

**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU  
ELEKTROTEHNIČKOG FAKULTETA UNIVERZITETA U BEOGRADU**

Na 752. sednici Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, održanoj 4.9.2012. godine, određeni smo za članove Komisije za ocenu uslova i prihvatanje teme doktorske disertacije kandidata mr Predraga Tadića, dipl. inž. elektrotehnike, pod naslovom „Statistička obrada signala za dijagnostiku grešaka i prediktivno održavanje sistema“. Nakon pregleda dobijenog materijala, Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta podnosimo sledeći

**IZVEŠTAJ**

**1. Podaci o kandidatu**

Predrag R. Tadić rođen je 16.11.1980. godine u Beogradu. Osnovnu školu i gimnaziju opšteg smera završio je u Ubu. Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu upisao je 1999. godine, a diplomirao 2005. godine, odbranivši diplomski rad pod naslovom „ $\mu$ -sinteza regulatora za upravljanje temperaturnim procesom“ sa ocenom 10. Tokom studija je ostvario prosečnu ocenu 9,33. Na istom fakultetu je odbranio i magistarski rad pod naslovom „Algoritam kvantizacije govornog signala srpskog jezika“, pod mentorstvom prof. dr Željka Đurovića. U dva navrata, 2009. i 2010. godine, pohađao je kurseve pod nazivima „Model Predictive Control“ i „Cooperative control of multiple autonomous vehicles: mission scenarios, theoretical foundations and practical issues“, u okviru HYCON-EECI Graduate School of Control, koju organizuje European Embedded Control Institute i École Supérieure d'Électricité (Supélec) u Parizu, Francuska.

Na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na Katedri za automatiku, zaposlio se 2007. godine kao asistent pripravnika. U trenutno zvanje asistenta na istoj katedri izabran je 2009. godine. Angažovan je na izvođenju računskih i laboratorijskih vežbi iz predmeta: Signali i sistemi, Praktikum iz softverskih alata, Praktikum iz digitalne obrade signala, Metode soft-computing-a, Obrada i prepoznavanje govora, Optimalno upravljanje sistemima, Programiranje u realnom vremenu, Sistemi automatskog upravljanja, Spektralna analiza signala, Stohastički sistemi i estimacija.

Kandidat je učestvovao u većem broju domaćih naučno-istraživačkih projekata koji se bave upravljanjem i detekcijom/izolacijom grešaka u termoenergetskim postrojenjima, kao i na međunarodnom FP7 projektu pod nazivom „Power Plant Robustification based On fault Detection and Isolation algorithms“ (PRODI). Koautor je većeg broja radova u domaćim časopisima i na domaćim i međunarodnim konferencijama. Iz uže naučne oblasti kojoj pripada predložena doktorska disertacija, kandidat je objavio sledeće radove:

1. Predrag R. Tadić, Miloš S. Stanković, Srdjan S. Stanković, Željko M. Djurović, „An Application of Decentralized Estimation in a Fault Detection Problem“, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 6, No. 3, December 2009, 373-387
2. A. Marjanović, G. Kvaščev, P. Tadić, Ž. Đurović, „Application of predictive maintenance techniques in industrial systems“, Serbian journal of electrical engineering, Vol. 8, No. 3, 2011, pp. 263-279
3. Tadić Predrag, Stanković Srđan, Đurović Željko, Miloš Stanković, „Konsenzus decentralizovana estimacija u problemima detekcije i izolacije otkaza“, Konferencija ETRAN 2009, Vrnjačka Banja
4. Predrag Tadić, Željko Đurović, „Detekcija i izolacija grešaka metodom testiranja hipoteza na osnovu uzorka fiksne veličine“, Konferencija ETRAN 2010, Donji Milanovac
5. Predrag Tadić, Veljko Papić, Željko Đurović, „Smanjenje računске složenosti algoritama za testiranje hipoteza linearnim preslikavanjem mernog vektora“, Konferencija ETRAN 2011, Banja Vrućica (Teslić)

