dovesti do trajnih oscilacija frekvencije koje mogu prouzrokovati isključivanje proizvodnih jedinica ili potrošača ako frekvencija izađe van definisanog opsega ili u slučaju da ROCOF postane prevelik.

Posmatrajući jednu sinhronu mašinu, njena dinamika se može opisati Njutnovom jednačinom obrtnog kretanja, koja je data izrazom (1).

$$2H \frac{df}{dt} = P_m - P_e, \quad (1)$$

gde P_m i P_e označavaju mehaničku i električnu snagu, respektivno, dok f predstavlja frekvenciju na priključcima mašine. Konstanta inercije H u (1) se koristi za kvantitativno određivanje inercije i izražava se u sekundama, jer ukazuje na vreme u sekundama tokom kojeg generator može da obezbedi svoju nominalnu snagu S koristeći isključivo kinetičku energiju (E_{kin}) uskladištenu u obrtnoj masi njegovog pogonskog sklopa.

$$H = \frac{\frac{J \omega_0^2}{2}}{S} = \frac{E_{kin}}{S}, \quad (2)$$

gde je ω_0 nominalna ugaona brzina (rad/s), a J moment inercije [kgm²]. Inercija sinhronne mašine, označena njenom konstantom inercije H , izražava otpornost na promenu frekvencije koja proizilazi iz disbalansa između mehaničke i električne snage [8]. Fotonaponski sistemi i vetroelektrane, izuzimajući vetroturbine sa fiksnom brzinom, ne pružaju nikakvu inerciju zbog energetskih pretvarača koji razdvajaju generator od sistema. Opterećenje u sistemu takođe doprinosi trenutnoj inerciji, ali zanemarivo malo. Stoga se kao prva procena u većini studija elektroenergetskih sistema uzima u obzir samo inercija konvencionalnih elektrana. Cilj rada je da predloži metod za proračun inercije turboagregata i time doprinese boljem sagledavanju ukupne inercije sistema.

Rad je organizovan na sledeći način. U poglavlju 2 predstavljena je metoda proračuna inercije turboagregata, dok su u poglavlju 3 prikazani rezultati njene primene. Izvedeni zaključci i pravci budućih istraživanja predstavljeni su u poglavlju 4.

2 PRORAČUN INERCIJE TURBOAGREGATA

Na raspolaganju su podaci sa pet zaustavljanja termobloka B1 u TE „Nikola Tesla B“, kao i vrednosti parametara generatora:

- $\eta_{75} = 98.63 \%$ stepen iskorišćenja generatora,
- $n_s = 3000$ ob/min naznačena brzina obrtanja,
- $R_{a,20} = 1.079$ mΩ otpor namotaja statora na 20°C,
- $U_{f,n} = 550$ V naznačeni napon rotora,
- $I_{f,n} = 5875$ A naznačena struja rotora,
- $I_n = 20$ kA naznačena struja statora
- $J = 56$ tm² inercija turboagregata.

U analizi dinamike obrtnog kretanja turbogeneratora, posebno u režimu zaustavljanja, ključnu ulogu ima otporni moment koji se suprotstavlja rotaciji rotora. Kočioni moment, označen kao M_k , predstavlja zbir svih momenata otpora koji deluju na rotor mašine i usporavaju njegovo kretanje. Fizički, ovaj moment se može izraziti kao odnos ukupne snage gubitaka P_{gub} i trenutne ugaone brzine ω , prema izrazu:

$$M_k = \frac{P_{gub}}{\omega} \quad (3)$$

U kontekstu zaustavljanja i dinamičkog usporavanja, najznačajniji su upravo oni gubici koji zavise od brzine obrtanja, jer oni stvaraju otpor koji se direktno manifestuje kao otporni moment. Ipak, gubici koji doprinose kočionom momentu nisu svi iste prirode niti isti po zavisnosti od brzine.

Dinamika obrtanja turbogeneratora u režimu zaustavljanja može se iskazati korišćenjem Njutnove jednačine obrtnog kretanja izražene preko momenta inercije turboagregata J [kgm^2]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = -M_k, \quad (4)$$