6. Predrag Tadić, Goran Kvaščev, Željko Đurović, „Dijagnoza kvarova senzora u separatoru termoelektrane testom generalizovanog količnika verodostojnosti“, Konferencija ETRAN, 11-14. jun 2012, Zlatibor
7. Predrag Tadić, Miloš Stanković, Srđan Stanković, Željko Đurović, „Consensus Based Decentralized Estimation Applied to Fault Detection and Isolation“, 6th IFAC International Workshop on Knowledge and Technology Transfer in Developing Countries: Automation and Infrastructure, DECOM – TT 2009, September 26-29, 2009, Ohrid, Makedonija
8. Predrag Tadić, Željko Đurović, Goran Kvaščev, Veljko Papić, „Coal-Shortage Detection in Power Plants by Means of a Fixed Size Sample Strategy“, IFAC Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency – IFAC CMTEE 2010, March 29-31, 2010, Vilamoura, Portugal
9. P.R. Tadić, Ž.M. Đurović, G.S. Kvaščev, „Application of a Fixed-Size Sample Hypothesis Testing Algorithm to Leakage Diagnosis in a Three-Tank System“, X Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, November 10-12, 2010, Niš, Serbia
10. Goran Kvascev, Predrag Tadic, Zeljko Djurovic, „An Application of Model Based Fault Detection in Power Plants“, Proceedings of the 8th ACD 2010 European Workshop on Advanced Control and Diagnosis, pp. 130-134, 18-19 November, 2010, Ferrara, Italy
11. Predrag Tadić, Željko Đurović, Branko Kovačević, Veljko Papić, „Data Preprocessing Method for Simplifying the Application of Change Detection Algorithms“, 9th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis (ACD 2011), November 17-18, Budapest, Hungary
12. Aleksandra Lj. Marjanović, Željko M. Đurović, Goran S. Kvaščev, Predrag R. Tadić, „Fault Detection and Isolation in Steam Separator System Using Hidden Markov Models“, Proceedings of the 9th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis (ACD 2011), 17-18 November 2011, Budapest, Hungary
13. Predrag Tadić, Željko Đurović, Branko Kovačević, Veljko Papić, „Fault Diagnosis for Steam Separators Based on Parameter Identification and CUSUM Classification“, IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT2012), Athens, 2012

Iz svega navedenog, zaključujemo da je kandidat podoban za rad na predloženoj temi.

## 2. Predmet i cilj istraživanja

Predmet istraživanja predložene doktorske disertacije jeste analiza postojećih i razvoj novih metoda za dijagnostiku grešaka i prediktivno održavanje sistema, zasnovanih na tehnikama statističke obrade signala. Većina postojećih metoda za dijagnostiku grešaka može se svrstati u jednu od dve grupe: prvu čine tehnike zasnovane na *kvantitativnim* matematičkim modelima (f-je prenosa, vremenske serije, linearni i nelinearni modeli u prostoru stanja) nadziranog sistema, a drugu – pristupi u kojima se polazi od *kvalitativnih* modela (u vidu arhiviranih merenja relevantnih fizičkih veličina u raznim režimima rada) i primenjuju metode obrade signala i veštačke inteligencije<sup>[1][2][3][4][5]</sup>. Ukoliko je dostupan matematički model sistema, najčešće se koriste metode zasnovane na modelima, s obzirom na njihovu matematičku rigoroznost. Sa druge strane, metode

<sup>1</sup> S. Ding, *Model-based fault diagnosis techniques*, Springer 2008

<sup>2</sup> J. Gertler, *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*, Marcel Dekker 1998

<sup>3</sup> A. Willsky, „A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems,“ *Automatica*, vol. 2, no. 6, pp. 601–611, 1976

<sup>4</sup> R. Isermann, „Model-based fault detection and diagnosis - status and applications,“ *Annual Reviews in Control*, vol. 29, no. 1, pp. 71–85, 2005

<sup>5</sup> P. Frank, „Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-based Redundancy - A Survey and Some New Results,“ *Automatica*, vol. 26, no. 3, pp. 459–474, 1990

zasnovane na obradi signala najčešće su heurističke prirode, ali predstavljaju jedinu mogućnost u situacijama u kojima model nije dostupan, ili je njegova identifikacija isuviše zahtevna.

Metode zasnovane na kvantitativnim modelima su veoma dobro obrađene u postojećoj literaturi<sup>[6][7][8]</sup>. Osnovne tehnike koje se u njima upotrebljavaju jesu paritetne relacije, opserveri sa nepoznatim ulazima, Kalmanovi filtri, i identifikacija parametara. Sve one uglavnom podrazumevaju postojanje linearnog modela procesa. Situacije u kojima su modeli nelinearni su znatno složenije, i samim tim ređe razmatrane. Sekvencijalne Monte Karlo metode (SMK), koje se nekada nazivaju i čestičnim filtrima (engl. particle filters), pokazale su se kao veoma efikasnim u slučajevima kada model procesa nije linearan i/ili ukoliko šumovi koji napadaju proces nisu normalno raspodeljeni<sup>[9]</sup>. Kako su SMK metode razvijane prevashodno u kontekstu estimacije, njihova primena u dijagnostici grešaka i prediktivnom održavanju predstavlja oblast koja je i dalje u razvoju<sup>[10][11][12][13][14][15][16][17]</sup>, i činiće prvi pravac istraživanja u okviru predložene disertacije.

Jedan od matematičkih osnova u pristupima zasnovanim na obradi signala jeste teorija testiranja hipoteza, gde se greške modeluju kao promene u relevantnim parametrima nekih pogodno odabranih slučajnih procesa<sup>[18][19][20]</sup>. Sa stanovišta upotrebljivosti u realnim problemima, kao naročito moćan alat nameće se test generalizovanog količnika verodostojnosti (GKV)<sup>[21]</sup>. Drugi zadatak koji će biti razmatran u okviru predložene disertacije jeste kombinacija metoda testiranja hipoteza sa sekvencijalnim Monte Karlo metodama, u cilju dobijanja brzih i robusnih algoritama za dijagnostiku grešaka.

Od suštinskog značaja za prediktivno održavanje, pored dijagnostike grešaka, jesu i tehnike prognoze njihovog vremenskog, koje treba da predvide preostali životni vek komponente u kojoj je greška nastala. Kao

---

<sup>6</sup> R. Isermann, „Model-based fault detection and diagnosis - status and applications,” *Annual Reviews in Control*, vol. 29, no. 1, pp. 71–85, 2005

<sup>7</sup> J. Gertler, „Survey of Model-based Failure Detection and Isolation in Complex Plants,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 8, no. 6, pp. 3–11, 1988

<sup>8</sup> S. Simani, C. Fantuzzi, R. Patton, *Model-Based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification Techniques*, Springer 2003

<sup>9</sup> A. Doucet and A. Johansen, *A tutorial on particle filtering and smoothing: fifteen years later*, Oxford University Press 2008

<sup>10</sup> V. Kadirkamanathan, P. Li, M. Jaward and S. Fabri, „Particle Filtering-based Fault Detection in Nonlinear Stochastic Systems,” *International Journal of Systems Science*, vol. 33, no. 4, pp. 259–265, 2002

<sup>11</sup> W. Wang, L. Li, D. Zhou and K. Liu, „Robust State Estimation and Fault Diagnosis for Uncertain Hybrid Nonlinear Systems,” *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 2–15, 2007

<sup>12</sup> S. Tafazoli and X. Sun, „Hybrid System State Tracking and Fault Detection Using Particle Filters,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 14, no. 6, pp. 1078–1087, 2006