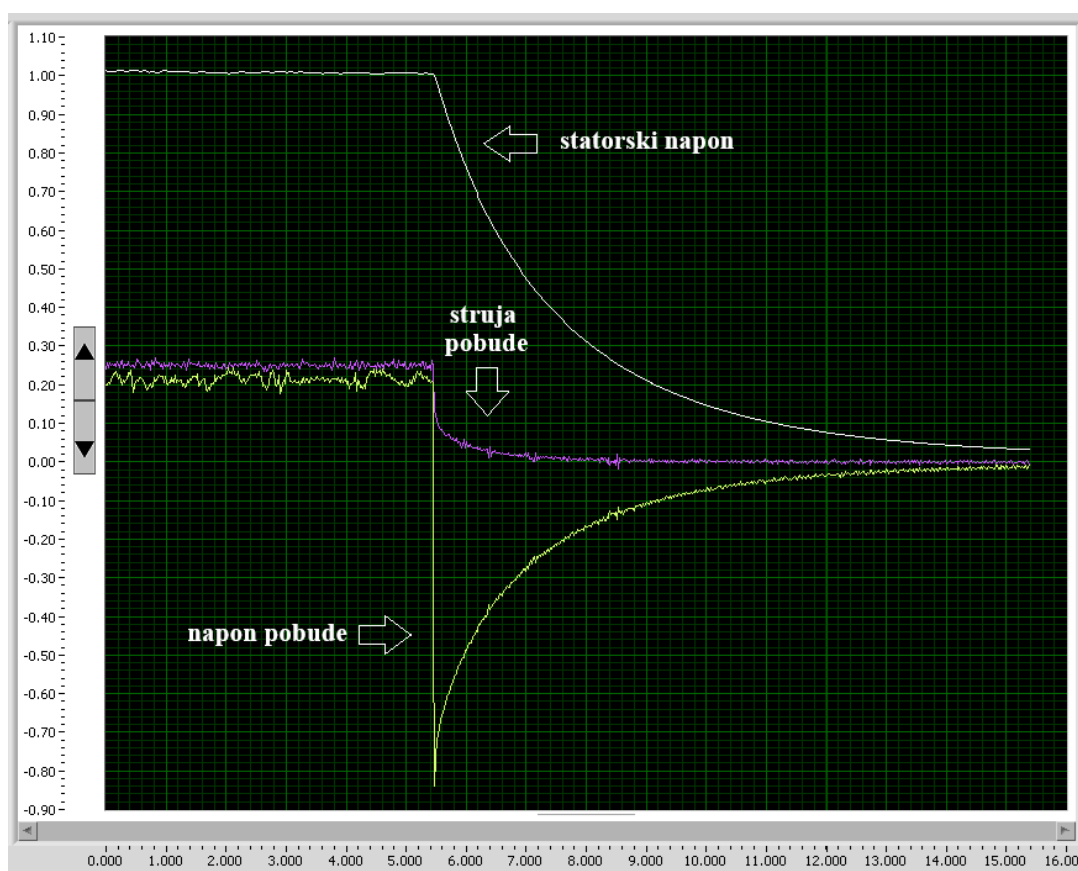
gde je ω [rad/s] ugaona brzina obrtanja. U fazi zaustavljanja, kada je pogonski moment jednak nuli, otporni moment postaje dominantan i izaziva negativno ugaono ubrzanje, tj. usporavanje rotora. Upravo u toj fazi dolazi do izražaja mehanička interpretacija gubitaka kao izvora otpora koji određuje dinamiku zaustavljanja turbogeneratora.

U cilju određivanja inercije turboagregata potrebno je poznavati vrednost gubitaka koji doprinose usporavanju, a pri sinhronoj brzini (ω_{sinhr}) mogu se izraziti uz pomoć (5).

$$P_\gamma(\omega_{sinhr}) = P_{\gamma,turb} + P_{\gamma,lež} + P_{\gamma,vent,gen}, \quad (5)$$

gde su $P_{\gamma,turb}$ unutrašnji mehanički gubici turbine, $P_{\gamma,lež}$ gubici u ležajevima i $P_{\gamma,vent,gen}$ gubici ventilacije generatora. U [9] navodi se da gubici turbine u uskom opsegu rada oko sinhronne brzine iznose 1.5% nominalne snage turbine. Vrednosti snaga gubitaka iz (5) date su u Tabeli 1.

Važno je napomenuti da se pri proračunu inercije posmatra opseg brzina (2500 – 1500) ob/min, gde se na osnovu dijagrama razmagnećenja sa Slike 3 sa sigurnošću može tvrditi da je polje iščezlo, a samim tim i da ne postoje gubici u magnetnom kolu.



Slika 3: Dijagram razmagnećenja generatora u sklopu termobloka B1 u TE "Nikola Tesla"

Tabela 1: Vrednosti snaga gubitaka koji su dominantni prilikom zaustavljanja turboagregata

Snaga gubitaka	Vrednost [MW]
$P_{\gamma,turb}$	9.750
$P_{\gamma,lež}$	1.754
$P_{\gamma,vent,gen}$	1.779
$P_{\gamma}(\omega_{sinhr})$	13.283

Istovremeno, vrednost gubitaka pri određenoj brzini proporcionalna je trećem stepenu te brzine, te se za sinhronu brzinu može izraziti sledećom relacijom:

$$P_{\gamma}(\omega_{sinhr}) = k \cdot \omega_{sinhr}^3, \quad (4)$$

iz koje se dobija vrednost koeficijenta k . Njutnova jednačina (2) sada se može napisati preko poznatog koeficijenta k kao:

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = -k \cdot \omega^2(t). \quad (5)$$

Rešavanjem diferencijalne jednačine prvog reda (5) uz uvažavanje početnog uslova da je brzina neposredno pre zaustavljanja jednaka sinhronoj ($\omega(t = 0) = \omega_{sinhr}$) dobija se da je:

$$\omega(t) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_{sinhr}} + \frac{k}{J}t} \quad (6)$$

U skladu sa mernim jedinicama na graficima brzine zaustavljanja od vremena, relacija (6) može se predstaviti funkcijom oblika (7), uz pomoć parametara a i b , koji su dobijeni kao rezultat fitovanja u softverskom alatu OriginLab 2024 za pet raspoloživih snimaka.

$$n(t) = \frac{1}{a + bt}, \quad (7)$$

gde je n [ob/min] brzina obrtanja generatora.

Kako je usvojeno da koeficijent b bude jednak:

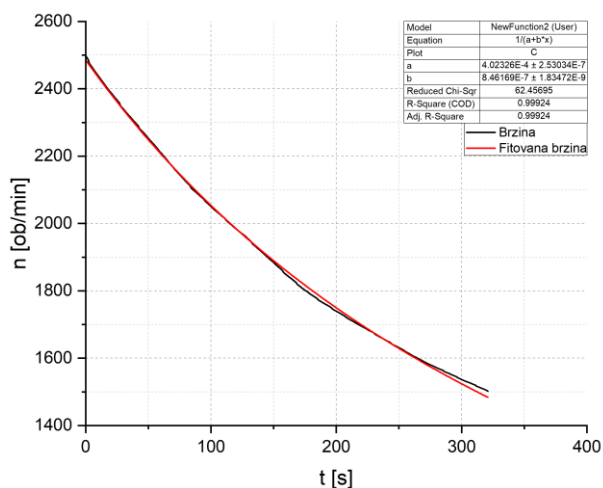
$$b = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{k}{J}, \quad (8)$$

odatle sledi da se moment inercije J računa korišćenjem izraza (9).

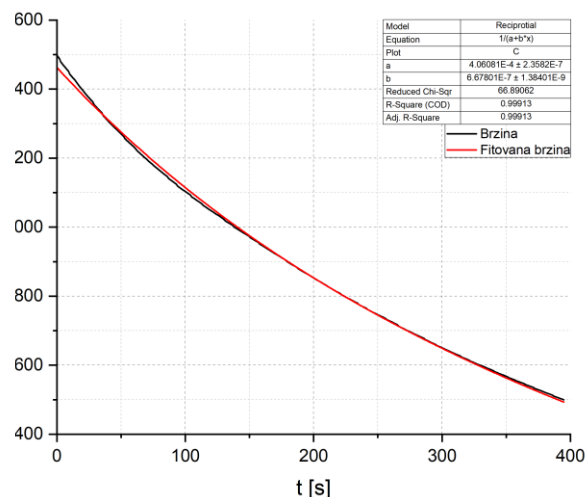
$$J = \frac{\pi \cdot k}{30 \cdot b}. \quad (9)$$

3 REZULTATI

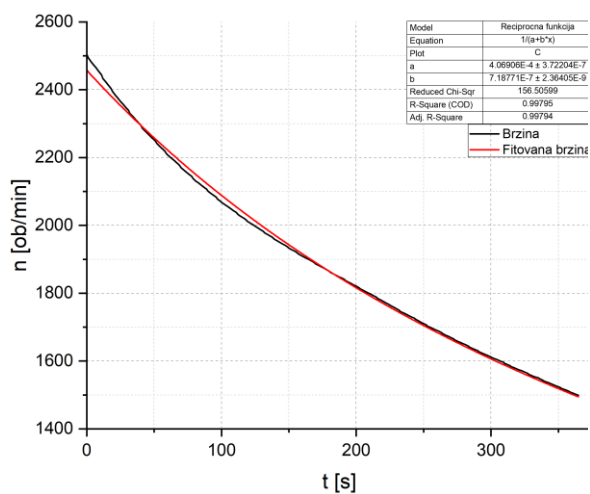
Na Slici 4 prikazana je zavisnost brzine zaustavljanja od vremena za odabrani opseg brzina za pet snimaka zaustavljanja turboagregata, kao i odgovarajuće funkcije fitovanja u softverskom programu Origin. Vrednosti koje su određene za parametar b prikazane su u Tabeli 2.



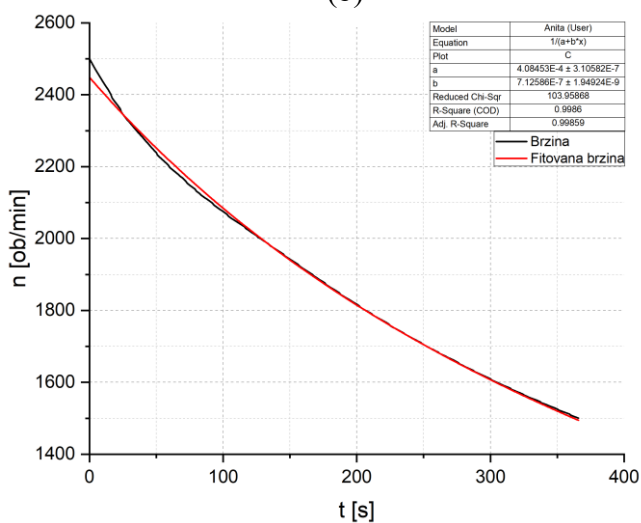
(a)



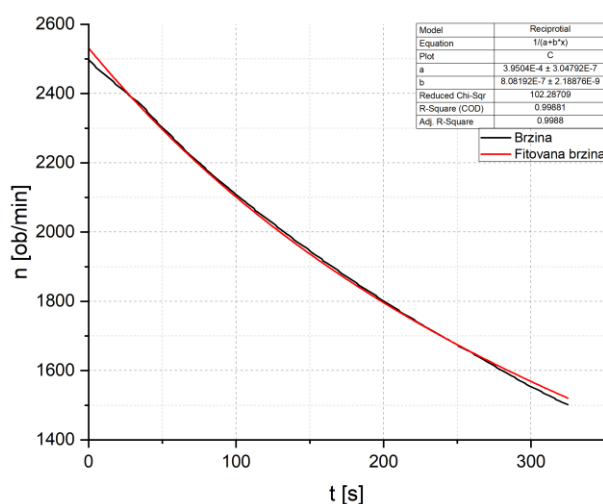
(b)



(v)



(g)



(d)

Slika 4: Rezultati fitovanja funkcije zavisnosti brzine zaustavljanja turboagregata od vremena

Tabela 2: Vrednosti koeficijenta b dobijeni fitovanjem funkcije brzine zaustavljanja turboagregata

Redni broj snimka zaustavljanja	b
1	$8.46169 \text{ e} - 7$
2	$6.67801 \text{ e} - 7$
3	$7.18771 \text{ e} - 7$
4	$7.12586 \text{ e} - 7$
5	$8.08192 \text{ e} - 7$

Uvrštavanjem srednje vrednosti koeficijenta b u izraz (9) za vrednost inercije turboagregata dobija se vrednost $J = 59759 \text{ kgm}^2$.

4 ZAKLJUČAK

Održavanje stabilnosti elektroenergetskog sistema u uslovima smanjene inercije zahteva precizno poznavanje doprinosa pojedinačnih agregata. U ovom radu predstavljen je metod za procenu momenta inercije turboagregata na osnovu snimaka zaustavljanja, koji omogućava uvid u stvarni inercioni doprinos konvencionalnih jedinica. Dobijeni rezultati mogu doprineti definisanju minimalnih zahteva sistema po pitanju inercije i unapređenju modelovanja njegove dinamičke otpornosti. Dalja istraživanja baviće se poboljšanjem ove metode i proširenjem na veći broj agregata, kao i razvojem posebne metode za hidroagregate, kako bi se formirao sveobuhvatan okvir za sagledavanje inercije različitih tipova agregata.

5 LITERATURA

- [1] Kamala Sarojini Ratnam, K. Palanisamy, Guangya Yang, *Future low-inertia power systems: Requirements, issues, and solutions - A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, May 2020.
- [2] Brian Mulhern, *Rate of change of frequency (RoCoF) modification to the grid code*, Common Energy Regul (2014)
- [3] Kamala Sarojini Ratnam, K. Palanisamy, Guangya Yang, *Future low-inertia power systems: Requirements, issues, and solutions - A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews , May 2020.
- [4] Pieter Tielens, Pierre Henneaux and Stijn Cole, *Penetration of renewables and reduction of synchronous inertia in the European power system – Analysis and solutions*, November 2018.
- [5] P. Tielens, *Operation and control of power systems with low synchronous inertia*, KU Leuven, Ph.D. Dissertation, 2017.
- [6] M. Reza, *Stability analysis of transmission systems with high penetration of distributed generation*, TU Delft, Ph.D. Dissertation, 2006.
- [7] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, A. Taylor, T. Van Cutsem and V. Vittal, *Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions*, IEEE transaction on Power Systems, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, 2004.
- [8] Jan Machowski, Zbigniew Lubosny, Janusz W. Bialek, James R. Bumby, *Power System Dynamics Stability and Control*, John Wiley & Sons (2020), 127.
- [9] Bojan Kraut, *Strojarski priručnik*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1988, 231.