<sup>13</sup> P. Li and V. Kadirkamanathan, „Particle Filtering Based Likelihood Ratio Approach to Fault Diagnosis in Nonlinear Stochastic Systems,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, vol. 31, no. 3, pp. 337–343, 2001

<sup>14</sup> S. Thrun, J. Langford V. Verma, „Risk Sensitive Particle Filters,” *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 2, pp. 961–968, 2002

<sup>15</sup> N. de Freitas, „Rao-Blackwellised Particle Filtering for Fault Diagnosis,” *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2002

<sup>16</sup> R. Morales-Menendez, N. de Freitas, D. Poole, „Real-Time Monitoring of Complex Industrial Processes with Particle Filters,” *Proceedings of the Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS)*, 2002

<sup>17</sup> Q. Zhang, F. Campillo, F. Cerou and F. Legland, „Nonlinear System Fault Detection and Isolation Based on Bootstrap Particle Filters,” *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC'05)*, 2005

<sup>18</sup> M. Basseville and I. Nikiforov, *Detection of abrupt changes: theory and application*, Prentice Hall 1993

<sup>19</sup> I. Nikiforov, „A Simple Recursive Algorithm for Diagnosis of Abrupt Changes in Random Signals,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 7, pp. 2740–2746, 2000

<sup>20</sup> T. Lai, „Sequential Multiple Hypothesis Testing and Efficient Fault Detection–Isolation in Stochastic Systems,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 595–608, 2000

<sup>21</sup> A. Willsky and H. Jones, „A Generalized Likelihood Ratio Approach to the Detection and Estimation of Jumps in Linear Systems,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 21, no. 1, pp. 108–112, 1976

i kod tehnika dijagnostike, najpouzdanije i najpreciznije metode za prognozu zasnivaju se na postojanju fizičkog modela koji opisuje vremensku evoluciju kvara u zavisnosti od trenutnog stanja sistema, i spoljašnjih i unutrašnjih faktora koji na njega deluju<sup>[22]</sup>. Ovakvi modeli dostupni su u relativno malom broju praktičnih slučajeva, jer njihov razvoj zahteva veliki inženjerski napor, pa se nameću pristupi zasnovani na teoriji verovatnoće, u kojima se veličine od interesa predstavljaju slučajnim promenljivama. Kao i u slučaju dijagnostike grešaka, primena sekvencijalnih Monte Karlo metoda (SMK) je jedan od moćnijih alata za prognozu<sup>[23]</sup>. Ukoliko se poseduje model koji opisuje faktore koji utiču na evoluciju greške, onda se rekurzivnom bajesovskom estimacijom može doći do procene raspodele verovatnoće veličine greške, odnosno njene funkcije gustine verovatnoće. Osim toga, moguće je propagirati trenutnu procenu stanja sistema kroz model evolucije greške, kako bi se predvidelo njeno buduće ponašanje. S obzirom da se raspolaze procenom raspodele verovatnoće, lako se mogu generisati i intervali poverenja za dobijene procene. Primena SMK metoda u prognozi grešaka predstavljaće treću istraživačku oblast u okviru predložene disertacije.

### 3. Polazne hipoteze

Statističke metode podrazumevaju predstavu relevantnih veličina kao slučajnih promenljivih ili slučajnih procesa. Osnovni alati za modelovanje ponašanja ovakvih veličina su funkcije gustine verovatnoće, autokorelacione f-je, spektralne gustine snage, linearni modeli pobuđeni belim slučajnim procesima i Markovljevi modeli.

Primena sekvencijalnih Monte Karlo (SMK) metoda podrazumeva opis posmatranog procesa Markovljevim modelom u prostoru stanja. Ovakvi modeli su izuzetno opšti, i u stanju su da opišu veliki broj procesa koji se susreću u praksi. Za razliku od većine metoda za dijagnozu i prognozu, kod SMK metoda model u prostoru stanja ne mora biti linearan, a šumovi koji u njemu figurišu ne moraju biti gausovski raspodeljeni.

Metode za testiranje hipoteza u najopštijem slučaju podrazumevaju da se proces može predstaviti pomoću uslovnih verovatnoća raspodele budućih opservacija, pod pretpostavkom da su poznate njihove prethodne vrednosti. Na nastanak greške ukazuju specifične promene u nekom od parametara ovih raspodela. Tehnike detektovanja ovih promena najvećim delom se zasnivaju na primeni testa količnika verodostojnosti.

### 4. Naučne metode istraživanja

Osnovni kriterijumi za poređenje metoda za dijagnozu grešaka su kašnjenje detekcije i srednje vreme između lažnih alarma. Standardni pristup zasniva se na zadavanju granice za jedan od kriterijuma (najčešće se postavlja minimalno srednje vreme između lažnih alarma), i uslovnoj minimizaciji drugog.

Drugi aspekt poređenja metoda za dijagnozu grešaka podrazumeva analizu njihove numeričke složenosti. U literaturi je dostupan veliki broj algoritama za testiranje hipoteza koji su optimalni po raznim kriterijuma, ali su izuzetno komplikovani za implementaciju. Od velikog praktičnog interesa je razvoj suboptimalnih ali jednostavnijih algoritama, koji bi mogli da se implementiraju na standardnim upravljačkim računarskim sistemima.

Poređenje metoda predikcije je znatno složeniji zadatak, jer trenutno ne postoje opšte prihvaćeni pokazatelji kvaliteta njihovih performansi. Osnovni zahtevi koji se pred ove algoritme postavljaju jesu što duži horizont predikcije, i što uži interval poverenja.

---

<sup>22</sup> G. Vachtsevanos, F. Lewis, M. Roemer, A. Hess and B. Wu, *Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems Methods and Case Studies*, John Wiley 2007

<sup>23</sup> M. Orchard and G. Vachtsevanos, „A Particle Filtering-based Framework for Real-time Fault Diagnosis and Failure Prognosis in a Turbine Engine,” *Proceedings of the Mediterranean Conference on Control & Automation (MED'07)*, 2007

Statistička obrada signala podrazumeva obuku algoritama na osnovu arhivskih podataka. U okviru predloženog istraživanja biće korišćeni podaci koji su u okviru domaćih naučnih projekata prikupljeni sa realnih procesa, prevashodno sa raznih podsistema termoelektrana. Ovi podaci biće korišćeni i za validaciju predloženih algoritama kroz računarske simulacije, pa će ona biti obavljena u uslovima koji u velikoj meri odgovaraju realnim aplikacijama.

## 5. Očekivani naučni doprinosi

Kao rezultat rada na doktorskoj disertaciji, očekivani su sledeći naučni doprinosi:

- Sistemizacija pristupa dostupnih u literaturi koji se pod različitim terminima (detekcija naglih promena, detekcija otkaza, prediktivno održavanje, itd) bave istim problemom, a to je statistička obrada dostupnih, merljivih signala, u cilju prepoznavanja neželjenih promena u samom nadgledanom procesu ili njegovom okruženju. Osim ove sistemizacije, biće izvršena iscrpna analiza ovih tehnika sa stanovišta efikasnosti u detekciji otkaza i njihove primenljivosti u industrijskoj praksi.
- Razvoj novih tehnika za detekciju otkaza baziranih na statističkoj obradi signala, inspirisanih zahtevima i uslovima iz industrijske praksi. Kako predstavljaju najznačajnije doprinose koji treba da proizađu iz predloženog istraživanja, detaljnije su razrađeni u nastavku.
  - *Analiza uticaja korelisanosti odbiraka merenih veličina na performanse algoritama za dijagnostiku grešaka.* Većina postojećih metoda pretpostavlja da se merene promenljive mogu modelovati *belim* slučajnim procesima. Međutim, iskustva iz prakse pokazuju da je u najvećem broju slučajeva stepen korelisanosti izuzetno visok. Otuda su aproksimacije uvedene navedenim pretpostavkama veoma grube i neprecizne. Modifikacija postojećih metoda za dijagnostiku grešaka, u smislu uvažavanja obojenosti mernog procesa, trebala bi da rezultuje poboljšanjem njihovih performansi, i biće jedan od doprinosa predloženog istraživanja.
  - *Analiza uticaja negausovskih raspodela šumova na performanse algoritama za dijagnostiku grešaka.* Iako je pretpostavka o normalnoj raspodeli šuma je opravdana u mnogim slučajevima, postoje brojne aplikacije kod kojih ona ne odgovara realnosti, ali se ipak zadržava zarad jednostavnijih matematičkih izvođenja. Razvoj algoritama zasnovanih na sekvencijalnim Monte Karlo metodama, u kojima će statistike šumova biti preciznije modelovane, biće jedan od doprinosa predloženog istraživanja.
  - *Razvoj procedura za podešavanje parametara razvijenih algoritama.* Teorijska analiza performansi statističkih metoda najveću pažnju poklanja verovatnoćama lažnih alarma i propuštenih detekcija. Sa praktične tačke gledišta, podjednako su važni vremenski parametri kašnjenja detekcije i srednjeg vremena između lažnih alarma. Korisnicima (operatorima nadgledanih procesa) je potrebno pružiti mogućnost da podešavaju performanse algoritama, kroz postizanje kompromisa među pokazateljima koji imaju jasno intuitivno značenje. Otuda će razvoj procedura za podešavanje parametara biti jedan od značajnih doprinosa istraživanja.
- Posebno značajnim doprinosom se smatra verifikacija razvijenih tehnika u smislu njihove primene na realnim industrijskim procesima. U skladu sa mogućnostima, biće izabran neki od podsistema termoelektričnih blokova i na njemu ilustrovana mogućnost primene razvijenih tehnika.

## 6. Plan istraživanja i struktura rada

Istraživanje na izradi predložene disertacije će se sastojati iz analize postojećih i formulaciji novih algoritama za detekciju, izolaciju i prognozu razvoja grešaka, teoretskoj analizi očekivanih performansi predloženih algoritama, i računarskih simulacija koje bi trebalo da potvrde teoretske analize, i da pokažu poboljšanje u

performansama predloženih u odnosu na postojeće algoritme. U skladu sa tim, rad bi trebao da sadrži tri glavne strukturne celine:

- sistematizacija postojećih metoda za dijagnostiku i prognozu zasnovanih na sekvencijalnim Monte Karlo metodama, testiranju hipoteza, i drugim tehnikama statističke obrade signala, i njihova analiza sa stanovišta mogućnosti primene u praktičnim problemima;
- razvoj novih metoda za dijagnostiku kvarova i prognozu njihove propagacije korišćenjem sekvencijalnih Monte Karlo metoda i testiranja hipoteza, sa osnovnim ciljem razvoja algoritama koji će uzeti u obzir statističke osobenosti merne populacije realnih industrijskih procesa;
- verifikacija predloženih algoritama kroz simulacije, uz korišćenje dostupnih realnih arhivskih podataka.

## **7. Zaključak i predlog**

Na osnovu izloženog, Komisija konstatuje da kandidat ispunjava sve formalne i suštinske uslove za pristupanje izradi doktorske disertacije, kao i da je predložena tema naučno aktuelna i od praktičnog značaja za oblast dijagnostike kvarova i prediktivnog održavanja sistema. Komisija stoga predlaže Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu da kandidatu mr Predragu Tadiću odobri izradu doktorske disertacije pod nazivom "Statistička obrada signala za dijagnostiku grešaka i prediktivno održavanje sistema".

Članovi komisije:

---

dr Željko Đurović, redovni profesor, mentor  
Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

---

dr Branko Kovačević, redovni profesor  
Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

---

dr Vladimir Stevanović, redovni profesor  
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu