



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Milena Petković

**PROJEKTOVANJE, RAZVOJ I
IMPLEMENTACIJA
EKSPERTSKOG SISTEMA ZA
BRZU DETEKCIJU I IZOLACIJU
NEŽELJENIH STANJA
DINAMIČKIH SISTEMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: dr Zoran Jeličić

Novi Sad, 2015.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР :		
Идентификациони број, ИБР :		
Тип документације, ТД :		
Тип записа, ТЗ :		
Врста рада, ВР :	Докторска дисертација	
Аутор, АУ :	Милена Петковић	
Ментор, МН :	проф. др Зоран Јеличић	
Наслов рада, НР :	Пројектовање, развој и имплементација експертског система за брзу детекцију и изолацију нежељених стања динамичких система	
Језик публикације, ЈП :	српски	
Језик извода, ЈИ :	српски	
Земља публикавања, ЗП :	Србија	
Уже географско подручје, УГП :		
Година, ГО :	2015.	
Издавач, ИЗ :		
Место и адреса, МА :		
Физички опис рада, ФО : (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	7 поглавља, 125 страна, 78 цитата, 3 табеле, 51 слика	
Научна област, НО :	Електротехничко и рачунарско инжењерство	
Научна дисциплина, НД :	Аутоматика и управљање системима	
Предметна одредница/Кључне речи, ПО :	Детекција и изолација нежељених стања, дијагностика кварова, прилагодљиво груписање и разврставање података, експертски системи	
УДК		
Чува се, ЧУ :	Библиотека Факултета техничких наука, Универзитета у Новом Саду, Нови Сад	
Важна напомена, ВН :		
Извод, ИЗ :	Рад је посвећен проблему ране и брзе детекције и изолације нежељених стања динамичких система, са посебним нагласком на рано откривање различитих неправилности у раду и кварова индустријских процеса.	
Датум прихватања теме, ДП :	11. септембар 2014.	
Датум одбране, ДО :		
Чланови комисије, КО :	Председник: проф. др Бранко Ковачевић	Потпис ментора
	Члан: проф. др Филип Кулић	
	Члан: др Дубравка Бојанић, доцент	
	Члан: др Милан Рапаић, доцент	
	Члан, ментор: проф. др Зоран Јеличић	



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	
Type of record, TR :	
Contents code, CC :	
Author, AU :	Milena Petković
Mentor, MN :	prof. dr Zoran Jeličić
Title, TI :	
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	
Publication year, PY :	2015
Publisher, PB :	
Publication place, PP :	
Physical description, PD : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	7 chapters, 125 pages, 78 references, 3 tables, 51 pictures
Scientific field, SF :	Electrical and computing engineering
Scientific discipline, SD :	Automation and Control Systems
Subject/Key words, S/KW :	Fault detection and isolation, fault diagnosis, adaptive clustering algorithms, expert systems
UC	
Holding data, HD :	Library of Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	The thesis is dedicated to the problem of early and swift detection and isolation of unwanted working regimes of dynamical systems, with particular emphasis on the early detection of various irregularities and failures of industrial processes.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	September 11 th , 2014
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	
President:	prof. dr Branko Kovačević
Member:	prof. dr Filip Kulić
Member:	dr Dubravka Bojanić, assistant professor
Member:	dr Milan Rapačić, assistant professor
Member, Mentor:	prof. dr Zoran Jeličić
	Mentor's sign

Fabvalnica

Sadržaj

Spisak slika	4
Spisak tabela	6
1. Uvod.....	1
2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema	5
2.1. Detekcija i izolacija neželjenih stanja dinamičkih sistema	5
2.2. Osnovni pojmovi detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema	8
2.3. Transformacija procesnih veličina u sistemima za dijagnostiku kvarova	18
2.4. Praćenje i nadzor dinamičkih sistema	20
2.5. Pregled metoda za detekciju i izolaciju kvarova	24
3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu	32
3.1. Pojam informacionog potencijala	33
3.2. Opis postupka	44
3.2.1 Inicijalizacija baze znanja	44
3.2.2 Klasifikacija sa statičnom bazom znanja	46
3.2.3 Prilagodljiva baza znanja	47
4. Prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju neželjenih stanja dinamičkih sistema	52
4.1 Projektovanje prilagodljivog ekspertskog sistema zasnovanog na PBRC algoritmu.....	53
4.1.1. Generisanje vektora svojstava	55
4.1.2. Estimacija parametara . Kalmanov filter	55
4.2 Implementacija ekspertskog sistema.....	63

4.1.3.	Korisnički interfejs.....	64
4.1.4.	Kratak prikaz aplikacije za testiranje.....	65
4.1.5.	Elementi ekspertskog sistema.....	66
5.	Eksperimentalna verifikacija	68
5.1.	Primer praćenja radnih stanja pilot-postrojenja za regulaciju pritiska.....	68
5.1.1.	Prvi eksperiment	70
5.1.2.	Drugi eksperiment.....	74
5.1.	Primer praćenja radnih stanja pilot-postrojenja za regulaciju nivoa i protoka	78
6.	Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa	83
6.1.	Primer nestanka napajanja na ventilu	84
6.2.	Primer praćenja promene parametara procesa desolventizacije u fabrici za preradu ulja..	87
6.2.1.	Opis opreme i funkcionisanje dela sistema za ekstrakciju fabrike za preradu ulja.....	87
6.2.2.	Opis problema.....	92
6.2.3.	Rešenje problema	93
6.3.	Primer praćenja promene parametara procesa mlevenja uglja u Termoelektrani Kostolac B	99
6.3.1.	Opis podistema termoelektrane Kostolac B- Krug čvrstog goriva.....	99
6.3.2.	Opis problema.....	108
6.3.3.	Rešenje problema	109
7.	Zaključak.....	115
	Bibliografija	117
	Biografija autora	123

Spisak slika

<i>Slika 1. Uprošćena shema sistema automatskog upravljanja dva povezana procesa</i>	9
<i>Slika 2. Odnos kvara, otkaza i neispravnosti sistema</i>	11
<i>Slika 3. Shema sistema automatskog upravljanja</i>	12
<i>Slika 4. Transformacije merenja iz procesa u okviru sistema za dijagnozu kvarova</i>	18
<i>Slika 5. Shema procesa u kome postoji kvar</i>	20
<i>Slika 6. Promena parametara procesa, ulaznih i izlaznih signala nakon pojave kvara a) u otvorenoj sprezi b) u zatvorenoj povratnoj sprezi</i>	21
<i>Slika 7. Pregled metoda za detekciju kvarova</i>	24
<i>Slika 8. Opšta struktura baze znanja prilagodljivog algoritma</i>	45
<i>Slika 9. Blok dijagram prilagodljivog algoritma za klasifikaciju</i>	49
<i>Slika 10. Pseudo kod PBRC algoritma</i>	50
<i>Slika 11. Rezultati grupisanja i razvrstavanja podataka sa različitim vrednostima d_{min}. Levo $d_{min}=0.7$, levo $d_{min}=0.35$</i>	51
<i>Slika 12. Opšta struktura prilagodljivog ekspertskog sistema za brzu detekciju i izolaciju neželjenih stanja dinamičkih sistema</i>	53
<i>Slika 13. Prikaz dela korisničkog interfejsa koji služi za praćenje postupka grupisanja radnih režima</i>	65
<i>Slika 14. Korisnički interfejs aplikacije za testiranje algoritama</i>	66
<i>Slika 15. Shematski prikaz arhitekture ekspertskog sistema</i>	67
<i>Slika 16. Laboratorijsko postrojenje za regulaciju pritiska</i>	69
<i>Slika 17. Ulazni i izlazni podaci iz procesa. Rezervoar je otvoren između dve vertikalne isprekidane linije</i>	70
<i>Slika 18. Estimirane vrednosti parametara procesa. Izlazi Kalmanovog filtera</i>	71

<i>Slika 19. Recipročna vrednost ponderisanog informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava.....</i>	<i>72</i>
<i>Slika 20. Recipročna vrednost ponderisanih informacionih potencijala čvorova.....</i>	<i>73</i>
<i>Slika 21. Indeks trenutno aktivnog čvora.....</i>	<i>73</i>
<i>Slika 22. Ulazni i izlazni podaci snimljeni tokom eksperimenta. Vertikalne linije prikazuju promenu radnog stanja procesa. Slova iznad grafika označavaju rasno stanje: O- otvoren rezervoar, Z- zatvoren rezervoar</i>	<i>75</i>
<i>Slika 23. Izlazi iz Kalmanovog filtra, odnosno estimirane vrednosti parametrara modela drugog reda. Vertikalne linije prikazuju promenu radnog stanja procesa. Slova iznad grafika označavaju radno stanje: O- otvoren rezervoar, Z- zatvoren rezervoar</i>	<i>76</i>
<i>Slika 24. Izlaz iz ekspertskeg sistema. Ukupan broj čvorova i indeks tekućeg aktivnog čvora</i>	<i>77</i>
<i>Slika 25. Pilot-postorjenje za upravljanje nivoom i protokom PROCON 38-100.....</i>	<i>78</i>
<i>Slika 26. Ulazni i izlazni podaci snimljeni tokom eksperimenta. Vertikalne linije prikazuju promenu radnog stanja procesa.</i>	<i>79</i>
<i>Slika 27. Izlaz iz Kalmanovog filtra. Estimirane vrednosti parametara modela prvog reda ..</i>	<i>80</i>
<i>Slika 28. Recipročna vrednost informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava.....</i>	<i>80</i>
<i>Slika 29. Ukupan broj čvorova i indeks aktivnog čvora</i>	<i>81</i>
<i>Slika 30. Ulazni i izlazni signali posmatranog procesa.....</i>	<i>84</i>
<i>Slika 31. Izlaz iz Kalmanovog filtra. Estimirane vrednosti parametara modela prvog reda ..</i>	<i>85</i>
<i>Slika 32. Recipročna vrednost ponderisanog informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava.....</i>	<i>86</i>
<i>Slika 33. Recipročna vrednost ponderisanih informacionih potencijala čvorova.....</i>	<i>86</i>
<i>Slika 34. Ukupan broj čvorova i indeks aktivnog čvora</i>	<i>87</i>
<i>Slika 35. Deo operatorskog ekrana podsistema za ekstrakciju. Sa desne strane prikazan je Desolventizer (toster).....</i>	<i>88</i>
<i>Slika 36. Kraci za mešanje na podu #4.....</i>	<i>90</i>
<i>Slika 37. Sita i krak za mešanje u podu za stripovanje.....</i>	<i>90</i>
<i>Slika 38. Ulazni levak kroz koji materijal ulazi u toster</i>	<i>91</i>
<i>Slika 39. Izlaz procesa. Temperatura mešavine heksana i pare na izlazu iz desolventizera ...</i>	<i>94</i>
<i>Slika 40. Izlazni i ulazni signali procesa. Temperatura mešavine heksana i pare na izlazu iz desolventizera označena je cvenom bojom, brzina dozatora plavom a struja mešalice zelenom bojom.....</i>	<i>94</i>
<i>Slika 41. Estimirane vrednosti parametara procesa. Izlaz Kalmanovog filtera.....</i>	<i>95</i>
<i>Slika 42. Recipročna vrednost ponderisanog informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava.....</i>	<i>96</i>
<i>Slika 43. Recipročna vrednost ponderisanih informacionih potencijala čvorova.....</i>	<i>97</i>
<i>Slika 44. Ukupan broj čvorova i indeks trenutno aktivnog čvora.....</i>	<i>98</i>
<i>Slika 45. Šema mlinskog kruga</i>	<i>103</i>
<i>Slika 46. Prikaz jednog ekrana nadzorno upravljačkog softvera koji je deo mlinskog kruga</i>	<i>108</i>
<i>Slika 47. Temperatura aerosmeše.....</i>	<i>110</i>
<i>Slika 48. Ulazni i izlazni podaci prikupljeni snimanjem podataka mlinskog kruga u TE-KO Kostolac</i>	<i>110</i>
<i>Slika 49. Estimirane vrednosti parametara procesa. Izlaz Kalmanovog filtera.....</i>	<i>111</i>
<i>Slika 50. Recipročna vrednost ponderisanog informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava.....</i>	<i>112</i>
<i>Slika 51. Recipročna vrednost ponderisanih informacionih potencijala čvorova.....</i>	<i>113</i>
<i>Slika 52. Ukupan broj klastera i indeks trenutno aktivnog čvora.....</i>	<i>114</i>

Spisak tabela

<i>Tabela 1. Raspored radnih režima u eksperimentu</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 2. Linearni modeli (radna stanja) koje na izlazu daje predloženi ekspertski sistem ..</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 3. Linearni modeli prvog reda (radna stanja) koje na izlazu daje predloženi ekspertski sistem.....</i>	<i>82</i>

1. Uvod

Ova disertacija je rezultat višegodišnjeg naučno-istraživačkog rada autora na problemima optimizacije, optimalnog upravljanja i primene teorije optimizacije u sistemima automatskog upravljanja [1,2,3,4,5,6,7]. Prema autorovim najboljim saznanjima, imajući u vidu dostupnu naučnu literaturu, predložene ideje i algoritmi predstavljaju originalni doprinos teoriji detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema. Ključni rezultati disertacije su naučno-stručno verifikovani i publikovani u međunarodnim časopisima [3,4] i predstavljeni na međunarodnim konferencijama [8,9].

Centralni deo rada je posvećen jednom originalnom algoritmu za prilagodljivo grupisanje i razvrstavanje podataka u sklopu rane i brze detekcije kvarova. Prikazani algoritam pod engleskim akronimom PBRC (Potential Based Recursive Clustering), karakterišu dva osnovna svojstva: sposobnost automatskog proširivanja skupa klastera u odnosu na koje se vrši grupisanje i relativno jednostavna mogućnost implementacije u uslovima koji zahtevaju efikasno izračunavanje i malu potrošnju memorije, tj. uslovima koje nameće rad u realnom vremenu. Podatke koji se klasifikuju algoritam zahteva sekvencijalno, jedan-po-jedan, a u svom radu ne zahteva postojanje objedinjene baze podataka koja bi čuvala kompletan ulazni niz. U

računskom smislu, algoritam zahteva samo mali broj elementarnih računskih operacija nad ulaznim podacima. Prikazane osobine čine algoritam pogodnim za implementaciju na savremenim hardverskim platformama različitog stepena složenosti. Po svojoj strukturi, PBRC algoritam se može shvatiti kao samo-obučavajuća i samo-rastuća veštačka neuronska mreža sa radijalnim baznim funkcijama (RBF-mreža). Baza znanja samog algoritma faktički je definisana neuronima skrivenog sloja ove mreže. Pri tome, prilikom inicijalizacije, algoritam se može startovati bilo sa praznom bazom znanja, odnosno bez i jednog skrivenog neurona, bilo sa proizvoljnim brojem prethodno definisanih neurona skrivenog sloja. Na ovaj način, algoritam je posebno prikladan za upotrebu u okviru različitih ekspertskih sistema, s obzirom da postoji jednostavan i jasan postupak na koji se ekspertsko znanje inkorporira u postupak. Prirodno proširenje PBRC algoritma predstavlja novoprojektovani ekspertski sistem pod engleskim akronimom SAMS (Self-Adaptive Monitoring System). Osnovne komponente ovog ekspertskog sistema su generator svojstava, baza ekspertskog znanja i PBRC klasifikator. Usled svoje modularne strukture, ovaj ekspertski sistem se lako prilagođava različitim primenama. Generator svojstava ima ulogu transformatora merenih veličina. Transformacija merenih veličina je inherentna karakteristika svakog sistema za praćenje stanja dinamičkih sistema. Različite primene zahtevaju različite transformacije, te je stoga sam generator svojstava izdvojen kao posebna i zasebno implementirana komponenta SAMS sistema. Adaptivnost SAMS sistema obezbeđuje PBRC algoritam svojom sposobnošću da automatski adaptira i proširuje bazu znanja. Konačno, u ovom odeljku prikazana je i predložena arhitektura softverskog sistema koji implementira SAMS algoritam.

Iako je matematički rigidna po sadržaju, ova teza je suštinski inženjerski praktična i posebna pažnja je posvećena rešavanju konkretnog problema – implementaciji ekspertskog sistema za detekciju i izolaciju neželjenih stanja u dva industrijskih procesa. Eksperimentalni deo istraživanja izveden je u Laboratoriji za upravljanje sistemima Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, a praktična implementacija sprovedena je u pogonima Fabrike za preradu ulja „VictoriaOil“ iz Šida i Termoelektrane-toplane Kostolac B. Prikazani rezultati realizovani su u okviru rada na projektu Ministarstva prosvete i nauke Vlade Republike Srbije pod nazivom

„Inteligentni nadzorno-upravljački sistem za rano otkrivanje i eliminaciju neželjenih stanja i promena na uređajima, opremi i procesima procesne industrije“, ugovor broj 32018 za 2011. godinu. kao i rada na međunarodnom projektu "Power plants Robustification based On fault Detection and Isolation algorithms -PRODI" (224233) koji je deo FP7 poziva Evropske komisije.

Teorijske osnove detkcije i izolacije (dijagnoze) neželjenih stanja dinamičkih sistema biće predstavljene u poglavlju 2. Daćemo definicije osnovnih pojmova vezanih za detekciju i izolaciju kvarova kao i pregled metoda koje su aktuelne u ovoj oblasti. Takođe, biće predstavljene osnovne karakteristike modernih sistema za nadzor i praćenje složenih dinamičkih procesa.

U poglavlju 3 predstavimo najpre pojam informacionog potencijala i teorijske osnove originalne varijante algoritama za grupisanje i razvrstavanje podataka [10,11]. Zatim će biti opisana originalna i naučno-stručno verifikovana modifikacija algoritma [10] koja je bazirana na uvođenju pojma ponderisanog informacionog potencijala. Pokazaćemo na koji način ovi parametri utiču na performanse algoritma i daćemo osnovne smernice za njihovo podešavanje u procesu optimizacije.

Prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju neželjenih stanja u radu dinamičkih sistema biće predstavljen u poglavlju 4. Projektovani ekspertski sistem za svoju osnovu ima prilagodljivi algoritam za jednovremeno grupisanje podataka i samim tim osobinu da identifikuje nove radne režime i daje odgovarajući odgovor na promene u nizu ulaznih podataka.

Poglavlje 5 posvećeno je verifikaciji predloženog ekspertskog sistema u kontrolisanim, laboratorijskim uslovima. Svi eksperimenti vršeni su u laboratoriji Centra za inteligentno i napredno upravljanje Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Posmatrana su dva pilot pilot- postrojenja, za regulaciju pritiska i regulaciju protoka i nivoa koja su u radu detaljno opisana. Prikazani eksperimenti prethodno su publikovani u više radova [3,4] i saopšteni na više međunarodnih i domaćih stručnih skupova [2,12].

U poglavlju 6 biće predstavljeni rezultati praktične implementacije ekspertskog sistema za praćenje složenih industrijskih procesa u okviru koje je vršena detekcija kvarova u podsystemima dva složena industrijska postrojenja, čije su osnove

predstavljene u prethodnom poglavlju. Eksperimenti su sprovedeni na dve lokacije, u fabrici za preradu ulja Victoria Oil iz Šida i u Termoelektrani Kostolc B.

2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema

U okviru ovog poglavlja biće prikazane teorijske osnove detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema. Objasnićemo osnovne pojmove vezane za dinamičke sisteme, detekciju i izolaciju neželjenih stanja kao i osnove nadzora i praćenja složenih dinamičkih sistema.

2.1. Detekcija i izolacija neželjenih stanja dinamičkih sistema

Detekcija i izolacija neželjenih stanja dinamičkih sistema¹ veoma je važna oblast u modernoj procesnoj tehnici. Dinamički sistemi (proces) kojima ćemo se baviti u okviru ove disertacije predstavljaju skup procesa koji se javljaju u industriji.

¹ Pojam dinamičkog sistema predstavlja jedan od osnovnih pojmova u teoriji upravljanja. S obzirom na to da se rezultati teorije upravljanja mogu primeniti u rešavanju široke klase problema, pojam dinamičkog sistema (dinamičkog procesa) može se uvesti na različite načine. Zainteresovanog čitaoca upućujemo na bogatu literaturu, videti recimo [79].

2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema

Jasno je da je rano prepoznavanje grešaka ključno za blagovremeno preduzimanje odgovarajućih akcija u cilju sprečavanja daljeg nepravilnog rada sistema i svih posledica koje mogu da dovedu do degradacije performansi sistema. Time se smanjuju gubici i ubrzava oporavak samog sistema. Pouzdana detekcija i izolacija grešaka u radu sistema jeste važan deo uspešne maksimizacije produktivnosti ali i bezbednosti.

Poslednjih decenija, dijagnostika neželjenih stanja dinamičkih sistema predstavlja veoma atraktivnu oblast, kako u akademskim, tako i u industrijskim krugovima. Uvod u osnovne principe industrijske bezbednosti, pouzdanosti i analiza rizika može se pronaći u [13]. Pregled različitih tehnika za detekciju kvarova dat je u knjigama Rolfa Isermana [14], Stivena Dinga [15] kao u tri pregledna rada Venkata Venkatasubramaniana i koautora iz 2003. godine [16,17,18].

Sublimirajući literaturu, može se primetiti da se tehnike za dijagnostikovanje kvarova mogu grubo podeliti na:

- metode zasnovane na modelu procesa
- metode zasnovane na podacima o istoriji ponašanja procesa

Detaljni opisi metoda za dijagnostikovanje kvarova biće dati u poglavlju 2.4.

U opštem okviru koji su predložili Venkatasubramanian i koautori [16] bilo koji proces odlučivanja u dijagnostici kvarova može se posmatrati kao niz transformacija koje deluju na merenu procesnu veličinu. U ovom okviru, merene veličine najpre se koriste za određivanje obeležja (*eng. feature*) procesa. Obeležja opisuju ponašanje sistema i predstavljaju važan pokazatelj ponašanja sistema u postupku detekcije kvarova. Ekstrakciju obeležja iz procesa predstavimo u poglavljima koja slede na matematički formalan način a sada pojam obeležja uvodimo intuitivno kao skup merljivih i nemerljivih parametara koji na dovoljno dobar način opisuju ponašanje procesa. Računanje obeležja procesa je specifično za svaki problem i, u opštem slučaju, zahteva određeno poznavanje samog procesa. Dalje se obeležja koriste za određivanje da li je trenutni radni režim nominalan ili postoji greška u radu sistema i za to se koristi neka od klasifikacionih tehnika. Radno stanje je u daljem

2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema

tekstu ekvivalentno pojmu radni režim i trebalo bi ga razlikovati od pojma stanja u smislu matematičkog modela u prostoru stanja.

Efikasan sistem za klasifikaciju grešaka trebalo bi da bude u stanju da razlikuje više neželjenih radnih režima tako da može da vrši i izolaciju grešaka. U svakom slučaju, pored izdvajanja obeležja procesa, klasifikacija predstavlja suštinski deo svake procedure za dijagnozu neželjenih stanja sistema.

Brojne metode za razvrstavanje i grupisanje (klasifikaciju) podataka uspešno su primenjene u različitim inženjerskim oblastima. Pregled statističkih pristupa nalazi se recimo u knjizi Izermana iz 2008. godine [19] u kojoj se, između ostalog, mogu pronaći opisi metoda kao što su neparametarska estimacija gustine, multivarijantna regresija, metode zasnovane na grananju i slično.

Uvod u opširniju statističku teoriju odlučivanja može pronaći u knjizi Džejsma Bergera [20]. Različite tehnike računarske inteligencije uključujući veštačke neuronske mreže, rasplintu (eng. fuzzy) logiku i teoriju vektora podrške (eng. *support vector machines*), predstavio je Vojislav Kecman u [21]. Detaljna analiza različitih klasifikacionih algoritama zasnovanih na kernel funkcijama može se pronaći u poznatoj knjizi autora Školkopfa (eng. *Schölkopf*) i Smole iz 2002. godine [22].

U poslednje vreme predloženi su brojne tehnike za praćenje (nadzor) procesa, detekciju i dijagnostiku grešaka u radu sistema. Pregled ovih sistema može se naći u prvom od tri pregledna rada Venkatasubramaniana i koautora [16]. Detaljniji pregled kvalitativnih metoda za detekciju i izolaciju grešaka zasnovanih na modelima procesa, odnosno kvantitativnih metoda zasnovanih na podacima o istoriji ponašanja procesa prikazan je u preglednim radovima istih autora [17,18].

Metode za detekciju i izolaciju kvarova koje su zasnovane na računarskoj inteligenciji široko su rasprostranjene u praksi. Primeri primene metoda vektora podrške u detekciji kvarova mogu se pronaći u radovima [23,24,25,26]. Hibridna kombinacija metoda veštačkih neuronskih mreža i rasplintute logike uspešno je primenjene u [27] za detekciju kvarova dinamičkih sistema. [28]. Takođe zanimljivi primeri primene široke klase metodologija za detekciju i izolaciju neželjenih stanja sistema dati su u [29,30,31,32,33,34].

2.2. Osnovni pojmovi detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema

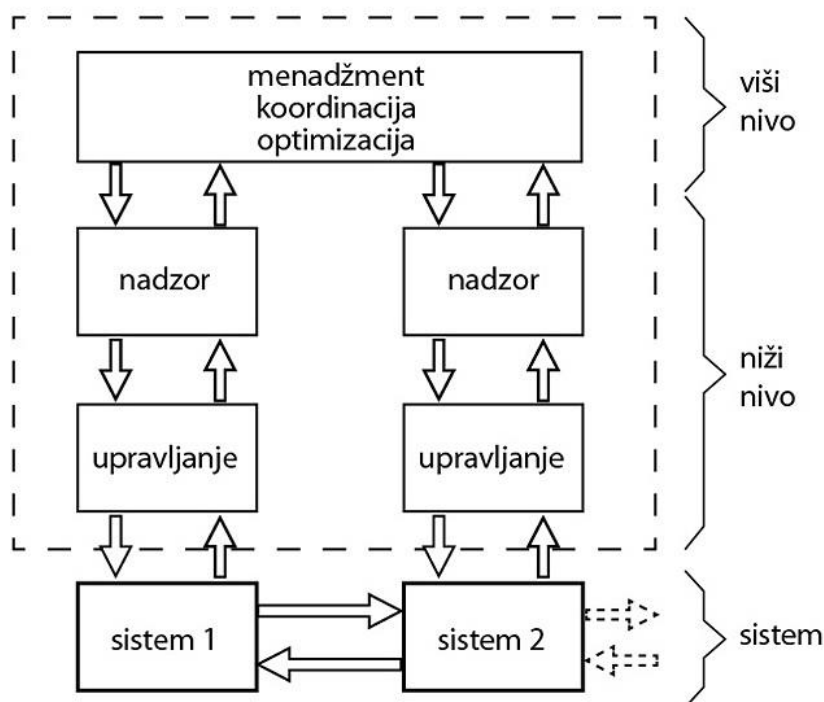
Poslednjih decenija došlo je do velikih dostignuća u teoriji, razvoju a pre svega implementaciji sistema automatskog upravljanja. Ova dostignuća posebno se odnose na sisteme automatskog upravljanja zasnovane na modelu procesa, na observerima stanja, estimaciji parametara i kompenzovanju nelinearnosti sistema.

Sa usavršavanjem upravljanja procesima na nižem nivou, nadzor i praćenje procesa postaju još važniji, s obzirom na to da se operateri udaljavaju od samog procesa. Operater više ne kontroliše proces samo u smislu zadatih vrednosti parametara ili vremenskih rasporeda, već nadzire čitav proces.

Slika 1 prikazuje primer sistema automatskog upravljanja za dva povezana procesa. Na najnižem nivou nalazi se sami sistemi koji imaju određenu međusobnu zavisnost. Na sledećem nivou nalazi se upravljanje ovim procesima kao i njihov nadzor, dok se na najvišem nivou nalazi optimizacija, menadžment i koordinacija ovih procesa.

Automatski nadzor procesa u prošlosti bilo je uglavnom svedeno na provere prekoračenja vrednosti (*eng. treshold*) važnih parametara procesa kao što su pritisak, temperatura, nivo tečnosti i slično. Uobičajno su se javljali alarmi kada određeni parametar izađe iz dozvoljenog opsega i tada bi reagovao operater ili bi se automatski aktivirao sistem zaštite. U mnogim slučajevima ovo nije bilo dovoljno da se spreče ozbiljniji otkazi i oštećenja sistema. Takođe, kvarovi su detektovani sa zakašnjenjem i ovakav jednostavni metod nije omogućavao detaljniju dijagnostiku.

2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema



Slika 1. Uprošćena shema sistema automatskog upravljanja dva povezana procesa

Metode upravljanja sistemima zasnovane na matematičkim modelima sistema, identifikaciji i estimaciji parametara kao i računarskoj inteligenciji pružaju dobru osnovu za razvoj naprednih sistema za praćenje, nadzor, detekciju i dijagnostiku kvarova.

Budući da se rezultati iz oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema primenjuju u rešavanju široke klase problema, terminologija koja se koristi nije usaglašena. Osnovni pojmovi iz oblasti detekcije i dijagnoze neželjenih stanja dinamičkih sistema mogu se prema Izermanu [14] definisati na sledeći način:

Kvar (*eng. fault*) predstavlja nedozvoljeno odstupanje od prihvatljive, uobičajne vrednosti najmanje jednog karakterističnog obeležja procesa (sistema). Kvar zapravo predstavlja neželjeni radni režim sistema. Nedozvoljeno odstupanje jeste razlika između vrednosti obeležja kada u sistemu postoji kvar i dozvoljene vrednosti obeležja

2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema

u nominalnom radnom režimu. Radni režim koji se javlja prilikom pojave kvara jeste abnormalno stanje sistema koje može prouzrokovati smanjenje ili gubitak sposobnosti procesa da obavlja svoju funkciju [35] međutim, pojava kvara ne mora obavezno da utiče na ispravno funkcionisanje sistema.

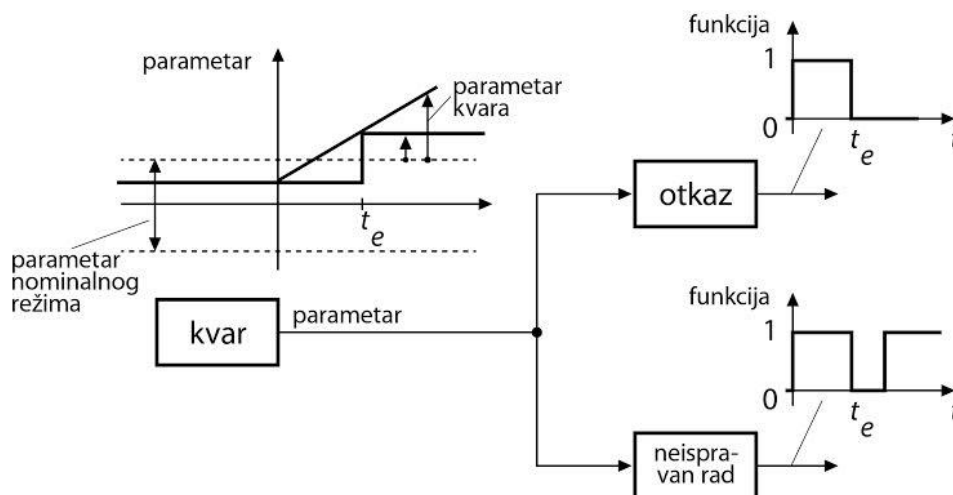
Otkaz (*eng. failure*) predstavlja trajnu nesposobnost funkcionalne jedinice ili sistema u celini da obavlja svoju funkciju [35] pod određenim uslovima i nastaje kao posledica jednog ili više kvarova u sistemu.

Otkazi se mogu podeliti u više kategorija:

- prema broju: pojedinačni, višestruki
- prema predvidljivosti: slučajni, predvidljivi za određene uslove i zavisni od poznatih uslova

Neispravnost u radu (*eng. malfunction*) predstavlja sporadične nepravilnosti u radu sistema. Neispravnost jeste privremeni poremećaj u radu sistema, a nastaje kao posledica jednog ili više kvarova u sistemu.

Na slici 2 prikazan je odnos kvara, otkaza i neispravnosti sistema. Kvar se može javiti iznenada, kao odskočna (*eng. step*) funkcija ili postepeno. Pretpostavljeno je da se parametar procesa na koje utiče kvar menja proporcionalno sa kvarom. Nakon prekoračenja dozvoljene vrednosti posmatrani parametar ukazuje na pojavu kvara. Nakon određenog vremena t_e uslediće neispravnost u radu ili otkaz sistema, u zavisnosti od vrste kvara.



Slika 2. Odnos kvara, otkaza i neispravnosti sistema

Detekcija kvara (*eng. fault detection*) je detekcija događaja kvara i vremena kada se kvar dogodio.

Izolacija kvara (*eng. fault isolation*) predstavlja određivanje vrste, lokacije i vremena detekcije kvara.

Identifikacija kvara (*eng. fault identification*) jeste određivanje veličine i ponašanja kvara u vremenu.

Dijagnoza kvara (*eng. fault diagnosis*) predstavlja određivanje vrste, veličine, lokacije i vremena detekcija kvara na osnovu evaluacije prisutnih simptoma. Uključuje detekciju, izolaciju i identifikaciju kvara.

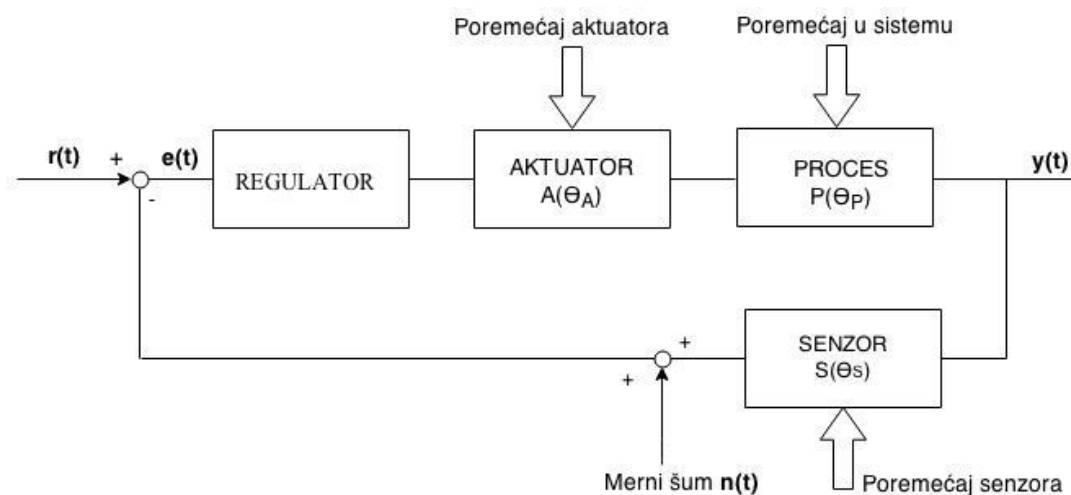
Praćenje sistema (*eng. monitoring*) jeste kontinualni proces praćenja sistema u realnom vremenu u smislu određivanja mogućih radnih režima fizičkog sistema, prepoznavanja i ukazivanja na anomalije u radu sistema.

Nadzor sistema (*eng. supervision*) podrazumeva praćenje fizičkog sistema i preduzimanje određenih akcija u slučaju pojave kvara

2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema

Ekspertski sistem predložen u ovom radu baziran je na praćenju i nadzoru sistema, a sama detekcija kvarova zasnovana je na praćenju ponašanja sistema i njegovih radnih režima.

Slika 3 prikazuje sistem automatskog upravljanja kao i različite uzroke kvarova (poremećaja) u ovakvom sistemu. Poremećaji koji se mogu dogoditi u samom sistemu, aktuatoru ili senzoru dovode promene parametara ovih komponenti ($\theta_P, \theta_A, \theta_S$).



Slika 3. Shema sistema automatskog upravljanja

U opštem slučaju možemo izdvojiti tri grupe kvarova odnosno neispravnosti u sistemima automatskog upravljanja [16]:

1. Promene parametara koji utiču na model sistema

Postoje određeni procesi u sistemu koji se ne uzimaju u obzir prilikom modelovanja. Ovi procesi se najčešće modeluju kao parametri procesa koji predstavljaju različite interakcije u samom sistemu. Do poremećaja ovih parametara dolazi kada se javi jedan ili više nezavisnih spoljašnjih poremećaja. Jedan od razmatranih primera u ovom radu bavi se detektovanjem

nedozvoljene promene temperature u funkcionalnoj jedinici desolventizer postrojenja za ekstrakciju. U ovoj funkcionalnoj jedinici promena vlažnosti i/ili kvaliteta sačme koja ulazi u sistem dovodi do nepredvidljivih promena u ponašanju funkcionalne jedinice i nedozvoljenih promena temperature.

2. Promene u strukturi sistema (processa)

Neželjene promene u strukturi sistema odnose se na promene unutar samog sistema. Ove promene se dešavaju usled ozbiljnih kvarova na opremi. Neispravnosti u strukturi samog sistema dovode do promene međusobnih odnosa različitih procesnih veličina. Jasno je da tada ne važe jednačine modela koje opisuju rad sistema u nominalnom radnom režimu. U slučaju pojave ovakve neispravnosti potrebno je ili ukloniti određene jednačine modela ili ih preformulisati tako da one oslikavaju trenutnu strukturu posmatranog procesa. Primeri za promene u strukturi sistema mogu biti neispravan rad regulatora, zaglavljn ventil i slično. U okviru ovog rada biće razmatran primer kada dolazi do prekida napajanja na ventilu.

3. Neispravni senzori i aktuatori

Najčešće se kvarovi dešavaju na sensorima i aktuatorima. Neki od senzora šalju signale koji su od suštinske važnosti za rad i upravljanje sistemom. Kvar na jednom od senzora može uzrokovati da promenljive stanja sistema izađu iz dozvoljenih granica što se može sprečiti blagovremenim detektovanjem kvara i preduzimanjem odgovarajućih akcija. Zadatak sistema za dijagnostiku upravo jeste brza detekcija kvarova na opremi da bi se izbegla ozbiljnija oštećenja kao i degradacija performansi sistema.

U cilju poređenja različitih sistema za detekciju i izolaciju kvarova korisno je definisati koje su to osobine koje bi ovi sistemi trebalo da imaju. Nakon što se definišu ove osobine, moguće je izvršiti ocenu sistema za dijagnostiku kvarova u odnosu na postavljene zahteve [16].

2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema

Definisaćemo najpre dva važna koncepta sistema za dijagnostiku kvarova, kompletnost i rezoluciju. Kada se u procesu javi jedan ili više kvarova sistem za dijagnostiku postavlja hipoteze i nudi objašnjenje koji je to kvar izazvao neispravnost u radu sistema. Kompletnost sistema za dijagnostiku zahteva da kvar koji se javio pripada skupu kvarova koje sistem prepoznaje. Sa druge strane, rezolucija zahteva da skup opisanih kvarova bude najmanji moguć. Odavde sledi da prilikom projektovanja sistema za dijagnostiku kvarova uvek postoji kompromis između kompletnosti i rezolucije. Svaki put kada poredimo dva sistema za dijagnostiku kvarova moramo obratiti pažnju na ova dva koncepta.

U nastavku ćemo definisati osnovne karakteristike sistema za dijagnozu kvarova:

- **Brza detekcija i izolacija**

Sistem bi trebalo da u što kraćem roku detektuje i izoluje poremećaje (neispravnosti) u radu procesa. Sistem koji je projektovan da daje brze odgovore na promene radnog režima (naročito na promene koje se javljaju iznenada) sa druge strane uglavnom ima problem sa osetljivošću na šum i često daje veliki broj lažnih alarma.

- **Verovatnoća i učestalost pogrešnih detekcija [36]**

Jako je bitno razlikovati učestalost lažno pozitivnih i lažno negativnih detekcija. Učestalost lažno pozitivnih detekcija (*eng. false alarm rate*) odnosno detekcija neželjenih radnih režima kada se sistem zapravo nalazi u nominalnom režimu može značajno da utiče na performanse posmatranog procesa budući da pojava alarma svakako zahteva reakciju sistema i operatera.

Još kritičniji događaj jeste pojava lažno negativne detekcije, odnosno propuštenog alarma (*eng. missed alarm rate*) s obzirom da kvar u sistemu koji nije prepoznat može dovesti do velikih oštećenja, otkaza ili zaustavljanja čitavog procesa.

- **Izdvojivost**

Izdvojivost predstavlja sposobnost sistema za dijagnostiku da razlikuje različite tipove kvarova na osnovu podataka koje dobija iz merenih procesnih veličina. Mogućnost da se projektuje sistem koji je izdvojiv umnogome zavisi kako od načina projektovanja tako i od karakteristika samog posmatranog procesa. Prilikom projektovanja procesa, potrebno je doneti različite odluke poput onih koje aktuatore odabirati, koje senzore, kako povezati različite komponente i slično. Sve ove odluke mogu uticati na izdvojivost sistema za dijagnostiku kvarova posmatranog procesa. Takođe, prilikom projektovanja sistema za dijagnostiku donosimo različite odluke u smislu procedura koje će se primenjivati, načina modelovanja i klasifikovanja kvarova.

- **Robusnost**

Poželjno je da sistem za detekciju i izolaciju kvarova bude robusan u odnosu na različite tipove nesigurnosti uključujući nesigurnosti merenja i modelovanja. Prilikom projektovanja sistema koji je robusan trebalo bi posebno obratiti pažnju na kompromis između robusnosti i performansi sistema za dijagnostiku. Sistem za detekciju kvarova koji je robusan može, između ostalog, da dovede do učestale pojave propuštenih alarma i time dovede do ozbiljnijih oštećenja procesa.

- **Identifikacija novina**

Jedan od osnovnih zahteva koji sistem za dijagnostiku kvarova mora da ispuni jeste da ima mogućnost da za posmatrani radni režim može da odluči da li je on ispravan ili postoji kvar u posmatranom sistemu kao i da u prisustvu kvara može da pruži informaciju da li se radi o poznatom kvaru (ili neispravnosti) ili je u pitanju nepoznati, novi kvar. Ovu osobinu nazivamo identifikacija novina. Najčešće nam je dostupno dovoljno podataka da modelujemo ponašanje sistema u nominalnom radnom režimu, dok u opštem slučaju nemamo dovoljno istorijskih podataka za modelovanje svih radnih režima koji se mogu pojaviti u toku rada. U slučaju kada nam je dostupan analitički model sistema ovaj problem se lako rešava. Međutim, najčešće nam je dostupno jako malo (ili nimalo) podataka koji pripadaju

nepoželjnim radnim režimima što predstavlja ozbiljan problem u postizanju identifikacije novih radnih režima. Uprkos tome, mogućnost identifikacija novina jeste veoma poželjna osobina sistema za dijagnozu kvarova. Dobar sistem za dijagnozu kvarova trebalo bi da bude sposoban da prepozna pojavu novih kvarova ali i da izbegne pogrešnu klasifikaciju novih kvarova u klasu starih ili u klasu nominalnih radnih režima.

- **Estimacija greške klasifikacije**

Važan praktični zahtev koji bi trebalo da ispunjava sistem za dijagnostiku jeste stvaranje poverenja korisnika u njegovu pouzdanost. Ispunjavanje ovog zahteva može biti znatno olakšano ukoliko uvedemo *a priori* estimaciju greške klasifikacije koja se može dogoditi. Ovakva mera greške može pomoći u stvaranju poverenja korisnika u rešenja koja nudi sistem za dijagnostiku.

- **Prilagodljivost**

U opštem slučaju procesi se menjaju i razvijaju usled promene ulaza ili usled strukturalnih promena u samom sistemu. Radni režimi procesa mogu se menjati ne samo usled poremećaja već i usled promene radnog okruženja (promene zahteva u proizvodnji, promene u kvalitetu sirovog materijala...) Sistem za dijagnostiku trebalo bi da ima mogućnost da se prilagodi ovakvim promenama tako što bi prilikom pojave novih radnih režima i podataka o njima postepeno vršio sopstvenu nadogradnju.

- **Sposobnost tumačenja donetih odluka**

Pored sposobnosti da detektuje, izoluje i identifikuje kvar sistem za dijagnozu kvarova trebalo bi da pruži objašnjenja o tome usled čega je kvar nastao i kakva je njegova propagacija u sistemu. Sistem za dijagnostiku treba da opravda i objasni rešenja koja nudi tako da operater može da reaguje u skladu sa tim.

- **Zahtevi u modelovanju**

Veoma važno pitanje koje treba razmotriti jeste napor koji je potrebno uložiti u modelovanje procesa prilikom projektovanja sistema za dijagnostiku kvarova. Model procesa koji se prati trebalo bi da bude što jednostavnijeg oblika ali da, u skladu sa zahtevanom tačnošću, bude što tačniji.

- **Zahtevi u memoriji i računarskim resursima**

Brzi sistemi za dijagnozu kvarova koji se izvršavaju u realnom vremenu zahtevaju algoritme čija implementacija nije previše složena. Ovakvi algoritmi mogu imati velike zahteve po pitanju memorijskog prostora. Projektovanje sistema za dijagnostiku zahteva kompromis između ova dva zahteva.

- **Identifikacija višestrukih kvarova**

Mogućnost identifikacije višestrukih kvarova jeste veoma važna i poželjna osobina sistema za dijagnozu kvarova. Interakcija višestrukih kvarova koji se javljaju istovremeno značajno usložnjava ovaj problem. U opštem slučaju ove interakcije čine da sistem za dijagnostiku ne može da iskoristi obrasce koje poseduje za pojedinačne kvarove u identifikaciji višestrukih kvarova. Sa druge strane, kod složenih procesa nije moguće uzeti u obzir sve kombinacije kvarova prilikom projektovanja sistema za dijagnostiku kvarova.

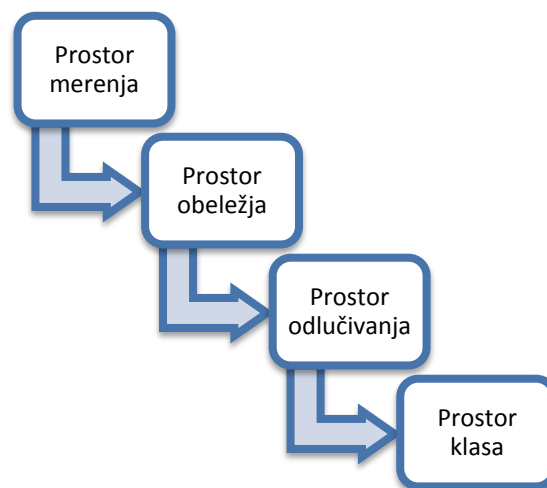
Iako su sve nabrojane karakteristike veoma poželjne, danas ne postoji jedan sistem koji se može pohvaliti svim navedenim karakteristikama. U okviru ovog rada, usresredili smo se na razvoj algoritama i sistema koji se odlikuju prilagodljivošću i sposobnošću detekcije novih neželjenih radnih stanja i kvarova koji nisu bili predviđeni u fazi projektovanja sistema. Važna karakteristika predloženog ekspertskog sistema jeste i brzina detekcije, gde smo pokazali da, čak i u slučaju (prilikom inicijalizacije postupka) nepredviđenih radnih režima, sistem reaguje veoma brzo prepoznavajući da je došlo do određenih promena u procesu. Ekspertski sistem koji je tema ovog rada u svojoj osnovi ima prilagodljivi algoritam za grupisanje i

2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema

razvrstavanje podataka se izvršava rekurzivno (zahtevi u memoriji i računarskim resursima su zanemarljivi) pa je samim tim veoma pogodan za izvršavanje u realnom vremenu.

2.3. Transformacija procesnih veličina u sistemima za dijagnostiku kvarova

Veoma je važno uočiti da, pre nego što se donese odluka o radnom režimu u kome se sistem nalazi i eventualnoj pojavi kvara, merenja iz procesa prolaze kroz različite transformacije unutar sistema za dijagnostiku kvarova. U ovom smislu može se reći da proces odlučivanja u sistemima za dijagnostiku kvarova zapravo predstavlja niz transformacija koje se vrše nad merenim podacima iz sistema. Slika 4 upravo prikazuje ove transformacije.



Slika 4. Transformacije merenja iz procesa u okviru sistema za dijagnozu kvarova

Veličine koje se mere u procesu čine prostor merenja. Ove vrednosti predstavljaju ulaz u sistem za dijagnostiku kvarova i ne sadrže nikakvo *a priori* znanje o samom procesu. Prostor obeležja (svojstava) procesa jeste skup obeležja izolovanih iz podataka o procesu uz korišćenje određenog predznanja o procesu. Izolovana

2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema

obeležja u daljem tekstu označavaćemo vektorom $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_n)$. Prilikom ove transformacije izmerene procesne veličine se analiziraju, kombinuju i uz pomoć predznanja sa kojim se raspolaže iz njih se izoluju svojstva procesa koja mogu biti korisna u smislu određivanja radnog režima procesa.

Preslikavanje iz prostora obeležja u prostor odlučivanja vrši se radi optimizovanja postavljenog kriterijuma optimalnosti (minimizacije pojave pogrešne klasifikacije, smanjenja broja lažnih alarma...). Prostor klasa jeste skup celih brojeva $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_k)$ gde k predstavlja broj prepoznatih radnih režima uključujući i one sa kvarom i one bez kvara. Indeks označava kojoj klasi pripada tekuće merenje iz procesa. Prostor klasa, dakle, predstavlja konačni izlaz sistema za dijagnozu.

Postoje dva načina za preslikavanje iz prostora merenja u obeležja procesa. To su selekcija i izdvajanje obeležja (*eng. feature selection and feature extraction*). Kod odabiranja obeležja jednostavno se iz prostora merenja na određen način odaberu obeležja koja dobro opisuju ponašanje sistema. U postupku izdvajanja obeležja vrši se prelazak iz prostora merenja u prostor obeležja koji je manjih dimenzija uz pomoć prethodnog znanja o procesu koji se posmatra. Izbor postupka za izdvajanje obeležja karakterističan je za svaki problem i trebalo bi da bude pažljivo odabran.

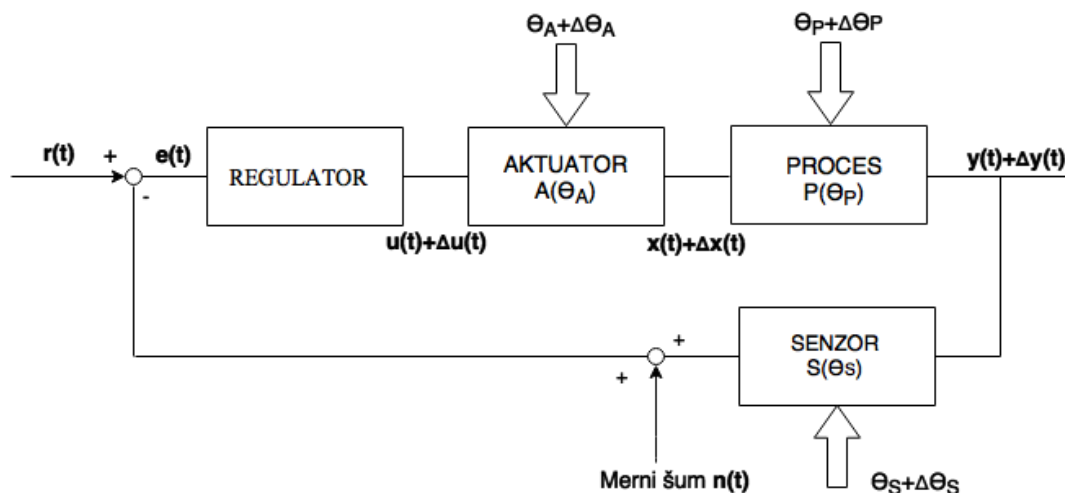
U velikom broju slučajeva, estimirane vrednosti parametara odgovarajućeg linearnog modela procesa predstavljaju dobar izbor. U ovom radu ćemo najčešće koristiti Kalmanov filter kao generator obeležja i on će formalno matematički biti predstavljen u poglavljima koja slede. Različiti tipovi Kalmanovog filtera takođe se koriste kao generatori reziduala u različitim procedurama za detekciju grešaka [37,38,39].

Iz prostora obeležja u prostor odluka može se preći na različite načine. Jedan od načina je i primena jednostavne funkcije praga (*eng. treshold*). Transformacija iz prostora odluka u prostor klasa predstavlja interpretaciju donetih odluka.

2.4. Praćenje i nadzor dinamičkih sistema

Cilj nadzora dinamičkih sistema jeste prikaz tekućeg radnog režima sistema, ukazivanje na neželjene ili nedopustive radne režime kao i preduzimanje odgovarajućih akcija u cilju sprečavanja oštećenja samog sistema. Poremećaji u ponašanju procesa rezultat su kvarova ili grešaka u sistemu, koje mogu imati najrazličitije uzroke. Poremećaji mogu biti posledica kraće ili duže izloženosti sistema radu sa nepravilnostima ili otkazima ukoliko nisu preduzimate mere za zaštitu sistema. Jedan od zadataka nadzora sistema jeste upravo sprečavanje rada u neispravnom režimu ili otkaza.

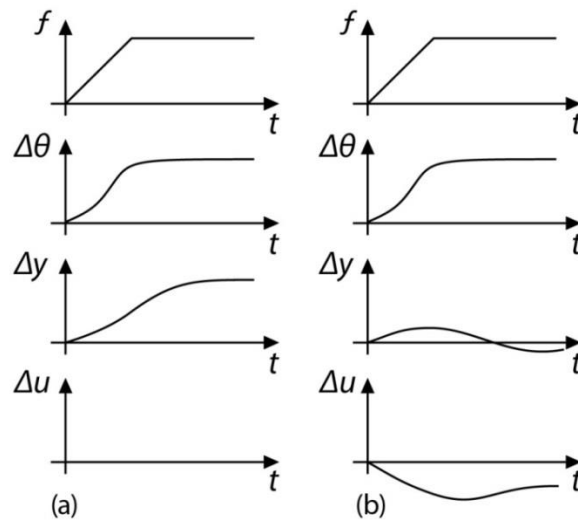
Slika 5 predstavlja proces P u zatvorenoj povratnoj sprezi. Kvar se u ovakvom sistemu može javiti kao posledica spoljšnjih ili unutrašnjih faktora koji deluju na sistem. Kvarovi koji se jave u sistemu utiču najpre na parametre procesa, aktuatora i/ili senzora ($\theta_P, \theta_A, \theta_S$) i/ili na promenljive stanja $x(t)$ čije vrednosti najčešće nisu direktno dostupne (nisu merljive). Kvar utiče na izlaz sistema $y(t)$ tako što dodaje $\Delta y(t)$. Potrebno je uzeti u obzir da na izlaz $y(t)$ takođe utiču poremećaj i šum $n(t)$ kao i promena ulaznog signala $u(t)$.



Slika 5. Shema procesa u kome postoji kvar

2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja
dinamičkih sistema

Slika 6 prikazuje promenu u vremenu parametra sistema (samog procesa, aktuatora i/ili senzora) i merljivih signala ulaza i izlaza nakon pojave kvara $f(t)$ u otvorenoj i zatvorenoj povratnoj sprezi.



Slika 6. Promena parametara procesa, ulaznih i izlaznih signala nakon pojave kvara
a) u otvorenoj sprezi b) u zatvorenoj povratnoj sprezi

U zavisnosti od promene parametra aktuatora, procesa i/ili senzora ($\Delta\theta_A$, $\Delta\theta_P$, $\Delta\theta_S$) ili promene promenljivih stanja $\Delta\mathbf{x}(t)$ izlaz će pokazivati samo više ili manje kratak poremećaj ukoliko se koristi regulator sa integralnim dejstvom. Međutim, u tom slučaju bi upravljanje $\mathbf{u}(t)$ pokazivalo trajni poremećaj. Ukoliko bi se nadzirao samo izlaz sistema tada bi najverovatnije došlo do toga da se kvar ne detektuje usled kratkotrajnog i malog poremećaja izlaznog signala koji je dodatno opterećen šumom. Razlog leži u tome što je zatvorena povratna sprega u stanju da kompenzuje ne samo neigurnosti merenja već i male promene parametra procesa i promenljivih stanja. Samo u slučaju da kvar dovoljno poraste tako da upravljačka promenljiva dostigne graničnu vrednost (uđe u saturaciju) došlo bi do trajne promene izlaza. Upravo iz ovih razloga kod procesa u zatvorenoj povratnoj sprezi neophodno je pratiti i promenu upravljanja $\Delta\mathbf{u}(t)$ uz praćenje promene izlaza $\Delta\mathbf{y}(t)$.

2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema

Nadzor dinamičkih sistema najčešće se vrši uz pomoć provere ograničenja vrednosti nekoliko određenih merljivih veličina procesa $y(t)$. Ovo ustvari znači da se proverava da li se posmatrana veličina nalazi u dozvoljenim granicama

$$y_{min} < y(t) < y_{max}$$

Ukoliko je vrednost posmatrane veličine van ovih granica sistem za nadzor aktivira alarm. Dakle, prvi zadatak nadzora jeste praćenje rada sistema i javljanje alarma u slučaju prekoračenja dozvoljenih vrednosti parametara koji se prate. Dozvoljene vrednosti veličina koje se prate mogu se postaviti na različite načine. Osim strogih „od-do” granica, mogu se postaviti i takozvane „meke margine” (*eng. soft margins*) gde se određenim parametrima mogu dozvoliti mala odstupanja od postavljenih graničnih vrednosti. Postoje i slučajevi kada se može postaviti više nivoa graničnih vrednosti i u skladu sa tim više različitih nivoa alarma. Takođe, osim samih graničnih vrednosti moguće je pratiti i trendove promena posmatranih veličina i u zavisnosti od toga koliko je veličina blizu dozvoljene granice kao i trenda njene promene donositi zaključke o stanju procesa koji se prati.

U sledećem koraku operater koji je zadužen za sistem izvršava određene akcije u cilju zaštite sistema. Međutim, ukoliko pojava kvara dovodi do potencijalno opasnog radnog režima, sistem za nadzor može da pokrene automatski određene akcije radi zaštite što ujedno predstavlja drugi zadatak nadzora sistema.

Ovakvi klasični metodi nadzora procesa pogodni su za opšti nadzor. Da bi se podesile dozvoljene granice određenih parametara procesa neophodan je kompromis između ispravne detekcije poremećaja vrednosti posmatranog parametra i lažne detekcije usled normalnih fluktuacija u vrednosti parametra. Najčešće provera vrednosti parametra sa fiksiranim granicama funkcioniše dobro u slučajevima kada proces ostaje u stabilnom stanju ili se posmatrana promenljiva ne menja sa promenom radnog režima sistema. Situacija se komplikuje ukoliko se posmatrani parametar dinamički menja sa promenom radnog režima. Prednost klasičnog sistema za nadzor sa proverom granica parametara procesa jeste njegova jednostavnost i pouzdanost za procese koji su stabilni. Nažalost, kod ovakvih sistema moguće je detektovati kvar i

2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema

reagovati na odgovarajući način samo nakon velikih promena u obeležjima procesa, nakon velikih iznenadnih kvarova. Takođe, detaljnija analiza kvarova nije moguća.

Prvi korak u prevladavanju ovih problema bio bi uvođenje dodatnih senzora za praćenje promena koje se javljaju prilikom određenih očekivanih kvarova kao i implementacija ekspertskog znanja o sistemu u sam sistem za nadzor. Međutim, uvođenje dodatnih senzora i infrastrukture koji bi detektovali samo određene kvarove ne samo da povećava troškove već i smanjuje pouzdanost sistema jer pruža podlogu za dodatne kvarove [14].

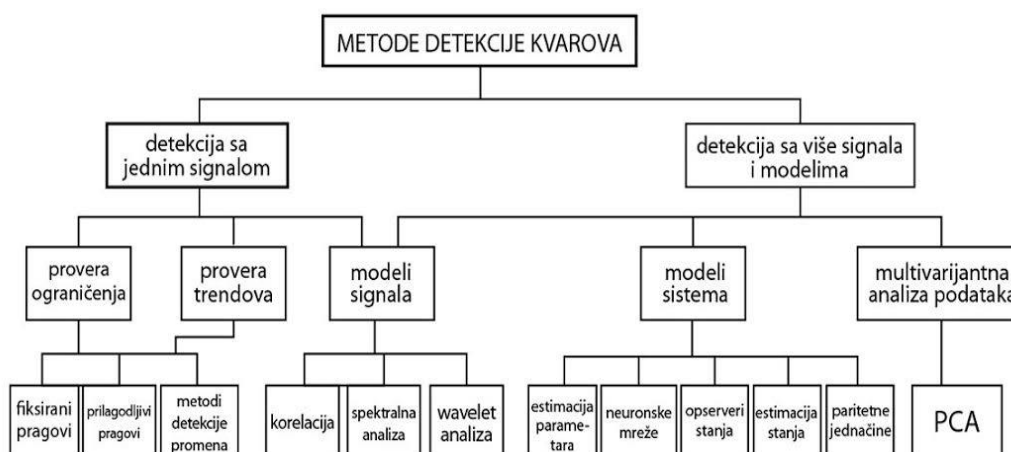
Kod velikih i složenih dinamičkih sistema sa puno praćenih promenljivih dodatni problem predstavlja to što nakon ozbiljnijeg kvara ili otkaza dolazi do podizanja velikog broja alarma u malom vremenskom intervalu. Ova pojava naziva se kiša alarma [14]. Tada su operateri sistema izloženi velikom broju obaveštenja i teško mogu da reaguju na odgovarajući način, odnosno teško mogu utvrditi šta je uzrok kvara.

Zbog gore navedenog potrebno je razviti naprednije metode za nadzor, detekciju i dijagnozu neželjenih stanja dinamičkih sistema. Ovakvi sistemi trebalo bi da imaju osobine koje su prethodno opisane :

- Rana detekcija manjih kvarova sa naglom ili postepenom pojavom
- Dijagnoza kvarova sistema, delova sistema, aktuatora i senzora
- Detekcija kvarova u zatvorenoj povratnoj sprezi

2.5. Pregled metoda za detekciju i izolaciju kvarova

Na slici 7 dat je grafički pregled metoda koje se najčešće koriste za detekciju kvarova.



Slika 7. Pregled metoda za detekciju kvarova

Detaljna objašnjenja ovih metoda mogu se pronaći u [14,15,40,41,42].

Metode za detekciju i izolaciju kvarova mogu se grubo podeliti u nekoliko grupa [42]:

Dijagnostika kvarova zasnovana na redundanciji hardverskih komponenti

Metode koje pripadaju ovoj grupi koriste identične (redundantne) hardverske komponente za rekonstruisanje ponašanja procesa.

U najjednostavnijem slučaju, smatra se da je kvar na određenoj komponenti detektovan ukoliko je izlazni signal te komponente različit od izlaza odgovarajuće redundante komponente [43]. Postoje i složenije metode detekcije kvarova koje se zasnivaju na redundantnim komponentama, zainteresovanog čitaoca upućujemo recimo na [44]. Glavne prednosti ovih metoda su pouzdanost i direktna izolacija kvara. Takođe, ovaj princip pruža mogućnost brze i jednostavne zamene komponente kod

2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema

koje je došlo do kvara njenim redundantnim parom čime se, između ostalog, postiže povećanje produktivnosti. Mana metoda jesu visoki troškovi pa se one koriste uglavnom samo na malom broju najvažnijih komponenti posmatranog sistema. Neki od metoda iz ove grupe prikazani su u [45,46].

Detekcija kvarova zasnovana na obradi signala

Najjednostavniji način detekcije pojave neželjenih stanja sistema jeste, kao što je već opisano u poglavlju 2.4, praćenje vrednosti određene merljive veličine. Ove metode najčešće se koriste kada nam je dostupni samo izlazni signali iz posmatranog proces. Dozvoljene vrednosti veličina koje se prate mogu se postaviti u obliku fiksiranih ograničenja (pragova) ili u obliku promenljivih granica (prilagodljivih pragova). Metode zasnovane na obradi signala odlikuju jednostavnošću implementacije ali nažalost, ne pružaju mogućnost dalje analize uzroka pojave grešaka u sistemu.

Ako pretpostavimo da određeni signali iz procesa u sebi sadrže informacije o različitim radnim režimima u kojima se proces nalazi kao i da se pomenute informacije mogu izdvojiti u vidu obeležja ponašanja procesa tada se izdvajanje obeležja kao i dijagnostika kvarova na osnovu istih može vršiti uz pomoć odgovarajućih metoda obrade signala.

Tipične transformacije kojima se iz prostora merenih veličina iz procesa prelazi u prostor obeležja jesu:

- ***Obeležja u vremenskom domenu***

Za detekciju kvarova možemo koristiti statičke parametre signala kao što su aritmetičke ili kvadratne srednje vrednosti kao i statističke momente (srednja vrednost, varijansa) koji se odnose na amplitudu ili anvelopu signala. Detekcija se vrši izračunavanjem određenog obeležja signala a zatim poređenjem sa nominalnim vrednostima izračunatim kada je sistem u potpuno ispravnom stanju [47]. Promene srednje vrednosti i varijanse mogu biti uzrokovane pojavom kvara u sistemu ali i raznim poremećajima kao i promenama u samom upravljanju. Kod složenih dinamičkih sistema obično

može biti puno uzroka. Usled sporije dinamike sistema koji se prati, moguće je da detekcija kvara ima određeno kašnjenje, stoga ovaj metod nije pogodan za brzu detekciju neželjenih stanja.

Nešto složenije metode detekcije i izolacije kvarova zasnivaju se na praćenju i analizi trendova procesnih veličina.

- ***Obeležja u frekvencijskom domenu***

Osobine funkcija kao što su spektralna gustina snage, spektralna gustina energije, amplitudski spektar, fazni spektar često se koriste kao obeležja u procesu dijagnostike neželjenih stanja sistema. Signali procesnih veličina na koje se mogu primeniti ove transformacije u praksi su veoma raznoliki. Za detekciju kvarova na motorima najčešće se koriste signali struja statora i rotora [48] kao i vibracije [5,49]. Transformacije signala vibracija uspešno se primenjuju i na detekciju drugih kvarova kao što su kvarovi ležaja [50] ili zupčanika [51].

Metode zasnovane na obradi signala koriste se uglavnom za procese koji su stabilni. Primena ovih metoda i njihova efikasnost je veoma ograničena kada je u pitanju detekcija i izolacija kvarova dinamičkih sistema.

Detekcija kvarova zasnovana na statističkim podacima

Glavna karakteristika metoda koje pripadaju ovoj grupi jeste da one zahtevaju veliku količinu podataka iz procesa, kako onih koji su prikupljeni i snimljeni ranije tako i onih podataka koji se procesiraju u realnom vremenu. Za razliku od pristupa koji se zasnivaju na modelu procesa i gde je prethodno poznavanje procesa neophodno, kod metoda iz ove grupe potrebi su samo podaci iz procesa koji se dijagnostikuje. Kao što je rečeno u poglavlju 2.3. postoje različiti načini na koje se prikupljeni podaci mogu transformisati i tako predstavljati određeno znanje o procesu (ekstrakcija obeležja). Prema načinu ekstrakcije obeležja metode iz ove grupe mogu se podeliti na ***kvalitativne*** i ***kvantitativne***.

Najpoznatije ***kvalitativne*** metode iz ove grupe su **ekspertski sistemi** i **kvalitativna analiza trendova**.

Eksperski sistemi koji koriste ekstrakciju obeležja zasnovanu na pravilima imaju široku primenu u praksi. Eksperski sistemi su visoko specijalizovani sistemi koji rešavaju probleme u usko- stručnim oblastima. Glavne komponente eksperskih sistema su: akvizicija znanja, izbor prezentacije znanja, kodiranje baze znanja, generisanje procedura zaključivanja za potrebe dijagnostike i razvoj ulazno- izlaznog interfejsa. Glavne prednosti ovih metoda su jednostavnost implementacije, transparentnost zaključivanja kao i mogućnost davanja obrazloženja za predložena rešenja [18]. Sa druge strane, ove metode se teško ažuriraju i veoma su specifične za svaki sistem [52]. Postoje brojni radovi u kojima se raspravlja o specifičnim primenama eksperskih sistema u oblasti dijagnostike kvarova [6,8,24,28].

Kvalitativna analiza trendova i predikcija predstavljaju važan deo praćenja i nadzora procesa. Modelovanje trendova može se koristiti za tumačenje različitih dešavanja u procesu, za dijagnostiku neispravnog rada kao i za predikciju daljeg ponašanja sistema. Za izračunavanje trendova koji su previše osetljivi na šum potrebno je primeniti određeno filtriranje. Filtriranje, međutim, može dovesti do gubitka važnih informacija. Kod dijagnostike kvarova trendovi često daju važne informacije koje pružaju tumačenje ponašanja procesa. Različiti trendovi mogu se koristiti za detekciju neželjenih stanja sistema. Izborom pogodnog klasifikatora i analizom kretanja trendova procesa kvar se može otkriti ranije i time omogućiti brzu reakciju operatera. Primena ovih metoda može se pronaći u brojnim radovima [53,54,55,56].

Kada je reč o **kvantitativnim metodama** ekstrakcije obeležja tada najčešće govorimo o predavljanju problema dijagnostike kvarova kao problema prepoznavanja oblika. Cilj prepoznavanja oblika je klasifikacija podataka u, u opštem slučaju, unapred određene grupe (klase). **Statističke metode** koriste *a priori* poznavanje distribucije ovih klasa (Bajesov klasifikator) [57,58]. **Multivarijantne statističke metode** su veoma efikasne u sažimanju podataka i redukciji dimenzionalnosti i to na takav način da informacije od suštinske važnosti ostanu očuvane i budu jednostavnije za daljnju analizu. Ove metode, takođe, efikasno eliminišu uticaj šuma. PCA metoda koju je inicijalno predložio Pirson 1901. godine

[59] predstavlja standardnu metoda iz grupe multivarijantne statističke analize. Njena primena u dijagnostici može se naći u brojnim radovima [60,61,62]. **Veštačke neuronske mreže** imaju široku primenu u oblasti dijagnostike kvarova. Najčešće se koriste se za probleme klasifikacije.

Detekcija kvarova zasnovana na analitičkim modelima procesa – kvantitativni modeli

Osnovu metoda iz ove grupe čini analitički model posmatranog sistema koji predstavlja matematički opis (model) dinamike i glavnih obeležija procesa. Ove metode najčešće se sastoje iz dva dela:

1. ***generisanje reziduala***, odnosno signala koji predstavlja razliku između izmerenih vrednosti promenljivih procesa i njihovih estimiranih vrednosti na osnovu modela
2. ***procena reziduala i donošenje odluka***

Neke od najčešće primenjivanih metoda iz ove grupe su:

Metode identifikacije i estimacije parametara koriste se u cilju dijagnostike promena parametara procesa koji nisu direktno merljivi. Metode ove grupe zahtevaju što tačnije parametarske modele procesa. Potrebno je odrediti model procesa koji zavisi samo od ulaza i izlaza sistema u obliku $\mathbf{y}(t) = f(\mathbf{u}(t), \theta)$, gde $\mathbf{y}(t)$ predstavlja izlaz, $\mathbf{u}(t)$ ulaz sistema dok θ predstavlja nemerljive parametre posmatranog sistema. Parametri θ dobijaju se estimacijom. Postoji veza između parametara θ i fizičkih parametara sistema φ i nju možemo opisati funkcijom $\theta = g(\varphi)$. Koristeći neku od metoda prepoznavanja oblika sada možemo povezati promenu parametara θ sa pojavom kvara u sistemu [63]. U svom radu iz 1984. godine Izerman je predstavio različite tehnike za estimaciju parametara kao što su metod najmanjih kvadrata, estimacija diskretnim modelima i slično. Mana ovih metoda jeste u tome što zahtevaju tačan dinamički model sistema i računarski su veoma zahtevne kada se radi o velikim sistemima [16]. Neke od brojnih primena ovih metoda mogu se videti u [63,64,65,66].

Observeri (estimatori) stanja u suštini generišu skup reziduala uz pomoć kojih detektuju i izdvajaju različite kvarove procesa. Potrebno je da reziduali budu robusni u smislu da donošenje odluka o stanju sistema ne zavisi od šumova merenja ili nesigurnosti modela. U okviru ovog metoda projektuje se skup observera od kojih je svaki osetljiv na određen skup kvarova a neosetljiv na pojavu drugih kvarova ili nepoznate promene ulaza. Osnovna ideja jeste da, u slučaju da je sistem u nominalnom radnom režimu, observeri prate kretanje procesa i reziduali imaju male vrednosti. Kada se pojavi određeni kvar, observeri koji nisu osetljivi na taj kvar nastaviće da imaju male rezidualne. Sa druge strane, oni observeri koji su osetljivi na kvar koji se pojavio imaće značajno odstupanje od procesa i kao posledica toga reziduali će imati velike vrednosti. Ovaj metod omogućava, dakle, i jednostavnu izolaciju kvarova. Ozbiljan problem metoda za dijagnostiku kvarova zasnovanih na observerima predstavlja robusnost [67,68].

Paritetne jednačine predstavljaju redefinisane i najčešće transformisane varijante ulaz- izlaz modela ili modela u prostoru stanja procesa koji se posmatra [69]. U suštini, kod ove metode proverava se paritetnost (doslednost) procesa uz pomoć merenja izlaznih signala i poznatog ulaza. Ako se proces nalazi u nominalnom radnom režimu vrednosti paritetnih jednačina su jednake nuli. U praksi, ove vrednosti nikada nisu nula usled postojanja različitih šumova u procesu, nesigurnosti (netačnosti) modela, poremećaja u radu aktuatora, senzora i na kraju usled kvara u procesu. Paritetne jednačine prvi je uveo Vilski 1976. godine [70] a nakon toga su brojni naučnici razvijali ovaj metod [71,72].

Imajući u vidu relativne prednosti i mane prethodno opisanih postupaka za detekciju i izolaciju neželjenih stanja dinamičkih sistema može se zaključiti da nijedan pojedinačni metod ne poseduje sve poželjne osobine opisane u poglavlju 2.2. Ovo implicira da bi bilo dobro na pogodan način kombinovati ove postupke i time iskoristiti sve njihove prednosti a ujedno i prevazići njihova pojedinačna ograničenja. Posebno je važno istaći da ograničenja pojedinačnih metodologija često čine da su one teško primenjive u praksi. Izazovi koji se javljaju kod primene opisanih postupaka

2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja dinamičkih sistema

za dijagnostiku kvarova u velikim sistemima jesu složena arhitektura softvera, izvršavanje u realnom vremenu, testiranje i validacija, održavanje kao i odgovarajući korisnički interfejs [18].

Predloženi ekspertski sistem za dijagnozu kvarova pripada grupi takozvanih hibridnih metoda budući da (u određenoj meri) pripada različitim grupama prethodno opisanih metoda. Za razliku od tehnika zasnovanim na modelu procesa procedura koja je centralni deo ovog rada ne zahteva poznavanje tačnog modela već samo oblika modela posmatranog procesa. Zahtevani oblik modela podrazumeva da su unapred poznati red modela kao i vremensko kašnjenje modela. Metode koje se zasnivaju na modelu procesa su u opštem slučaju brže od predloženog ekspertskog sistema i kod njih se lako postiže izdvojivost. Ekspertski sistem koji je tema ovog rada može biti izdvojiv ukoliko pretpostavimo da nam je dostupno ekspertsko znanje koje možemo upotrebiti za tumačenje rezultata dobijenih iz sistema za nadzor. Glavna karakteristika procedura koje pripadaju grupi zasnovanoj na podacima jeste da one zahtevaju veliku količinu podataka iz procesa, kako onih koji su prikupljeni i snimljeni ranije tako i onih podataka koji se procesiraju u realnom vremenu. Predloženi ekspertski sistem ne zahteva veliku bazu prethodno snimljenih podataka, već samo podatke koji se trenutno mere u procesu. Za ekstrakciju obeležja koristi se Kalmanov filter koji estimira parametre odgovarajućeg linearnog modela procesa, što, između ostalog, omogućava rad sistema u realnim vremenu.

Većina postojećih tehnika za dijagnozu kvarova pretpostavljaju da je moguće unapred (*a priori*) odrediti sva stanja procesa pri čemu su neka označena kao nominalna a neka kao neispravna. U većini slučajeva međutim prilično je teško unapred predvideti sve moguće kvarove. Ovo je posebno slučaj u procesnoj industriji gde postrojenja deluju u dinamičnom okruženju i pod uticajem brojnih neizvesnih faktora.

Stoga bi bilo poželjno osmisliti dijagnostičke procedure koje su sposobne da uče iz procesnih promenljivih tako što bi identifikovale različite radne režime automatski.

Osnovno svojstvo postupka predloženog u ovom radu jeste da broj radnih režima (grupa) nije unapred određen i poznat, već se uči na osnovu raspoloživih podataka.

*2. Teorijske osnove i osnovni pojmovi u oblasti detekcije i izolacije neželjenih stanja
dinamičkih sistema*

Prethodna znanja o izvoru podataka (procesu koji stvara podatke), ukoliko su poznata mogu se koristiti za inicijalizaciju postupka (ekspertsko znanje) ili tumačenje dobijenih rezultata, ali postupak se može upotrebiti čak i ukoliko takva informacija nije dostupna. Podaci koji se grupišu ne moraju biti poznati unapred, niti u bilo kom trenutku postupak zahteva poznavanje čitavog skupa grupisanih podataka. Jedan od osnovnih prednosti predloženog postupka jeste jednostavna rekurzivna implementacija koja omogućava rad u realnom vremenu.

3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu

U okviru ovog poglavlja predstavimo jedan originalni i naučno-stručno verifikovani postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu [2,3,4]. Pored teorijskog značaja, ovaj algoritam ima i svoju praktičnu vrednost u svojoj implementaciji za detekciju grešaka u radu dinamičkih sistema, što je centralna tema ovog rada. Algoritam koji će biti predložen u nastavku zasniva se na pojmu informacionog potencijala tačke [73] (odnosno svojstva posmatranog procesa) u odnosu na uređeni skup tačaka (svojstava) uočenih u prethodnim trenucima vremena. Ovaj postupak nazivamo prilagodljivim algoritmom za jednovremeno grupisanje podataka zasnovanom na potencijalima, odnosno **PBRC** (engl. *Potential Based Recursive Clustering*) [4].

3.1. Pojam informacionog potencijala

U svom radu [10] Angelov i Filev predložili su prilagodljivi postupak za grupisanje podataka koji je zasnovan na pojmu *informacionog potencijala* [73]. Informacioni potencijal tačke u odnosu na uređeni skup tačaka predstavlja meru sličnosti između tačke i skupa.

Redefinisanje pojma informacionog potencijala u cilju prilagođavanja njegove primene u detekciji i izolaciji grešaka u radu dinamičkih sistema biće prikazano u nastavku.

Označimo sa $\mathbf{z}_i \in \mathbb{R}^n$ vektor svojstava izolovanih iz podataka o procesu u određenom trenutku vremena $i \in (0, 1, 2, \dots)$ i neka

$$\mathcal{Z}_k = (\mathbf{z}_0, \mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_k) \in \mathbb{R}_{k+1}^n = \underbrace{\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \times \dots \times \mathbb{R}^n}_{k+1 \text{ times}} \quad (3.1)$$

predstavlja uređeni skup svih svojstava procesa raspoloživih do vremenskog trenutka k . Neka je $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^n$ proizvoljna tačka u prostoru svojstava.

Srednje kvadratno rastojanje tačke \mathbf{z} u odnosu na uređeni skup \mathcal{Z}_k prema definiciji Angelova i Fileva [10,11] ima oblik

$$S(\mathbf{z}, \mathcal{Z}_k) = \frac{1}{1+k} \sum_{i=0}^k \|\mathbf{z} - \mathbf{z}_i\|_2^2 \quad (3.2)$$

gde je $\|\mathbf{q}\|_2^2 = \mathbf{q}^T \mathbf{q}$ standardana euklidska kvadratna norma vektora kolone $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$. Srednje kvadratno rastojanje može se posmatrati kao mera različitosti između tačke \mathbf{z} i skupa \mathcal{Z}_k koji sadrži trenutno dostupne vektore svojstava.

Informacioni potencijal prema definiciji Angelova i Fileva [10] predstavlja meru sličnosti između tačke \mathbf{z} i skupa \mathcal{Z}_k i ima oblik Košijeve funkcije srednjeg kvadratnog rastojanja

3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu

$$P(\mathbf{z}, \mathcal{Z}_k) = \frac{1}{1 + S(\mathbf{z}, \mathcal{Z}_k)} \quad (3.3)$$

Pošto je srednje kvadratno rastojanje $S(\mathbf{z}, \mathcal{Z}_k)$ uvek nenegativan broj bez obzira na to kako su dati \mathbf{z} i \mathcal{Z}_k sledi da će informacioni potencijal uvek pripadati opsegu

$$P(\mathbf{z}, \mathcal{Z}_k) \in (0, 1] \quad \forall \mathbf{z} \in \mathbb{R}^n, \quad \forall \mathcal{Z}_k \in \mathbb{R}_k^n. \quad (3.4)$$

Ukoliko je informacioni potencijal određene tačke \mathbf{z} u prostoru svojstava blizak jedinici, tada je odgovarajuće srednje kvadratno rastojanje malo, što znači da je tačka \mathbf{z} dobar predstavnik skupa tačaka koje pripadaju skupu \mathcal{Z}_k . Ako je, naprotiv, informacioni potencijal blizak nuli, tada je srednje kvadratno rastojanje veliko i tačka svojstava \mathbf{z} nije dobro opisana elementima skupa \mathcal{Z}_k .

Glavni koraci algoritama za grupisanje podataka Angelova i Fileva jesu:

1. Odrediti centre grupa (klastera) \mathbf{z}_i^* i tako inicijalizovati algoritam

- **AKO** je dostupno određeno ekspertsko znanje o procesu **ONDA**
početni centri klastera mogu se odrediti na osnovu tog znanja
- **U SUPROTNOM**
prvi vektor svojstava može biti proglašen za inicijalni centar klastera
- **KRAJ AKO- ONDA**

2. U svakom trenutku vremena $k \geq 0$ odrediti $\mathcal{Z}_k = (\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_k)$:

- Izračunati novi vektor svojstava \mathbf{z}_k
- Izračunati informacioni potencijal novog vektora svojstava u odnosu na skup svih prethodnih vektora svojstava $P(\mathbf{z}_k, \mathcal{Z}_k)$
- Ažurirati potencijale centara klastera $P_k(\mathbf{z}_i^*)$. Ažuriranje je neophodno

3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu

jer se mora uzeti u obzir uticaj novog vektora svojstava

- **AKO** je potencijal novog vektora svojstava veći od potencijala svih centara klastera **ONDA**:

- **AKO** je novi vektor svojstava blizu (bliže od unapred definisane minimalne razdaljine) postojećeg centra klastera **ONDA**

zameniti taj centar klastera novim vektorom svojstava

- **KRAJ AKO- ONDA**

- **AKO** je novi vektor svojstava daleko od svih postojećih centara **ONDA**

proglasiti tekući vektor svojstava za novi centar klastera

- **KRAJ AKO- ONDA**

- **KRAJ AKO- ONDA**

Značaj pojave nove grupe podataka (novog klastera) najbolje opisuje sledeći pasus citiran iz [16]:

„Pojava novog pravila označava oblast u prostoru podataka koja nije bila pokrivena inicijalnim podacima za obuku. Ona može označavati novi radni režim sistema ili reakciju sistema na nove poremećaje. U praksi, mnogi radni režimi i stanja procesa ne mogu se praktično uvrstiti u trening skup (na primer radni režimi sa greškom), ali se takva stanja mogu vrlo verovatno pojaviti tokom rada procesa.“

Kod primene ovih pojmova i mera u rešavanju problema detekcije grešaka u radu dinamičkih sistema, međutim, postoje određeni problemi. Zapravo, u definicijama (3.2) i (3.3) uzima se u obzir čitava istorija procesa. U radu realnih dinamičkih procesa, greške se najčešće dešavaju nakon dugog perioda ispravnog rada. Kao rezultat toga, odmah nakon pojave greške, broj vektora koji predstavljaju neispravno stanje sistema u skupu Z_k biće značajno manji nego odgovarajući broj vektora svojstava koji predstavljaju ispravno funkcionisanje sistema. Vektor svojstava

3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu

dobijen odmah nakon pojave greške imaće veliku vrednost srednjeg kvadratnog rastojanja i , samim tim, malu vrednost informacionog potencijala koja će polako rasti sa vremenom. Kada se greška u radu sistema pojavi nakon dugog vremenskog perioda rada u ispravnom režimu, algoritmu baziranom na informacionom potencijalu potreban je dug vremenski interval da uvede režim sa greškom kao radni režim u kome se proces nalazi.

U ovom radu biće predložene drugačije, izmenjene mere i ocene sličnosti u cilju prevazilaženja gore pomenutih problema i mana postupka. Definisane ovih pojmova na drugačiji način doprineće većoj osetljivosti postupka za detekciju grešaka na nove radne režime i mogućnosti da se brže detektuje pojava različitih tipova grešaka.

Osnovna ideja jeste da se u samoj definiciji informacionog potencijala prida više važnosti skorašnjoj istoriji procesa. Ovo je učinjeno uvođenjem pojma **faktora zaboravljanja**. **Faktor zaboravljanja** zapravo definiše dužinu memorije algoritma, odnosno broj predhodnih vrednosti svojstava koje efektivno utiču na vrednost informacionog potencijala.

Uvedimo pojam **ponderisanog srednjeg kvadratnog rastojanja** sa **faktorom zaboravljanja** λ vektora svojstava \mathbf{z} u odnosu na skup \mathcal{Z}_k na sledeći način

$$S_\lambda(\mathbf{z}, \mathcal{Z}_k) = (1 - \lambda) \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} \|\mathbf{z} - \mathbf{z}_i\|_{\mathbf{W}}^2 \quad (3.5)$$

gde $\lambda \in (0,1)$ predstavlja **faktor zaboravljanja** a $\|\mathbf{q}\|_{\mathbf{W}}^2 = \mathbf{q}^T \mathbf{W} \mathbf{q}$ je **ponderisana euklidska norma**. Težinska matrica \mathbf{W} je obično dijagonalna, pozitivno definitna matrica dimenzija n . Težinska matrica zapravo definiše skaliranje i rotaciju vektora svojstava pre izračunavanja rastojanja čime se postiže veća prilagodljivost ove neizotropne mere u prostoru vektora svojstava.

Faktor zaboravljanja efektivno smanjuje istoriju procesa koja se uzima u obzir tako što daje veću važnost svojstvima iz bliže istorije a manju važnost starijim svojstvima. Faktor $(1 - \lambda)$ na početku izraza (3.5) ima samo funkciju normalizacije.

3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu

Analogno sa (3.3) sada možemo da **definišemo ponderisani informacioni potencijal sa faktorom zaboravljanja**

$$P_{\lambda}(\mathbf{z}, \mathcal{Z}_k) = \frac{1}{1 + S_{\lambda}(\mathbf{z}, \mathcal{Z}_k)} \quad (3.6)$$

Ponderisani informacioni potencijal sa faktorom zaboravljanja tačke \mathbf{z} u odnosu na skup \mathcal{Z}_k može se posmatrati kao realno preslikavanje ponderisanog srednjeg kvadratnog rastojanja $P(\mathbf{z}, \mathcal{Z}, \lambda) \equiv P(S(\mathbf{z}, \mathcal{Z}, \lambda))$ sa sledećim osobinama:

Za svako $S \geq 0$ važi

(O1) $P(S) \in (0, 1]$

(O2) $P(S) = 1 \Leftrightarrow S = 0$

(O3) $P(S) = 0 \Leftrightarrow S \rightarrow \infty$

(O4) P je diferencijabilna, monotono opadajuća funkcija od S , $P'(S) < 0$

Prva osobina (O1) jednostavno govori o tome da informacioni potencijal može imati vrednost iz intervala $[0, 1]$. Osobina (O2) tvrdi da tačka \mathbf{z} ima potencijal jednak 1 ako i samo ako su sve tačke iz \mathcal{Z} jednake \mathbf{z} , odnosno ako i samo ako

$$\forall \mathbf{z}_j \in \mathcal{Z}, \mathbf{z} = \mathbf{z}_j.$$

Treća osobina (O3) kaže da potencijal tačke \mathbf{z} ima vrednost jednaku nuli ako i samo ako njeno rastojanje od barem jedne tačke iz \mathcal{Z} raste bez ograničenja (ovo je situacija koju ne očekujemo u praksi). Osobina (O4) tvrdi da postoji dobro definisana inverzna funkcija $P^{-1}: [0, 1] \rightarrow [0, \infty]$. Lako se vidi da funkcija Košijevog tipa (3.6) ima sve osobine (O1)-(O4).

Prednosti upotrebe modifikovanog informacionog potencijala (3.6) u odnosu na prethodnu definiciju (3.3) prikazaćemo u narednom primeru.

3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu

Primer 1. Posmatrajmo (izmišljen) proces koji ima skalarni prostor svojstava $z \in \mathbb{R}$. Neka vrednost nula $z = z_n = 0$ odgovara nominalnom režimu rada i neka vrednost jedan $z = z_f = 1$ označava pojavu greške u radu procesa. Neka se proces na početku nalazi u nominalnom režimu rada i neka se greška pojavi počevši od k_0 - tog trenutka, odnosno

$$z_k = \begin{cases} 0 & 0 \leq k < k_0 \\ 1 & k > k_0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Greška u radu procesa biće detektovana onog trenutka kada informacijski potencijal tačke svojstva koje označava grešku z_f u odnosu na (istorijski) skup svojstava \mathcal{Z}_k postane veći od informacijskog potencijala tačke koja označava nominalni režim rada z_n (ili analogno, kada srednje kvadratno rastojanje postane manje).

Cilj ovog primera jeste analiza performansi prethodno opisanog postupka za detekciju greške u slučaju kada se koriste konvencionalna i modifikovana definicija informacijskog potencijala.

Neka je srednje kvadratno rastojanje definisano izrazom (3.2), odnosno bez faktora zaboravljanja. U proizvoljnom trenutku $k \geq k_0$ nakon pojave greške imamo da je

$$S(z_n, \mathcal{Z}_k) = S(0, \mathcal{Z}_k) = \frac{k - k_0 + 1}{k + 1}$$

$$S(z_f, \mathcal{Z}_k) = S(1, \mathcal{Z}_k) = \frac{k_0}{k + 1}.$$

Greška je detektovana u trenutku $k = k^d$ tako da je

$$S(z_f, \mathcal{Z}_{k^d}) < S(z_n, \mathcal{Z}_{k^d}) \Rightarrow k^d = 2k_0 - 1. \quad (3.8)$$

Trenutak detekcije greške k^d izračunat u (3.8) zavisi od trenutka kada se greška pojavila u sistemu. **Kašnjenje detekcije** (broj odabiraka između stvarnog događaja pojave greške i detekcije iste), $k^d - k_0$ takođe zavisi od trenutka kada se

3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu

greška pojavila, odnosno kašnjenje detekcije se povećava sa povećanjem vremena k_0 kada se greška dogodila. Ovo je, svakako, nepoželjna osobina. Bilo bi poželjno projektovati algoritam za detekciju grešaka kod koga je kašnjenje detekcije nezavisno od toga u kom se vremenskom trenutku greška pojavljuje u sistemu. Pokazaćemo da u slučaju kada koristimo modifikovane definicije informacionog potencijala, odnosno ponderisano srednje kvadratno rastojanje, algoritam ima baš ove osobine.

Ako umesto definicije (3.2) iskoristimo definiciju (3.5) sa težinskom matricom $\mathbf{W}=1$, srednje kvadratno rastojanje nominalnog i radnog režima sa greškom postaje

$$S_\lambda(z_n, \mathcal{Z}_k) = S_\lambda(0, \mathcal{Z}_k) = 1 - \lambda^{k-k_0+1}$$

$$S_\lambda(z_f, \mathcal{Z}_k) = S_\lambda(1, \mathcal{Z}_k) = \lambda^{k-k_0+1}(1 - \lambda^{k_0}).$$

Greška je detektovana u trenutku $k = k^d$ tako da je

$$S_\lambda(z_f, \mathcal{Z}_{k^d}) < S_\lambda(z_n, \mathcal{Z}_{k^d}) \Rightarrow k^d > k_0 - 1 + \log_\lambda \frac{1 + \lambda^{k^d+1}}{2}.$$

Kašnjenje detekcije $k^d - k_0$ je sada ograničeno. Zapravo, jednostavno se dolazi do izraza

$$k^d - k_0 \approx -1 + \log_\lambda 0.5$$

što znači da je, osim u kratkom početnom periodu, kašnjenje detekcije nezavisno od vremenskog trenutka u kome se greška dogodila, kao što smo i želeli. Ovim primerom pokazali smo da predložene modifikovane definicije informacionog potencijala i srednjeg kvadratnog rastojanja daju bolje rezultate u detekciji grešaka. \square

Ponderisano srednje kvadratno rastojanje (3.5) i ponderisani informacioni potencijal (3.6) mogu imati primenu u praćenju procesa u realnom vremenu samo

3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu

ukoliko se može naći rekurzivna formula za njihovo jednovremeno izračunavanje. U nastavku je data **Teorema 1** koja je posvećena rešavanju ovog problema i koja predstavlja rekurzivni algoritam za jednovremeno izračunavanje pomenutih mera u opštem slučaju kada se vektor svojstava \mathbf{z} , koji predstavlja argument izraza (3.5) i (3.6), menja sa vremenom i označen je sa \mathbf{z}_k .

Teorema 1. Neka je $S_k = S_\lambda(\mathbf{z}_k, \mathcal{Z}_k)$ ponderisano srednje kvadratno rastojanje vremenski promenljivog vektora svojstava \mathbf{z}_k u trenutku vremena k ($k = 0, 1, 2, \dots$) u odnosu na uređeni istorijski skup svojstava \mathcal{Z}_k . Tada, za svako $k \geq 1$ važi sledeća rekurzivna veza

$$S_k = \lambda S_{k-1} + 2\lambda(1-\lambda)(\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k-1})^T \mathbf{W}\mathbf{F}_k + \lambda(1-\lambda)\|\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k-1}\|_{\mathbf{W}}^2 Z_k \quad (3.9)$$

gde je

$$\mathbf{F}_k = \lambda \mathbf{F}_{k-1} + \lambda Z_{k-1}(\mathbf{z}_{k-1} - \mathbf{z}_{k-2}) \quad (3.10)$$

odnosno

$$Z_k = \lambda Z_{k-1} + 1 \quad (3.11)$$

gde su $\mathbf{F}_k \in \mathbb{R}^n$, $Z_k \in \mathbb{R}$, i važe početni uslovi:

$$S_0 = 0, \mathbf{F}_0 = 0, Z_0 = 0 \quad (3.12)$$

Dokaz: Primitimo da za proizvoljno $\mathbf{z}_k, \mathbf{z}_i \in \mathbb{R}^n$ važi standardna osobina kvadratne norme

$$\begin{aligned} \|\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_i\|_{\mathbf{W}}^2 &= (\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_i)^T \mathbf{W}(\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_i) \\ &= (\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k-1} + \mathbf{z}_{k-1} - \mathbf{z}_i)^T \mathbf{W}(\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k-1} + \mathbf{z}_{k-1} - \mathbf{z}_i) \\ &= (\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k-1})^T \mathbf{W}(\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k-1}) + 2(\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k-1})^T \mathbf{W}(\mathbf{z}_{k-1} - \mathbf{z}_i) \\ &\quad + (\mathbf{z}_{k-1} - \mathbf{z}_i)^T \mathbf{W}(\mathbf{z}_{k-1} - \mathbf{z}_i) \\ &= \|\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k-1}\|_{\mathbf{W}}^2 + 2(\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k-1})^T \mathbf{W}(\mathbf{z}_{k-1} - \mathbf{z}_i) + \|\mathbf{z}_{k-1} - \mathbf{z}_i\|_{\mathbf{W}}^2 \end{aligned} \quad (3.13)$$

3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu

Koristeći prethodno napisanu relaciju, ponderisano srednje kvadratno rastojanje možemo napisati kao

$$\begin{aligned}
 S_k &= (1-\lambda) \sum_{i=0}^k \lambda^{k-i} \|\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_i\|_{\mathbf{W}}^2 = (1-\lambda) \sum_{i=0}^{k-1} \lambda^{k-i} \|\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_i\|_{\mathbf{W}}^2 \\
 &= (1-\lambda) \sum_{i=0}^{k-1} \lambda^{k-i} \|\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k-1}\|_{\mathbf{W}}^2 + 2(1-\lambda) \sum_{i=0}^{k-1} \lambda^{k-i} (\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k-1})^T \mathbf{W} (\mathbf{z}_{k-1} - \mathbf{z}_i) \\
 &\quad + (1-\lambda) \sum_{i=0}^{k-1} \lambda^{k-i} \|\mathbf{z}_{k-1} - \mathbf{z}_i\|_{\mathbf{W}}^2
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Definišimo sada

$$\mathbf{Z}_k = \sum_{i=0}^{k-1} \lambda^{k-i} \tag{3.15}$$

Tada, prvi izraz sa desne strane jednakosti (3.14) postaje

$$(1-\lambda) \sum_{i=0}^k \lambda^{k-i} \|\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_i\|_{\mathbf{W}}^2 = (1-\lambda) \mathbf{Z}_k \|\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k-1}\|_{\mathbf{W}}^2 \tag{3.16}$$

Ako uvedemo meru

$$\mathbf{F}_k = \sum_{i=0}^{k-1} \lambda^{k-i} (\mathbf{z}_{k-1} - \mathbf{z}_i) = \sum_{i=0}^{k-2} \lambda^{k-i} (\mathbf{z}_{k-1} - \mathbf{z}_i) \tag{3.17}$$

tada se drugi izraz sa desne strane jednakosti (3.14) može napisati kao

$$2(1-\lambda) \sum_{i=0}^{k-1} \lambda^{k-i} (\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k-1})^T \mathbf{W} (\mathbf{z}_{k-1} - \mathbf{z}_i) = 2(1-\lambda) (\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{k-1})^T \mathbf{W} \mathbf{F}_k \tag{3.18}$$

Ako uzmemo u obzir definiciju (3.5) poslednji izraz sa desne strane (3.14) može se napisati kao

3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu

$$(1-\lambda)\sum_{i=0}^{k-1}\lambda^{k-i}\|\mathbf{z}_{k-1}-\mathbf{z}_i\|_{\mathbf{W}}^2=\lambda S_{k-1} \quad (3.19)$$

Uvrštavanjem jednačina (3.15), (3.17) i (3.19) u izraz (3.14) lako dolazimo do rekurzivne jednačine (3.9). Primitimo da vektor \mathbf{F}_k takođe možemo napisati u takvom obliku, da važi sledeća rekurzija

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_k &= \sum_{i=0}^{k-2}\lambda^{k-i}(\mathbf{z}_{k-1}-\mathbf{z}_{k-2}+\mathbf{z}_{k-2}-\mathbf{z}_i) = \sum_{i=0}^{k-2}\lambda^{k-i}(\mathbf{z}_{k-1}-\mathbf{z}_{k-2}) + \sum_{i=0}^{k-2}\lambda^{k-i}(\mathbf{z}_{k-2}-\mathbf{z}_i) \\ &= \lambda Z_{k-1}(\mathbf{z}_{k-1}-\mathbf{z}_{k-2}) + \lambda \mathbf{F}_{k-1} \end{aligned} \quad (3.20)$$

što direktno predstavlja jednačinu (3.10). Na kraju, rekurzivna jednačina (3.11) (dobija se direktno iz definicije (3.15)).

Teorema 1 je dokazana. \square

Napomena 1. Izračunavanje skalara Z_k prema formuli (3.15) očigledno ne zavisi od trenutno procesirane vrednosti vektora svojstava. Ako upotrebimo dobro poznatu osobinu geometrijskih progresija mogli bi smo direktno da zamenimo rekurzivnu formulu (3.11) sledećom formulom

$$Z_k = \frac{1-\lambda^k}{1-\lambda} \quad (3.21)$$

Loša osobina prethodne jednakosti jeste to da čitava rekurzija zavisi eksplicitno samo od diskretne vremenske promenljive k , što je razlog zašto nju nećemo koristiti.

Sledeća **Teorema 2** predstavlja korisnu rekurziju za efikasno izračunavanje pomderisanog srednjeg kvadratnog rastojanja (3.5) u specijalnom slučaju kada je vektor svojstava \mathbf{z} , koji predstavlja prvi argument fiksiran, ali se skup podataka (prethodnih vektora svojstava) ažurira.

3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu

U okviru priče o algoritmu za grupisanje podataka koji je tema ovog rada, ponderisano srednje kvadratno rastojanje se mora računati kako za vremenski promenljive tako i za fiksirane vektore svojstava te je zato rezultat **Teoreme 2** od velikog značaja.

Teorema 2. Neka je \mathbf{z} proizvoljni fiksirani vektor svojstava i neka je \mathcal{Z}_k vremenski promenljiv istorijski skup svojstava (3.1). Tada, za svako $k \geq 1$ važi rekurzivna relacija

$$S_\lambda(\mathbf{z}, \mathcal{Z}_k) = \lambda S_\lambda(\mathbf{z}, \mathcal{Z}_{k-1}) + (1 - \lambda) \|\mathbf{z} - \mathbf{z}_k\|_{\mathbf{W}}^2 \quad (3.22)$$

uz početni uslov $S(\mathbf{z}, \mathcal{Z}_0) = \|\mathbf{z} - \mathbf{z}_0\|_{\mathbf{W}}^2$.

Dokaz. Jednostavnim permutacijom definicije (3.5) možemo napisati sledeće relacije što ujedno predstavlja dokaz Teoreme 2.

$$\begin{aligned} S_\lambda(\mathbf{z}, \mathcal{Z}_k) &= (1 - \lambda) \sum_{i=0}^k \lambda^{k-i} \|\mathbf{z} - \mathbf{z}_i\|_{\mathbf{W}}^2 \\ &= (1 - \lambda) \sum_{i=0}^{k-1} \lambda^{k-i} \|\mathbf{z} - \mathbf{z}_i\|_{\mathbf{W}}^2 + (1 - \lambda) \|\mathbf{z} - \mathbf{z}_k\|_{\mathbf{W}}^2 \\ &= \lambda S_\lambda(\mathbf{z}, \mathcal{Z}_{k-1}) + (1 - \lambda) \|\mathbf{z} - \mathbf{z}_k\|_{\mathbf{W}}^2 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Teorema 2 je dokazana. \square

Napomena 2. Prehodna Teorema 2, posebno relacija (3.22) ilustruje značenje faktora zaboravljanja λ i njegovu ulogu u vremenskom izračunavanju ponderisanog srednjeg kvadratnog rastojanja $S_\lambda(\mathbf{z}, \mathcal{Z}_k)$. Ova Teorema pokazuje da se mera $S_\lambda(\mathbf{z}, \mathcal{Z}_k)$ zapravo može posmatrati kao izlazni signal diskretnog niskopropusnog filtra čiji je ulaz ponderisano srednje kvadratno rastojanje vektora svojstava \mathbf{z} i poslednjeg

izračunatog (dobijenog) vektora svojstava \mathbf{z}_k . Pol ovog diskretnog filtra se nalazi u λ .

3.2. Opis postupka

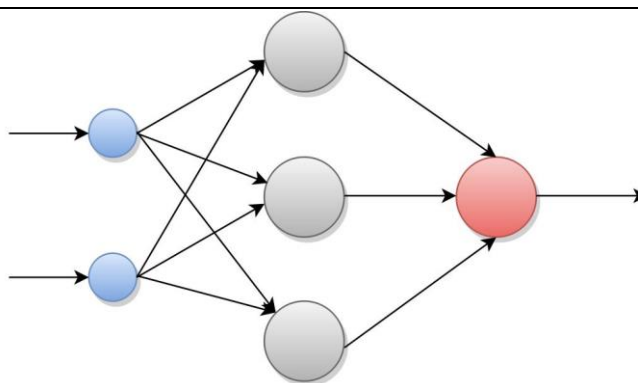
Postupak koji će biti prikazan u nastavku inspirisan je algoritmom koji je originalno prikazan u radu čiji su autori Angelov i Filev [10]. Jedna od najznačajnijih razlika je u tome što će informacioni potencijali biti računat po formuli (3.6) umesto po formuli (3.3). Kao što smo pokazali u Primeru 1, ova modifikacija će nam omogućiti da ubrzamo detekciju novih radnih režima.

Informacioni potencijal definisan u prethodnom odeljku definiše stepen sličnosti između tekućeg vektora svojstva i svih vektora svojstava koja su se javljala tokom skorije istorije odvijanja procesa. Ako na odgovarajući način definišemo svojstva, informacioni potencijal nam pruža informaciju o sličnosti tekućeg radnog stanja sa radnim stanjima koja su bila prisutna tokom skorije istorije procesa. Ukoliko je potencijal tekućeg svojstva visok tada tekuće radni režim liči na prethodna radne režime, pa zaključujemo da nije došlo do promene u ponašanju procesa. Ukoliko je međutim potencijal tekućeg radnog režima nizak, odnosno ukoliko naglo opadne, tada se može reći da je došlo do promene radnog režima.

3.2.1 Inicijalizacija baze znanja

Bazu znanja prikazanog algoritma kao i tok informacija možemo predstaviti u vidu samopodešavajuće veštačke neuronske mreže. Struktura ovakve mreže prikazana je na slici 8.

3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu



Slika 8. Opšta struktura baze znanja prilagodljivog algoritma

Skriveni slojevi veštačke neuronske mreže predstavljaju čvorove algoritma. Kada novi vektor svojstava postane dostupan, upoređujemo ga sa već postojećim čvorovima kao kod veštačke neuronske mreže sa radijalnim baznim funkcijama (*Radial Basis Function Neural Network*). Za razliku od ovih mreža gde se za poređenje koristi euklidsko rastojanje, kod PBRC algoritma koristimo informacijski potencijal što doprinosi povećanju otpornosti na šum kao što je pokazano u [10].

Ponekad nam je na osnovu inženjerskog poznavanja procesa unapred poznat određen broj tipičnih radnih stanja (uključujući i ispravna i neispravna stanja). Označimo sa M_n broj unapred poznatih ispravnih radnih stanja procesa a sa M_f broj unapred poznatih neispravnih radnih stanja (radnih stanja u kojima je došlo do greške). Neka je sada $M = M_n + M_f$ ukupan broj poznatih radnih stanja procesa.

Za svako unapred poznato radno stanje identifikujemo oblast koja mu odgovara u prostoru svojstava i za karakterističnu tačku ovih oblasti biramo centar mase. Ove karakteristične tačke nazivamo je **čvorovima** i označavamo ih sa \mathbf{z}_i^* ($i = 1, \dots, M$). Skup svih čvorova čini inicijalnu bazu znanja algoritma.

Ukoliko se pojavi novo radno stanje, struktura mreže se proširuje dodavanjem čvorova u skriveni sloj.

3.2.2 Klasifikacija sa statičnom bazom znanja

Na osnovu skupa svojstava koja su se javljala tokom skorije istorije procesa (3.1) u svakom trenutku odabiranja algoritam izračunava informacioni potencijal za svaki čvor $P(\mathbf{z}_i^*, \mathcal{Z}_k)$. Onaj čvor koji ima najveći informacioni potencijal nazivamo **aktivni čvor** i smatramo da on najbolje opisuje trenutno radno stanje u odnosu na prethodnu istoriju procesa.

Kao rezultat, radno stanje opisano aktivnim čvorom proglašavamo za tekuće radno stanje procesa.

Važna osobina informacionog potencijala jeste da se klasifikacija ne vrši samo na osnovu tekućeg vektora svojstava već na osnovu čitave skorije istorije procesa. S obzirom da tekući vektor svojstava može biti oštećen usled šuma ili neadekvatan usled raznih drugih razloga, akumulirane informacije koje sadrži informacioni potencijal garantuju nam određeni nivo robusnosti (otpornosti na šum) samog algoritma.

Glavni nedostatak ovakvog statičkog pristupa (u smislu da je baza znanja unapred određena i nepromenljiva) jeste to što je prethodno poznavanje ponašanja procesa u praksi ograničeno i nekompletno. Moguće je da oblast u prostoru svojstava koja predstavlja neko unapred poznato radno stanje nije dobro određena, ili da se iz nekog razloga pomerila u toku vremena. Tada prethodno odabrani čvorovi ne predstavljaju najbolje odgovarajuće radno stanje. Takođe, moguće je da proces koji posmatramo počne kompletno drugačije da se ponaša od svih radnih stanja koja su unapred opisana. Sve ovo govori u prilog tome da statička baza znanja koja se vremenom ne menja nije najbolje rešenje. U slučaju kada nam je dostupan analitički model sistema ovaj problem se relativno lako rešava. U praksi, međutim, najčešće je dostupno nemamo dovoljno podataka koji pripadaju neželjenim stanjima režimima što predstavlja ozbiljan problem u postizanju identifikacije novih radnih režima. Uprkos tome, mogućnost identifikacija novina jeste veoma poželjna osobina svakog sistema za dijagnozu kvarova.

3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu

Uvođenje metoda za modifikacije ili proširivanje baze znanja (odnosno, uvođenje sposobnosti učenja sistema za grupisanje podataka) značajno doprinosi povećanju pouzdanosti i robusnosti algoritma.

3.2.3 Prilagodljiva baza znanja

Da bi smo obezbedili prilagođavanje baze znanja u vremenu, potrebno je da u svakom trenutku odabiranja osim informacionog potencijala svih čvorova $P(\mathbf{z}_i^*, \mathcal{Z}_k)$ paralelno računamo i informacioni potencijal tekućeg vektora svojstava $P(\mathbf{z}_k, \mathcal{Z}_k)$. Odgovarajući postupci za rekurzivno izračunavanje informacionog potencijala u slučajevima kada je vektor svojstava vremenski promenljiv ili fiksiran dati su u Teoremi 1 i Teoremi 2, respektivno.

Usled blagih varijacija samog procesa, većinu vremena informacioni potencijal tekućeg vektora svojstava je manji od informacionog potencijala aktivnog čvora. Onog trenutaka kada informacioni potencijal novog vektora svojstava postane veći od informacionog potencijala svih postojećih čvorova, novi vektor svojstava zapravo bolje opisuje tekući radni režim nego postojeći čvorovi, tako da bi baza znanja trebala da se na odgovarajući način prilagodi promeni.

U [10] Angelov i Filev predložili su sledeći uslov za modifikaciju baze znanja

$$P(\mathbf{z}_k, \mathcal{Z}_k) > \max_i P(\mathbf{z}_i^*, \mathcal{Z}_k) \quad (3.24)$$

U ovom radu mi ćemo koristiti ponderisani informacioni potencijal (3.6) ali ćemo predložiti i strožiji uslov od (3.24):

$$P_\lambda(\mathbf{z}_k, \mathcal{Z}_k) > \max_i P_\lambda(\mathbf{z}_i^*, \mathcal{Z}_k) + P_{th} \quad (3.25)$$

Primetimo da se uslov (3.25) može zameniti ekvivalentnim uslovom

$$P_\lambda^{-1}(\mathbf{z}_k, \mathcal{Z}_k) < \max_i P_\lambda^{-1}(\mathbf{z}_i^*, \mathcal{Z}_k) + P_{th,1} \quad (3.26)$$

što dovodi do smanjenja broja operacija koji treba izvesti u svakom trenutku odabiranja sobzirom da se najpre računa $P_{\lambda}^{-1}(\mathbf{z}_k, \mathcal{Z}_k) = 1 + S_{\lambda}(\mathbf{z}_k, \mathcal{Z}_k)$. Parametari P_{th} odnosno $P_{th,1}$ predstavljaju eksperimentalno određene pozitivne vrednosti praga. Pokazalo se da korišćenje uslova (3.25) ili (3.26) umesto uslova (3.24) dovodi do poboljšanja robusnosti algoritma kada su merenja višestruko opterećena šumom.

U samom algoritmu postoje dve različite akcije koje se mogu preduzeti kada je uslov (3.25) odnosno (3.26) ispunjen:

- Zameniti postojeći čvor novim vektorm svojstava \mathbf{z}_k ili
- Dodati novi čvor na mestu novog vektora svojstava \mathbf{z}_k

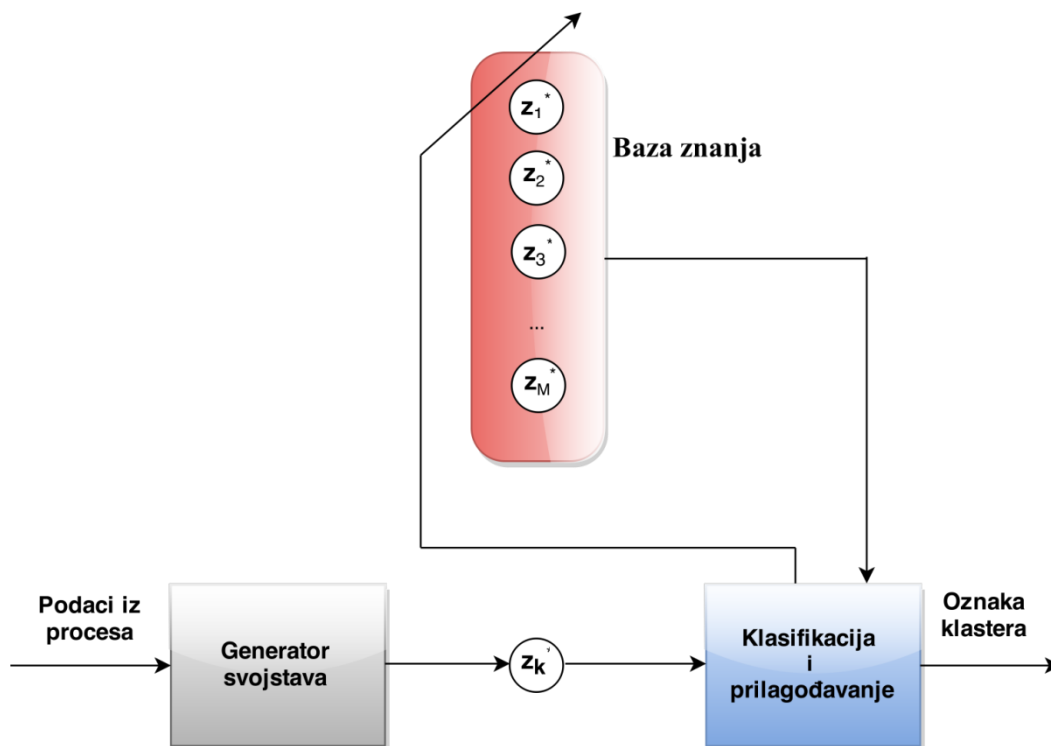
Jasno je da ćemo odluku o da zamenimo postojeći čvor novim vektorom svojstava doneti u slučaju kada je novi vektor blizu postojećih čvorova. Pod merom blizine podrazumevamo ponderisanu euklidsku normu $\|\cdot\|_w$. Dakle, kada je ispunjen uslov

$$\min_i \|\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_i^*\|_w < d_{\min} \quad (3.27)$$

gde je d_{\min} prilagodljivo minimalno željeno rastojanje između različitih čvorova, tada najbliži čvor menjamo novodostupnim vektorom svojstava \mathbf{z}_k .

Ukoliko je novi vektor svojstava \mathbf{z}_k daleko od bilo kog postojećeg čvora, smatramo da je uočeno novo radno stanje koje se razlikuje od svih pređašnjih radnih stanja, i tada novi vektor svojstava proglašavamo novim čvorom i time zapravo proširujemo bazu znanja. Blok dijagram na slici 9 prikazuje strukturu prilagodljivog algoritma za grupisanje podataka.

3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu



Slika 9. Blok dijagram prilagodljivog algoritma za klasifikaciju

Slika 10 prikazuje pseudo kod PBRC algoritma. Primetimo da se informacioni potencijali postojećih čvorova i tekućeg vektora svojstava računaju prema porcedurama opisanim u **Teoremi 2**, odnosno **Teoremi 1**.

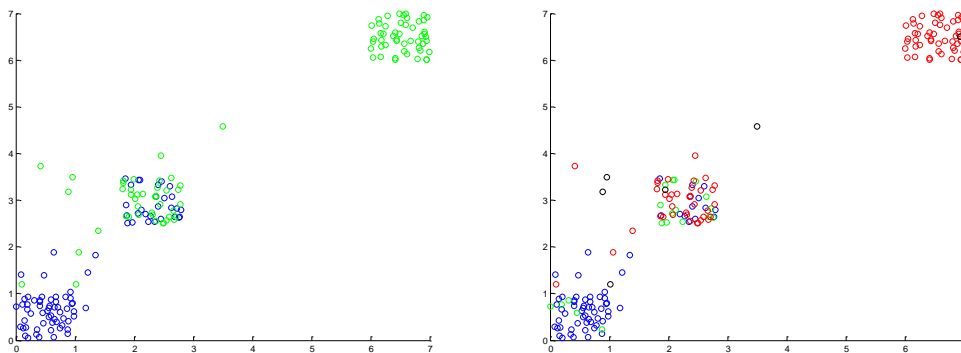
3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu

1. Odabrati odgovarajući generator vektora svojstava
 2. Odabrati početne čvorove \mathbf{z}_i^*
 3. Odabrati parametre algoritma
 - faktor zaboravljanja λ
 - prag informacionog potencijala P_{th}
 - minimalno rastojanje čvorova d_{min}
 4. U svakom trenutku odabiranja
 - izmeriti ili izračunati tekući vektor svojstava \mathbf{z}_k
 - izračunati (na osnovu **Teoreme 1**) informacioni potencijal tekućeg vektora svojstava \mathbf{z}_k , $P(\mathbf{z}_k, \mathcal{Z}_k)$
 - izračunati (na osnovi Teoreme 2) informacioni potencijal postojećih čvorova, $P(\mathbf{z}_k, \mathcal{Z}_k)$
 - **AKO** je informacioni potencijal tekućeg stanja veći od informacionog potencijala svih čvorova **ONDA**
 - **AKO** je tekuće stanje blizu nekom od postojećih čvorova **ONDA**
 - zameni postojeći čvor tekućim vektorom svojstava \mathbf{z}_k
 - **U SUPROTNOM**
 - dodaj novi čvor koji odgovara tekućem stanju
 - **KRAJ AKO-ONDA**
 - **KRAJ AKO-ONDA**
 - Označiti čvor sa najvećim informacionim potencijalom kao aktivni čvor
-

Slika 10. Pseudo kod PBRC algoritma

3. Prilagodljivi postupak za grupisanje i razvrstavanje podataka u realnom vremenu

Parametri algoritma (faktor zaboravljanja λ , prag informacionog potencijala P_{th} i minimalno rastojanje čvorova d_{min}) moraju biti pažljivo odabrani. Oni su specifični za svaki sistem i najčešće je potrebno njihove vrednosti podesiti kroz niz numeričkih eksperimenata što je bio slučaj i u ovom radu. Kao što je već rečeno u prethodnom poglavlju, faktor zaboravljanja efektivno smanjuje istoriju procesa koja se uzima u obzir tako što daje veću važnost svojstvima iz bliže istorije a manju važnost starijim svojstvima. Parametar P_{th} predstavlja eksperimentalno određene pozitivnu vrednost praga čije uvođenje i pažljivo odabiranje dovodi do poboljšanja robusnosti algoritma pogotovu kada su merenja višestruko opterećena šumom. Slika 11 prikazuje primer grupisanja i razvrstavanja podataka primenom predloženog PBRC algoritma i uticaj parametra d_{min} . U prvom slučaju (slika 11. levo) vrednost d_{min} je relativno velika, te se podaci razvrstavaju u samo dve grupe. Sa smanjenjem dozvoljenog rastojanja između čvorova, algoritam prepoznaje tri grupe podataka (slika 11. desno).



Slika 11. Rezultati grupisanja i razvrstavanja podataka sa različitim vrednostima d_{min} . Levo $d_{min}=0.7$, desno $d_{min}=0.3$

4. Prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju neželjenih stanja dinamičkih sistema

U okviru ovog poglavlja predstavimo prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju grešaka u radu dinamičkih sistema. Projektovani ekspertski sistem za svoju osnovu ima prilagodljivi algoritam za jednovremeno grupisanje podataka (*PBRC*) i samim tim osobinu da identifikuje nove radne režime i daje odgovarajući odgovor na promene u nizu ulaznih podataka.

Osnovno svojstvo ovakvog ekspertskog sistema jeste da broj grupa nije unapred određen, već se uči na osnovu raspoloživih podataka. Prethodna znanja o izvoru podataka (procesu koji stvara podatke), ukoliko su poznata mogu se koristiti za inicijalizaciju postupka (ekspertsko znanje), ali postupak se može upotrebiti čak i ukoliko takva informacija nije dostupna. Podaci koji se grupišu ne moraju biti poznati unapred, niti u bilo kom trenutku sistem zahteva poznavanje čitavog skupa grupisanih podataka. Jedan od osnovnih zahteva koji treba da ispunjava ovaj ekspertski sistem jeste jednostavna implementacija da bi rad u realnom vremenu bio moguć.

Kada se primeni u ekspertskom sistemu za detekciju i izolaciju grešaka, *PBRC* algoritam bi trebalo da detektuje radne režime koji se pojave prvi put tokom samog

4. Prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju grešaka u radu dinamičkih sistema

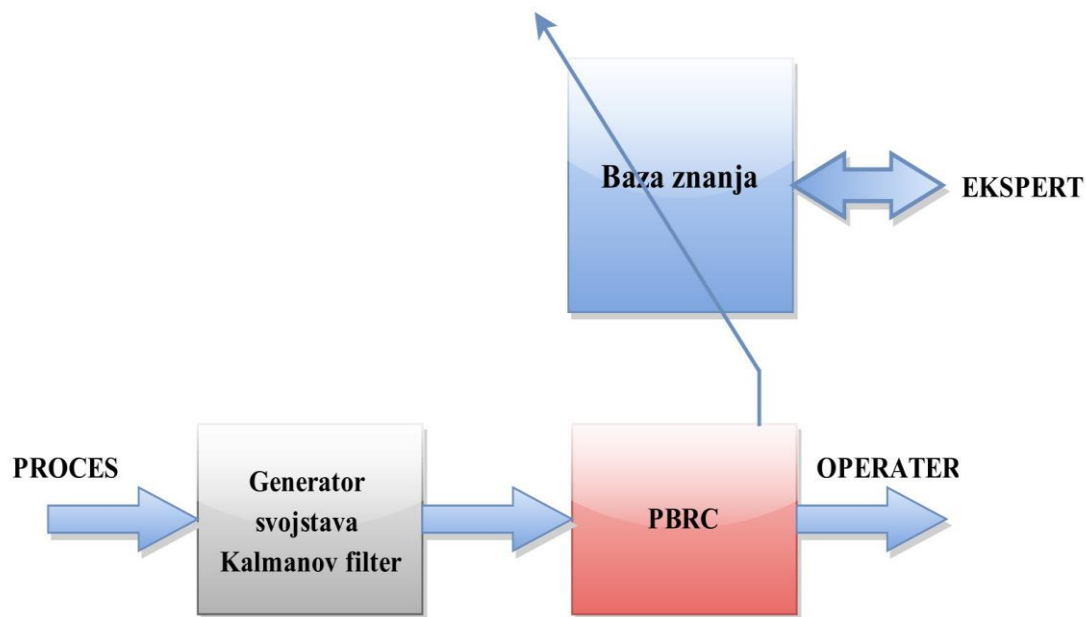
izvršenja algoritma. Ti novi radni režimi koji su prepoznati bili bi označeni bilo kao nominalni ili kao režimi rada sa greškom od strane eksperta na osnovu čijeg znanja se dizajnira sam ekspertski sistem.

Predloženo rešenje predstavljeno je na takmičenju kompanije „National Instruments“ [74] pod engleskim nazivom *Self-Adaptive Process Monitoring System (SAMS)*.

Na takmičenju SAMS je osvoji prvu nagradu najbolje tehničko rešenje u Jugoistočnoj Evropi za 2013. godinu.

4.1 Projektovanje prilagodljivog ekspertskog sistema zasnovanog na PBRC algoritmu

Na slici 12 prikazana je opšta struktura prilagodljivog ekspertskog sistema za brzu detekciju i izolaciju neželjenih stanja dinamičkih sistema.



Slika 12. Opšta struktura prilagodljivog ekspertskog sistema za brzu detekciju i izolaciju neželjenih stanja dinamičkih sistema

Osnova ovakvog ekspertskog sistema jeste PBRC procedura opsana u prethodnom poglavlju koja čini sistem prilagodljivim, tako što, kad god je potrebno,

4. Prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju grešaka u radu dinamičkih sistema

modifikuje bazu znanja sistema. Izbor generatora svojstava karakterističan je za svaki problem i trebalo bi da bude pažljivo odabran. U većini slučajeva, estimirane vrednosti parametara odgovarajućeg linearnog modela procesa predstavljaju dobar izbor. Tada koristimo Kalmanov filter kao generator svojstava. Različiti tipovi Kalmanovog filtera takođe se koriste kao generatori reziduala u različitim procedurama za detekciju grešaka [37,38,39].

Za određivanje pozicija inicijalnih čvorova u prostoru svojstava korišćemo ekspertsko poznavanje samog procesa. Kao što je već rečeno, ova faza inicijalizacije nije neophodna, s obzirom da se PBRC algoritam, zahvaljujući svojoj sposobnosti da uči iz podataka, ali nam svakako može koristiti i kada nam prethodna znanja o procesu nisu dostupna.

Svaki čvor u prostoru svojstava odgovara specifičnom radnom režimu procesa koji posmatramo. Kako su realni procesi uglavnom nelinearni, moguće je da jednom radnom režimu odgovara više različitih čvorova. Sa stanovišta detekcije i izolacije grešaka prepoznavanje različitih čvorova koji predstavljaju isti radni režim nije relevantno.

Radne režime možemo grubo klasifikovati u nekoliko grupa. *Nominalni radni režimi* predstavljaju one radne režime koji se javljaju u toku normalnog funkcionisanja procesa. *Radni režimi sa greškom* predstavljaju neželjene radne režime u okviru kojih je došlo do greške u radu procesa. Dalje, možemo posebno označiti radne režime u kojima je došlo do greške koja potpuno degradira performanse procesa ili radne režime u kojima funkcionisanje procesa nije bezbedno.

Baza znanja osim pozicije čvorova sadrži i detaljnje opise svih radnih režima. Za radne režime sa greškom u bazi se nalaze i instrukcije za operatera procesa. Svaki put kada se pojavi novi čvor mora se konsultovati ekspert koji poznaje sistem da bi novi rasni režim bio ispravno označen i opisan. Očigledno je da ovaj deo sistema ne može biti automatizovan.

4.1.1. Generisanje vektora svojstava

Prvi korak jeste odabir odgovarajućeg generatora svojstava za vektore svojstava \mathbf{z}_k . Vektori svojstava bi trebalo da budu odabrani na takav način da omogućavaju razlikovanje različitih radnih stanja razmatranog procesa. Takođe, izbor vektora svojstava trebalo bi da obezbedi da svako radno stanje bude predstavljeno različitim oblastima u prostoru svojstava. Kalmanov filter je široko rasprostranjeno rešenje za generisanje svojstava u realnom vremenu mi ćemo ga koristiti u ovom radu.

4.1.2. Estimacija parametara . Kalmanov filter

Estimacija je proces procene vrednosti veličina od interesa na temelju dostupnih merenja, koja su uglavnom posredna, netačna i/ili nesigurna.

Optimalni estimator jeste algoritam koji estimira promatranu veličinu koristeći dostupna merenja uz optimizaciju određenog kriterijuma optimalnosti. Veličine koje se mogu estimirati su:

- **Parametri** - vremenski nepromenljive (ili sporo promenljive) veličine
- **Stanja** – vremenski promenljive veličina dinamičkog sistema □

Prema veličinama koje se estimiraju estimatore možemo podeliti na **estimatore parametara i estimatore stanja**. **Estimacija parametara procesa** jeste određivanje nepoznatih parametara modela procesa na osnovu merenja ulaza i izlaza. Tipičan primer estimacije parametara procesa jeste estimacija koeficijenata funkcije prenosa procesa.

Prvi metod koji je davao optimalnu estimaciju iz zašumljenih podataka je dao *Gauss* i to je **metod najmanjih kvadrata** koji će biti opisan u nastavku. Taj metod, iako se najčešće koristi za linearnu estimaciju je prvo korišćen u nelinearnom slučaju(kada je italijanski astronom *Piazzi* otkrio nepoznat objekat na nebu (Cereru) a *Gauss* razvio metodu računanja orbite iz tri posmatranja, što je bilo dovoljno da može ponovo da se pronade).

4. Prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju grešaka u radu
dinamičkih sistema

Metod najmanjih kvadrata

Posmatrajmo proces linearan po parametrima θ

$$z = h_1\theta_1 + h_2\theta_2 + \dots + h_n\theta_n = \mathbf{h}^T\boldsymbol{\theta} \quad (4.1)$$

gde su

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix} \quad \text{i} \quad \boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix}$$

Neka je dato više merenja

$$\begin{aligned} z_1 &= h_{1,1}\theta_1 + h_{1,2}\theta_2 + \dots + h_{1,n}\theta_n = \mathbf{h}_1^T\boldsymbol{\theta} \\ z_2 &= h_{2,1}\theta_1 + h_{2,2}\theta_2 + \dots + h_{2,n}\theta_n = \mathbf{h}_2^T\boldsymbol{\theta} \\ &\vdots \\ z_N &= h_{N,1}\theta_1 + h_{N,2}\theta_2 + \dots + h_{N,n}\theta_n = \mathbf{h}_N^T\boldsymbol{\theta} \end{aligned} \quad (4.2)$$

gde je $\mathbf{h}_i = \begin{bmatrix} h_{i,1} \\ h_{i,2} \\ \vdots \\ h_{i,n} \end{bmatrix}$.

Ako uvedemo oznake

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1^T \\ \mathbf{h}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{h}_N^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,n} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N,1} & h_{N,2} & \dots & h_{N,n} \end{bmatrix} \quad \text{i} \quad \mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix}$$

tada (4.2) možemo zapisati u obliku

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\boldsymbol{\theta} \quad (4.3)$$

Problem estimacije parametara zapravo se svodi na problem rešavanja sistema N linearnih jednačina po n nepoznatih (4.2). Možemo razlikovati tri slučaja:

4. Prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju grešaka u radu
dinamičkih sistema

-
- $N < n$ – broj merenja (jednačina) je manji od broja parametara (nepoznatih) i tada je sistem jednačina neodređen odnosno problem estimacije ima beskonačno mnogo rešenja. U ovom slučaju postoji beskonačno mnogo različitih vrednosti parametara koje idealno opisuju posmatrana merenja
 - $N = n$ – broj merenja i broj parametara su jednaki. Ukoliko su merenja linearno nezavisna tada matrica je \mathbf{H} invertibilna, odnosno problem estimacije ima jedinstveno rešenje

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{z}$$

- $N > n$ – broj merenja je veći od broja parametara. Ukoliko su merenja idealna, rešenje se može odrediti na osnovu proizvoljnih n nezavisnih merenja (u opštem slučaju uvek postoji merni šum te je dobijeni sistem protivrečan i rešenje ne postoji).

Ako problem estimacije posmatramo kao optimizacioni problem možemo zaključiti da postoji više načina za definisanje kriterijuma optimalnosti. Potrebno je estimirati parametre na takav način da se minimizira određeni pokazatelj odstupanja estimiranog modela od merenja. Neka je $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ procenjena vrednost parametara, $\hat{z}_i = \mathbf{h}_i^T \hat{\boldsymbol{\theta}}$ vrednost koju bi z_i imalo da je $\hat{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\theta}$ i $\tilde{z}_i = z_i - \hat{z}_i$ očekivana greška estimacije odnosno razlika merene i estimirane vrednosti u i -tom merenju. Tada se kriterijum optimalnosti može postaviti euklidska norma ili kvadrat euklidske norme

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{\theta}} \sum_{i=1}^N |z_i - \mathbf{h}_i^T \hat{\boldsymbol{\theta}}| \\ \min_{\boldsymbol{\theta}} \sum_{i=1}^N (z_i - \mathbf{h}_i^T \hat{\boldsymbol{\theta}})^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Ovako postavljeni kriterijumi jesu odgovarajući ukoliko sva merenja smatramo jednako važnima. Međutim, nisu sva merenja ekvivalentna. Različita merenja mogu biti različito opterećena šumom ili starija merenja mogu biti manje relevantna ukoliko postoji sumnja da se stanje procesa menja. Prilikom formiranja kriterijuma optimalnosti estimatora potrebno je da veći doprinos imaju merenja za koja smatramo

4. Prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju grešaka u radu
dinamičkih sistema

da su značajnija. Ovaj problem rešavamo uvođenjem **težinskih faktora** w_i koje pridružujem i -tom merenju. Težinski faktori su uvek pozitivni, odnosno ukoliko je $w_i > w_j$ tada je i -to merenje značajnije od j -tog merenja. Sada možemo preformulisati kriterijume (4.4) na sledeći način

$$\begin{aligned} \min_{\theta} \sum_{i=1}^N w_i |z_i - \mathbf{h}_i^T \hat{\theta}| \\ \min_{\theta} \sum_{i=1}^N w_i^2 (z_i - \mathbf{h}_i^T \hat{\theta})^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Posmatrajmo sada problem optimalne estimacije parametara metodom najmanjih kvadrata. Neka je dat matematički model procesa (4.1) i skup merenja

$$(z_1, h_1), (z_2, h_2), \dots, (z_n, h_n)$$

Potrebno je odrediti estimaciju vrednosti parametara $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ odnosno estimaciju vektora $\hat{\theta}$ koja minimizira kriterijum optimalnosti

$$J = \sum_{i=1}^N w_i^2 (z_i - \mathbf{h}_i^T \hat{\theta})^2 = \sum_{i=1}^N w_i^2 \tilde{z}_i^2 \quad (4.6)$$

gde su w_i unapred zadate relativne težine pojedinih merenja.

Zapišimo kriterijum (4.6) u matricnom obliku. Uvedimo najpre sledeće oznake

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_N \end{bmatrix} \quad \tilde{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} \tilde{z}_1 \\ \tilde{z}_2 \\ \vdots \\ \tilde{z}_N \end{bmatrix} \quad \mathbf{e} = \mathbf{W}\tilde{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} w_1 \tilde{z}_1 \\ w_2 \tilde{z}_2 \\ \vdots \\ w_N \tilde{z}_N \end{bmatrix}$$

Sada kriterijum optimalnosti možemo zapisati kao

$$\begin{aligned} J &= \mathbf{e}^T \mathbf{e} = (\mathbf{W}\tilde{\mathbf{z}})^T \mathbf{W}\tilde{\mathbf{z}} = \tilde{\mathbf{z}}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W}\tilde{\mathbf{z}} \\ &= (\mathbf{z} - \mathbf{H}\hat{\theta})^T \mathbf{W}^T \mathbf{W}(\mathbf{z} - \mathbf{H}\hat{\theta}) \\ &= \hat{\theta}^T \mathbf{H}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{H} \hat{\theta} - 2\mathbf{z}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{H} \hat{\theta} + \mathbf{z}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{z} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Ako uvdemo smene

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{z}} &= \mathbf{W}\mathbf{z} \\ \tilde{\mathbf{H}} &= \mathbf{W}\mathbf{H}\end{aligned}\tag{4.8}$$

Tada kriterijum optimalnosti (4.7) možemo zapisati kao

$$J = \boldsymbol{\theta}^T \tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{H}} \hat{\boldsymbol{\theta}} - 2\tilde{\mathbf{z}}^T \tilde{\mathbf{H}} \hat{\boldsymbol{\theta}} + \tilde{\mathbf{z}}^T \tilde{\mathbf{z}}\tag{4.9}$$

Uzimajući u obzir prethodno izvedeni kriterijum optimalnosti estimatora (4.9) potrebni uslovi optimalnosti imaju oblik

$$\Delta J = 2\tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{H}} \hat{\boldsymbol{\theta}} - 2\tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{z}} = 0\tag{4.10}$$

Ovako dobijeni potrebni uslovi optimalnosti predstavljaju posebnu formu sistema linearnih jednačina koju nazivamo **normalnim jednačinama**. Potrebne uslove optimalnosti (4.10) možemo zapisati u obliku

$$\tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{H}} \hat{\boldsymbol{\theta}}^* = \tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{z}}\tag{4.11}$$

odnosno

$$\mathbf{H}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \tilde{\mathbf{H}} \hat{\boldsymbol{\theta}}^* = \mathbf{H}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{z}\tag{4.12}$$

gde $\hat{\boldsymbol{\theta}}^*$ predstavlja optimalne vrednosti parametara.

Napomena: Normalnim jednačinama smatra se bilo koji sistem linearnih jednačina oblika

$$\tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{H}} \hat{\boldsymbol{\theta}} = \tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{z}}$$

Sistem normalnih jednačina ima jednoznačno rešenje ako je matrica $\tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{H}}$ strogo pozitivno definitna, odnosno ukoliko su joj svojstvene vrednosti pozitivne.

Rešavanjem sistema normalnih jednačina dolazimo do konačnog rešenja u obliku

4. Prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju grešaka u radu
dinamičkih sistema

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}^* = (\tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{H}})^{-1} \tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{z}} \quad (4.13)$$

odnosno

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}^* = (\mathbf{H}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{z} \quad (4.14)$$

Rekurzivna implementacija metoda najmanjih kvadrata

Posmatrajmo prethodno izvedeno rešenje optimalne estimacije (4.14). Ako uvedemo pomoćne veličine

$$\mathbf{R} = \mathbf{H}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{H},$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{R}^{-1},$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{z}$$

tada (4.14) može zapisati kao

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}^* = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} = \mathbf{P} \mathbf{r} \quad (4.15)$$

Matricu \mathbf{R} nazivamo **matricom otežanih (ponderisanih) kovarijansi**. Primitimo da se vrednosti \mathbf{R} i \mathbf{r} , i posledično $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ sada mogu na efikasan način ažurirati sa svakim novim merenjem.

Matricu kovarijanse možemo zapisati u obliku

$$\begin{aligned} \mathbf{R} = \mathbf{H}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{H} &= \sum_{i=1}^N w_i^2 h_i h_i^T \\ &= \sum_{i=1}^{N-1} w_i^2 h_i h_i^T + w_N^2 h_N h_N^T \end{aligned} \quad (4.16)$$

Ako usvojimo da oznaka $(\cdot)^+$ predstavlja vrednost veličine u sledećoj a $(\cdot)^-$ vrednost veličine u prethodnoj iteraciji, kao i da kod vredosti tekuće iteracije izostavljamo indekse tada matrica kovarijanse ima oblik

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}^{-1} + w^2 h h^T \quad (4.17)$$

Ako iskoristimo lemu o inverziji matrica

4. Prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju grešaka u radu
dinamičkih sistema

$$(A + BCD)^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B(C^{-1} + DA^{-1}B)^{-1}DA^{-1} \quad (4.18)$$

uvođenjem smena

$$\begin{aligned} A &:= \mathbf{R} \\ B &:= wh \\ C &:= 1 \\ D &:= wh^T \end{aligned}$$

dolazimo do

$$(\mathbf{R}^{-1} + w^2 hh^T)^{-1} = (\mathbf{R}^{-})^{-1} - w^2 \frac{(\mathbf{R}^{-})^{-1} hh^T (\mathbf{R}^{-})^{-1}}{1 + w^2 h^T (\mathbf{R}^{-})^{-1} h} \quad (4.19)$$

odnosno

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}^{-} - w^2 \frac{\mathbf{P}^{-} hh^T \mathbf{P}^{-}}{1 + w^2 h^T \mathbf{P}^{-} h} \quad (4.20)$$

Imajući u vidu da je

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{z} = \sum_{i=1}^N w_i^2 h_i z_i = \sum_{i=1}^{N-1} w_i^2 h_i z_i + w_N^2 h_N z_N \quad (4.21)$$

odnosno

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}^{-} + w^2 h z \quad (4.22)$$

možemo pisati

$$\begin{aligned} \mathbf{R} \boldsymbol{\theta} &= \mathbf{R}^{-} \boldsymbol{\theta}^{-} + w^2 h z = (\mathbf{R} - w^2 hh^T) \boldsymbol{\theta}^{-} + w^2 h z \\ &= \mathbf{R} \boldsymbol{\theta}^{-} + w^2 h (z - h \boldsymbol{\theta}^{-}) \end{aligned} \quad (4.23)$$

i posledično

$$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}^{-} + w^2 \mathbf{P} h (z - h \boldsymbol{\theta}^{-}). \quad (4.24)$$

Postupak estimacije parametara rekurzivnom metodom najmanjih kvadrata ima sledeće korake:

- Izabrati početno pogađanje $\boldsymbol{\theta}(0) = \boldsymbol{\theta}_0$.
- Inicijalizovati matricu \mathbf{P} se nekom “velikom” vrednošću. Obično se uzima dijagonalna matrica sa velikim, pozitivnim vrednostima dijagonalnih elemenata, $\mathbf{P}(0) = c\mathbf{I}$, gde je $c \gg 1$ (obično c bude reda veličina nekoliko stotina, hiljada, pa i više).

-
- U svakoj iteraciji izračunati (4.20) i (4.24).

Diskretna estimacija sa diskretnim merenjima – Diskretni Kalmanov filter

Kalmanov filter prvi je opisao Rudolf E. Kalman u svom poznatom radu iz 1960. godine [75] u kome je predstavio rekurzivno rešenje problema linearnog filtriranja diskretnih podataka.

Kalmanov filter u osnovi predstavlja optimalni estimator koji je zasnovan na metodi najmanjih kvadrata, odnosno koji minimizira srednju kvadratnu grešku estimacije. Kada je reč o stohastičkoj estimaciji na osnovu merenja koja su opterećena šumom, Kalmanov filter je jedan od najboljih i veoma često korišćenih matematičkih alata.

Posmatrajmo diskretni linearni sistem opisan jednačinom

$$\mathbf{x}_k = \Phi_{k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (4.25)$$

gde je \mathbf{x}_k vektor stanja u trenutku $t_k = kT$ (T je perioda odabiranja), Φ_{k-1} matrica prelaza stanja diskretnog linearnog sistema i \mathbf{w}_{k-1} vektor šumova procesa u trenutku $k-1$, kao i merenja

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (4.26)$$

gde \mathbf{z}_k predstavlja merenje iz procesa (koje može biti i skalar), \mathbf{H}_k je matrica osetljivosti koja opisuje linearnu vezu između merenja i stanja sistema a \mathbf{v}_k su šumovi merenja. Šumovi procesa i merenja \mathbf{w} i \mathbf{v} predstavljaju bele šumove srednje vrednosti jednake nuli ($E\{\mathbf{w}_k\} = 0$ i $E\{\mathbf{v}_k\} = 0$) i odgovarajućih matrica kovarijanse

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_k &= E\{\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T\} \\ \mathbf{R}_k &= E\{\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T\} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Analogno rekurzivnoj metodi najmanjih kvadrata mogu se izvesti jednačine diskretnog Kalmanovog filtra [76].

4. Prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju grešaka u radu dinamičkih sistema

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k [\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k^-] \quad (4.28)$$

gde oznake $(\cdot)^+$ i $(\cdot)^-$ označavaju vremenske trenutke neposredno pre, odnosno neposredno posle trenutka k , matrica Kalmanovog pojačanja ima oblik

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1} = \mathbf{P}_k^+ \mathbf{H}_k^T \mathbf{R}_k \quad (4.29)$$

gde su

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_k^+ &= [\mathbf{I} - \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T \mathbf{Z}_k^- \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_k^- \\ \mathbf{Z}_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k \end{aligned} \quad (4.30)$$

4.2 Implementacija ekspertskog sistema

Predloženi ekspertski sistem imlementiran je na industrijskom regulatoru NI cRIO 9024, proizvođača *National Instruments* [77].

Ekspertski sistem zasnovan na PBRC algoritmu koji je predložen u ovom radu projektovan je i implementiran sa naročitim osvrtom na procese kod kojih se javlja visok stepen nesigurnosti modelovanja, te procese čije se dinamičke karakteristike menjaju tokom vremena, najpre usled promena radnih režima. Ovakav sistem ima sposobnost da „uči“ svojstva procesa koji se posmatra. Projektovani sistem je, dakle, sposoban da identifikuje i odvoji različite radne režime posmatranog procesa, i to kako nominalni radni režim, tako i neželjene radne režime i radne režime koji se mogu pripisati otkaznim stanjima. Kao takav, on nije zamišljen kao potpuno samostalan sistem, već pre kao viši nadzorno-upravljački sloj koji se oslanja na postojeći nadzorno-upravljački (SCADA) softver.

Ekspertski sistem je implementiran u vidu dvoslojnog softverskog rešenja. Elementi prvog sloja aplikacije razvijeni su i optimizovani za rad u realnom vremenu, uz oslonac na upravljački uređaj NI cRIO 9024 proizvođača *National Instruments*. Ukoliko se isti uređaj koristi i za potrebe upravljanja, tada se isti sistem može integrisati sa upravljačkim algoritmom. U drugom sloju implementiran je korisnički interfejs, takođe uz oslonac na alate proizvođača *National Instruments*. Obe aplikacije

4. Prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju grešaka u radu dinamičkih sistema

su implementirane u softverskom alatu LabVIEW. Prilikom implementacije, široko su primenjivane objektno-orijentisane mogućnosti G programskog jezika (na kome se zasniva softverski paket LabVIEW). Konkretno, formiran je i treći, sloj za test aplikacije, koji se koristi isključivo za testiranje razvijenih algoritama.

Centralni deo aplikacije čine industrijski kontroler na kome se izvršava donji sloj, te industrijski računar na kome se izvršava gornji sloj projektovane softverske arhitekture. Ova dva sloja komuniciraju među sobom putem NI PSP protokola koji je specifičan za proizvode iz palete National Instruments-a. Industrijski kontroler, dalje, može komunicirati sa drugim upravljačkim uređajim, bilo putem NI PSP protokola, bilo putem drugih, standardnih industrijskih protokola, kao što su industrijski Ethernet, MODBUS, CAN, EtherCAT i drugi. Takođe, sistem na višem sloju može komunicirati sa drugim aplikacijama putem HTTP ili FTP protokola, služeći se OPC-om ili pomoću mrežnih servisa.

4.1.3. Korisnički interfejs

Korisnički interfejs sistema omogućava korisniku da prati različite elemente postupka praćenja radnih režima procesa koji se inače izvršavaju na nižem softverskom sloju. Konkretno, služeći se ovom aplikacijom, moguće je pratiti:

1. Ponašanje generatora svojstava.

U konkretnoj implementaciji, Kalmanov filter je korišten kao generator svojstava. Drugim rečima, svojstvima procesa smatrani su parametri diskretnog matematičkog modela procesa.

2. Ponašanje procedure grupisanja.

Ovaj deo interfejsa omogućava praćenje broja klastera (radnih režima) koji su detektovani do tekućeg trenutka. Takođe, ovaj deo aplikacije prikazuje korisniku tekući aktivni radni režim.

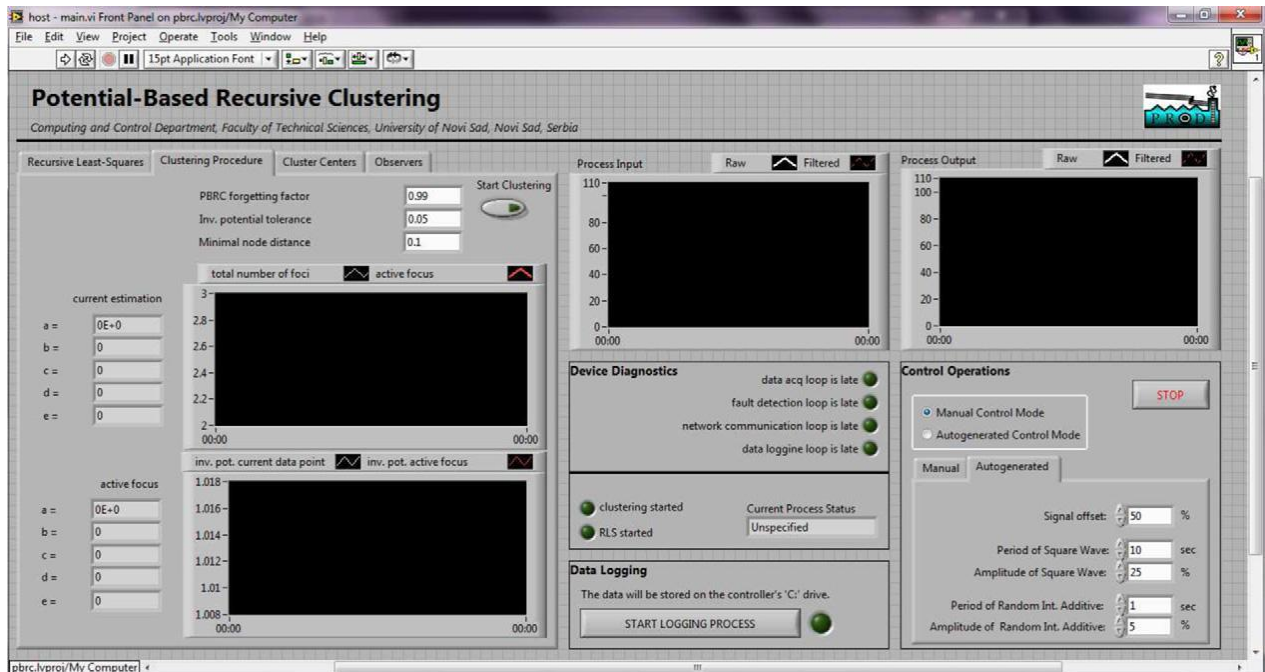
3. Detaljniji prikaz svakog pojedinačnog otkrivenog klastera.

Ovaj deo korisničkog interfejsa omogućava korisniku detaljniji pregled svakog otkrivenog klastera.

4. Prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju grešaka u radu dinamičkih sistema

Slika 13 prikazuje deo korisničkog interfejsa koji služi za praćenje postupka grupisanja radnih režima, odnosno dela aplikacije koja prati ponašanje samog PBRC algoritma.

Sa leve strane, korisniku je omogućeno da prati tekuća estimirana svojstva procesa (parametre diskretnog matematičkog modela), broj klastera i indeks aktivnog klastera, kao i inverzne potencijale svakog klastera. Sa desne strane, korisniku je omogućeno da prati ulaze i izlaze procesa, te da vrši dijagnostiku samog uređaja i bira način upravljanja procesom.



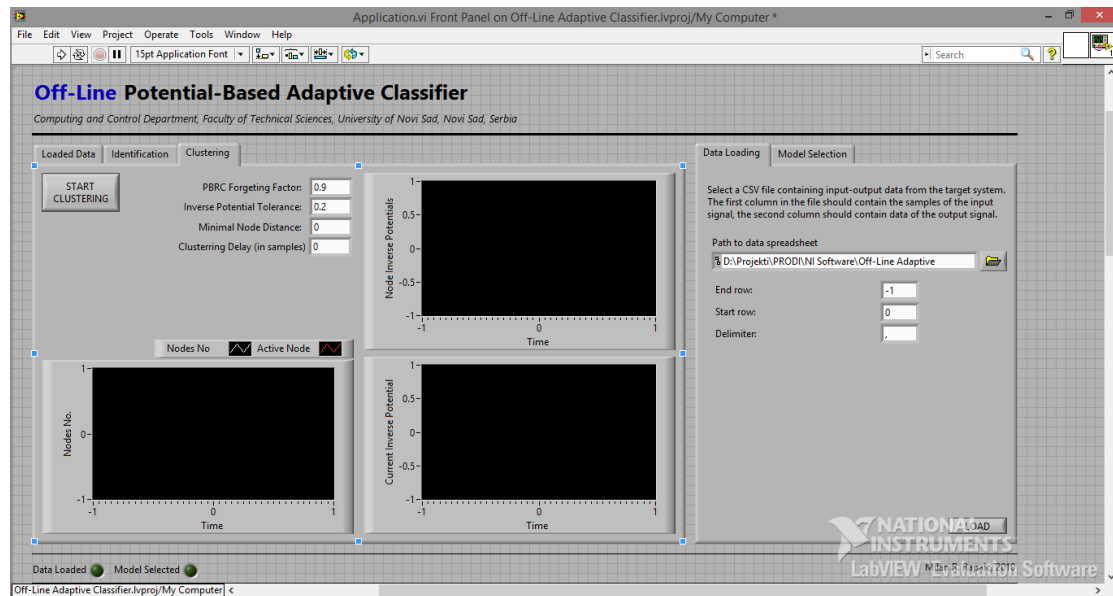
Slika 13. Prikaz dela korisničkog interfejsa koji služi za praćenje postupka grupisanja radnih režima

4.1.4. Kratak prikaz aplikacije za testiranje

Funkcionalnost svih algoritama testirana je pomoću odgovarajuće aplikacije za testiranje. Ova aplikacija jednovremeno implementira funkcionalnost kako korisničkog interfejsa, tako i funkcionalnost nižeg sloja. Elementi korisničkog interfejsa aplikacije za testiranje prikazani su na slici 14. Ova aplikacija omogućava

4. Prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju grešaka u radu dinamičkih sistema

da se unapred snimljeni podaci učitaju, te da se na njima testiraju svi postupci i metode koje su kasnije upotrebljene u realnom okruženju.



Slika 14. Korisnički interfejs aplikacije za testiranje algoritama.

4.1.5. Elementi ekspertskog sistema

Donji sloj ekspertskog sistema implementiran je na industrijskom kontroleru i optimizovan je za rad u realnom vremenu. Aplikacija je implementirana kao višenitna aplikacija, pri čemu su različite niti imaju različite prioritete i značaj.

1. Petlja za upravljanje i prikupljanje podataka.

U ovoj petlji vrši se prikupljanje podataka sa analogno-digitalnih konvertora, proračun upravljačkih promenljivih, te izdavanje izlaznih (upravljačkih) signala ka procesu putem digitalno-analognih konvertora. Svaki zastoj ili kašnjenje u toku izvršavanja elemenata aplikacije sadržanih u ovoj petlji smatra se fatalnom greškom.

2. Petlja za detekciju grešaka i praćenje radnih stanja.

U okviru ove petlje vrši se generisanje svojstava, grupisanje svojstava pomoću PBRC algoritma, te određivanje tekućeg aktivnog radnog režima. Ova petlja ima nešto niži

4. *Prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju grešaka u radu dinamičkih sistema*

prioritet od prethodne, ali se i dalje kašnjenje u izvršavanju ove petlje smatra fatalnom greškom koja potencijalno uzrokuje obustavu rada sistema u celini.

3. Komunikaciona petlja.

U okviru komunikacione petlje vrši se razmena podataka sa nadzorno-upravljačkim delom aplikacije, te eventualno sa drugim umreženim upravljačkim uređajima. U okviru ove petlje, podaci dobijeni različitim komunikacionim protokolima se zapisuju u zajedničku memoriju koja se potom bezbedno može koristiti iz svih petlji softverskog rešenja.

4. Petlja za logovanje podataka.

U okviru ove petlje, vrši se skladištenje podataka u trajnoj memoriji regulatora. Ovim podacima se kasnije može pristupiti u cilju analize performansi sistema ili u cilju dalje, detaljnije dijagnostike kvara.

5. Petlja za samodijagnostiku i pomoćne taskove.

Ova petlja služi praćenje zauzeća memorije regulatora, te praćenje kvalitetat osnovnih parametara njegovog rada.

Prioritet petlji opada od vrha ka dnu, te tako petlja „*Upravljanje i prikupljanje podataka*“ ima najviši, a petlja „*Petlja za samodijagnostiku i pomoćne taskove*“ ima najniži prioritet. Na slici 15 prikazana je arhitektura ekspertskog sistema.



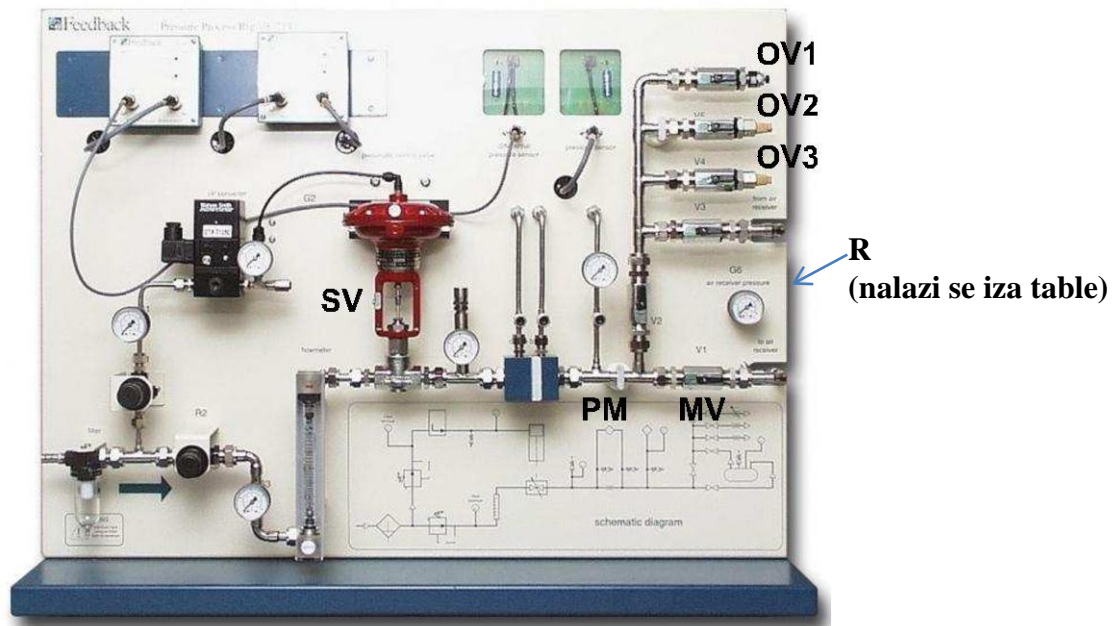
Slika 15. Shematski prikaz arhitekture ekspertskog sistema

5. Eksperimentalna verifikacija

U ovom poglavlju prikazaćemo tri laboratorijska eksperimenta kroz koje smo verifikovali postupak predložen u prethodnom poglavlju. Prva dva eksperimenta izvršena su na pilot-postrojenja za regulaciju pritiska dok je treći eksperiment izvršen na pilot- postrojenju za regulaciju nivoa i protoka. Svi eksperimenti izvedeni su u laboratoriji Centra za inteligentno i napredno upravljanje Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu.

5.1. Primer praćenja radnih stanja pilot-postrojenja za regulaciju pritiska

Ekspertski sistem opisan u 4.1. testiran je u okviru dva eksperimenta na primeru pilot-postrojenja za regulaciju pritiska koje je prikazano na slici 16.



Slika 16. Laboratorijsko postrojenje za regulaciju pritiska

Postrojenje se sastoji iz kompresora i pneumatskog servo- ventila **SV** pomoću koga se reguliše pritisak na izlazu iz sistema cevi. Nizom ručnih ventila **OV1 –OV3** može se kontrolisati tok vazduha. Ručni ventili **MV1 i MV2** služe za otvaranje, odnosno zatvaranje dovoda vazduha u rezervoar **R** koji se nalazi sa zadnje strane prikazane table. Otvaranjem rezervoara menja se dinamika procesa, konkretno čitav proces se značajno usporava. U okviru našeg eksperimenta smatraćemo da se sistem može nalaziti u dva radna stanja- stanje procesa sa zatvorenim rezervoarom i stanje sa otvorenim rezervoarom.

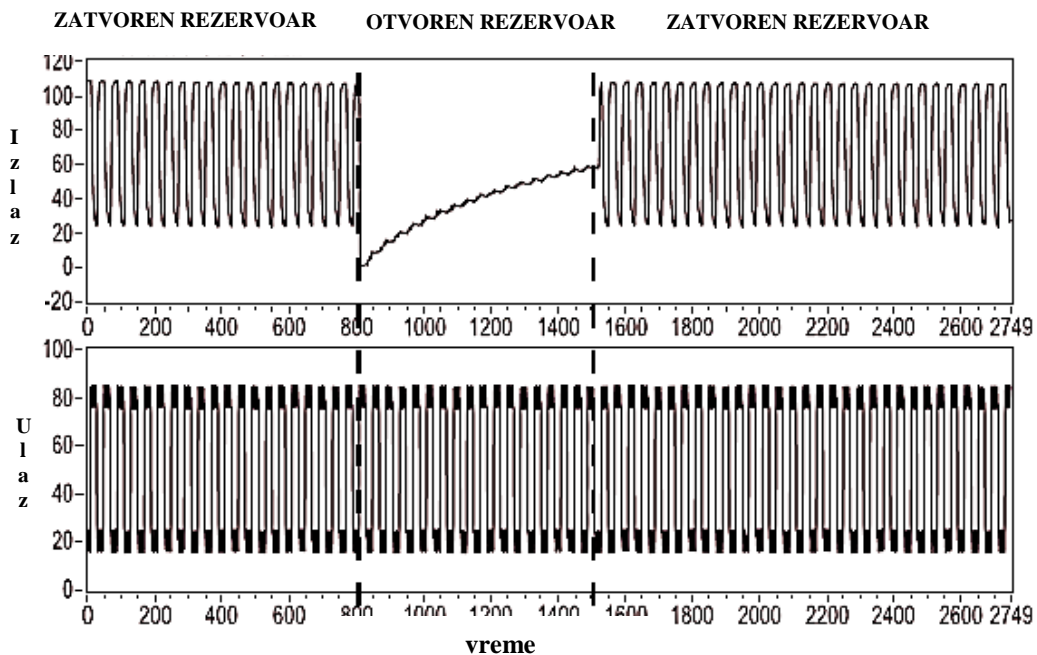
Uvidom u ponašanje sistema primećeno je da mu je sopstveni odziv u svim radnim režimima prigušeno aperiodičan. Kako se ispostavilo da model prvog reda nije dovoljno bogat da opiše ponašanje sistema na odgovarajući način, pretpostavljeno je da je model posmatranog procesa drugog reda, odnosno da se proces može opisati diferencnom jednačinom

$$y[k] = -ay[k-1] - by[k-2] + cu[k-1] + du[k-2] \quad (4.31)$$

gde je ulazni signal $u(t)$ komandni signal servo-ventilu dok je izlaz sistema $y(t)$ pritisak vazduha u sistemu. Uvedeno je kašnjenje od samo jedne periode, s obzirom da uvođenje većeg kašnjenja dodatno usložnjava implementaciju.

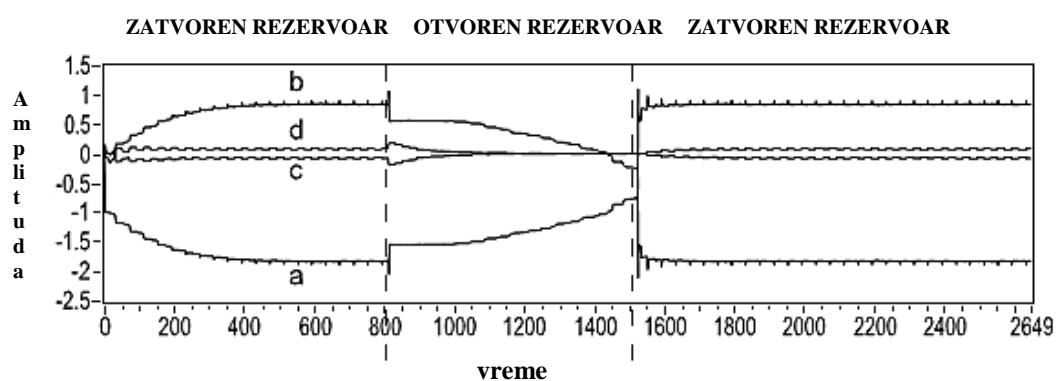
5.1.1. Prvi eksperiment

Ulazni i izlazni signali procesa prikazani su na slici 17. Oba signala data su u relativnim jedinicama. Vremenska osa pokazuje indekse odbiraka. Odabiranje se vrši 10 puta u sekundi.



Slika 17. Ulazni i izlazni podaci iz procesa. Rezervoar je otvoren između dve vertikalne isprekidane linije

Za vektor svojstava odabran je skup estimiranih parametara procesa $\mathbf{z}_k = (\hat{a}_k, \hat{b}_k, \hat{c}_k, \hat{d}_k)$ koje je generisao Kalmanov filter sa faktorom zaboravljanja $\lambda_{kf} = 0.99$. Ukoliko bismo koristili manju vrednost za faktor zaboravljanja došlo bi do velike osetljivosti na šum merenja, dok bi veća vrednost faktora zaboravljanja dovela do znatnog usporavanja samog filtera. Estimirane vrednosti parametara prikazane su na slici 18.



Slika 18. Estimirane vrednosti parametara procesa. Izlazi Kalmanovog filtera

Cilj ovog eksperimenta jeste da pokažemo prepoznavanje dva različita radna režima procesa uz pomoć ekspertskog sistema baziranog na prethodno opisanom PBRC algoritmu.

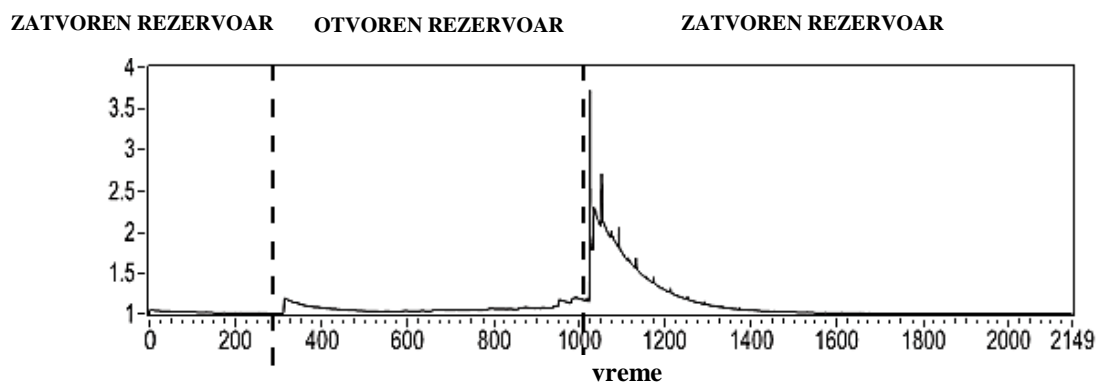
Može se uočiti da se sa promenom radnog režima procesa prilično brzo menjaju i estimirani parametri.

Na samom početku pretpostavili smo da nema dostupnih znanja o radnim režimima posmatranog procesa. Stoga je inicijalna baza znanja prazna a definisan je jedan fiktivan (lažni) čvor $\mathbf{z}_i^* = (0, 0, 0, 0)$ kako bi algoritam bio aktiviran.

Sam PBRC algoritam realizovan je korišćenjem recipročne vrednosti informacionog potencijala upravo zbog preformansi samog sistema, jer kao što smo već rekli, time izbegavamo jedno deljenje.

Vrednost praga $P_{th,1} = 0.15$ iz uslova (3.26) podesili smo u nizu numeričkih eksperimenata. Za merenje rastojanja koristili smo standardnu euklidsku normu, a minimalno rastojanje između čvorova u (3.27) podešeno je na vrednost $d_{min} = 0.25$. Faktor zaboravljanja algoritma podešen je na istu vrednost kao i faktor zaboravljanja Kalmanovog filtera, odnosno $\lambda = \lambda_{kf} = 0.99$.

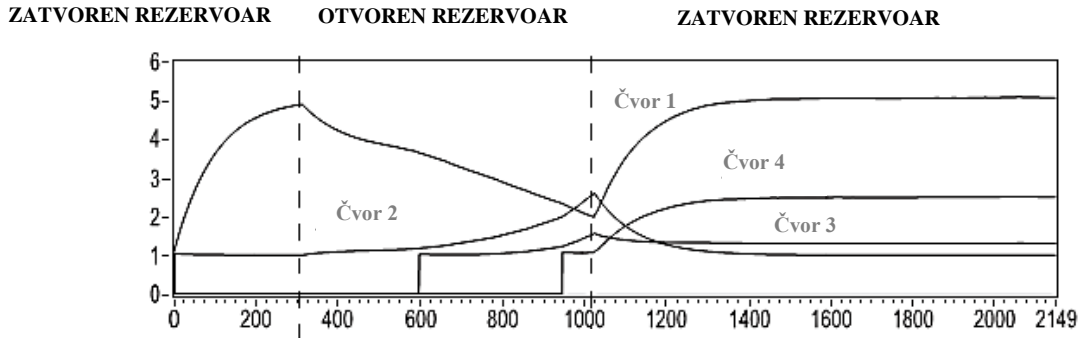
Dobijena recipročna vrednost ponderisanog informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava prikazana je na slici 19.



Slika 19. Recipročna vrednost ponderisanog informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava

Vršne vrednosti ponderisanog informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava označava pojavu naglih promena u ponašanju posmatranog procesa. Primetimo da se na 1000. odabirku pojavljuje vršna vrednost potencijala što odgovara zatvaranju rezervoara.

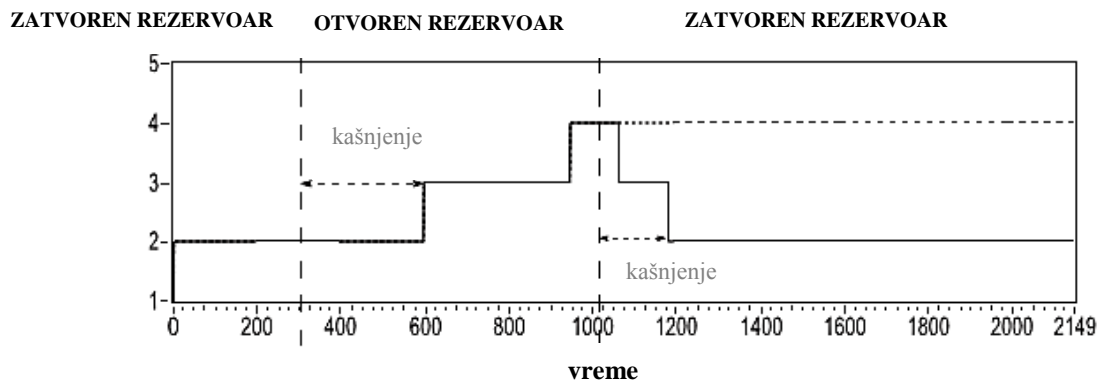
Na slici 20 prikazani su recipročni ponderisani informacioni potencijali postojećih čvorova.



Slika 20. Recipročna vrednost ponderisanih informacionih potencijala čvorova

Čvor 1 jeste inicijalni fiktivni čvor $\mathbf{z}_i^* = (0, 0, 0, 0)$ koji smo uveli prilikom inicijalizacije algoritma. Čvor 2 se pojavljuje gotovo istovremeno budući da Čvor 1 zapravo ne opisuje radni režim u kome se proces nalazi. U periodu kada je rezervoar otvoren dolazi do pojave Čvora 3 i Čvora 4 koji opisuju radni režim u kome se proces nalazi kada je rezervoar otvoren.

Čvor sa najmanjom recipročnom vrednošću potencijala proglašavamo za aktivni čvor. Indeks aktivnog čvora u vremenu prikazana je na slici 21.



Slika 21. Indeks trenutno aktivnog čvora

Iako se vrednosti informacionog potencijala menjaju gotovo jednovremeno sa promenom radnog režima, potrebno je određeno vreme da čvor koji odgovara tekućem radnom režimu postane aktivan. Ovo kašnjenje je označeno na slici 21. Prilikom prelaska iz režima zatvorenog u režim otvorenog rezervoara kašnjenje iznosi

oko 300 odabiraka, dok prilikom prelaska iz stanja otvorenog u stanje zatvorenog rezervoara kašnjenje je oko 200 odabiraka. Zaključujemo da **Čvor 2** odgovara radnom režimu sa otvorenim rezervoarom, dok **Čvorovi 3 i 4** odgovaraju režimu sa zatvorenim rezervoarom.

5.1.2. Drugi eksperiment

U drugom eksperimentu posmatrali smo isto pilot-postrojenje za regulaciju pritiska (slika 16). Vršena je simulacija više prelazaka iz režima zatvorenog u režim otvorenog rezervoara. Kao što je već rečeno, dinamika procesa je znatno sporija u radnom režimu kada je rezervoar otvoren nego u režimu zatvorenog rezervoara. Vremenski raspored simulacije promene radnih režima procesa dat je u tabeli 1.

Početak (sec)	Kraj (sec)	Trajanje (sec)	Radni režim
0	325 (5 min 25 sec)	325 (5 min 25 sec)	zatvoren rezervoar
(5 min 25 sec)	460 (7 min 40 sec)	135 (2 min 15 sec)	otvoren rezervoar
460 (7 min 40 sec)	555 (9 min 15 sec)	95 (1 min 35 sec)	zatvoren rezervoar
555 (9 min 15 sec)	660 (11 min 00 sec)	105 (1 min 45 sec)	otvoren rezervoar
660 (11 min 00 sec)	875 (14 min 35 sec)	225 (3 min 45 sec)	zatvoren rezervoar
875 (14 min 35 sec)	1003 (16 min 43 sec)	128 (2 min 8 sec)	otvoren rezervoar

Tabela 1. Raspored radnih režima u eksperimentu

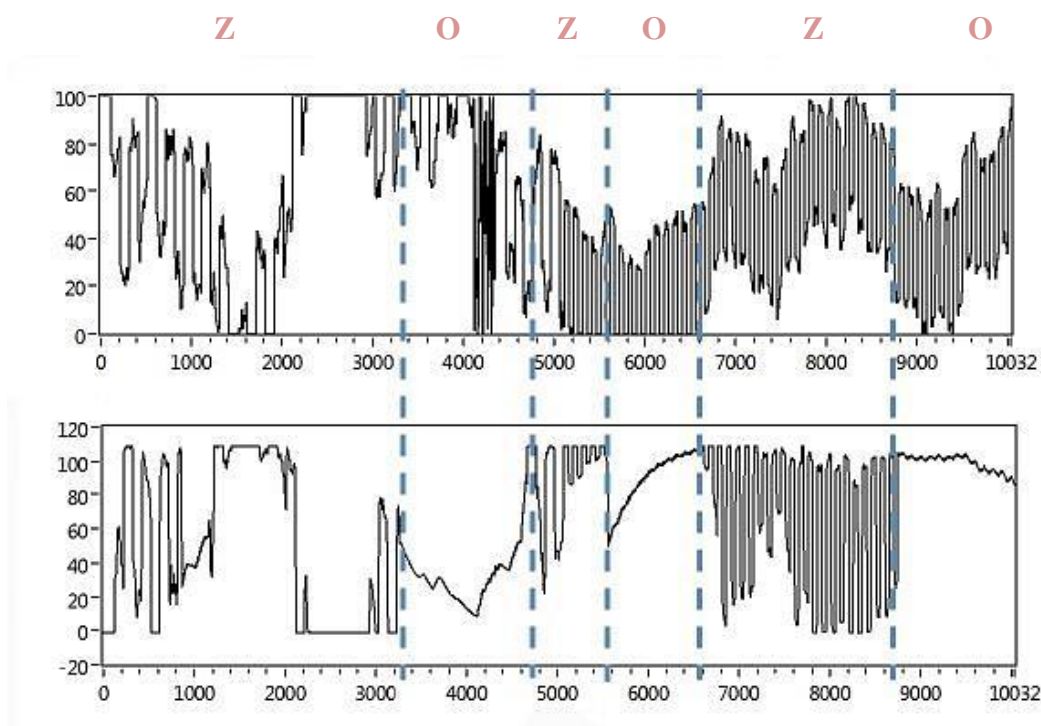
Na početku eskperimenta baza znanja predloženog ekspertskog sistema je prazna, odnosno definisan je jedan fiktivan čvor $\mathbf{z}_i^* = (0,0,0,0)$ kako bi algoritam bio pokrenut.

Vrednost praga $P_{th,1} = 0.15$ iz uslova (3.26) podesili smo kao i u prethodnom primeru u nizu numeričkih eksperimenata. Faktor zaboravljanja algoritma podešen je

na vrednost $\lambda = 0.99$, a na istu vrednos podešen je i faktor zaboravljanja samog Kalmanovog filtra $\lambda_{kf} = 0.99$. Minimalno rastojanje između čvorova, odnosno minimalno rastojanje između tekućeg vektora svojstava sa najvišim informacionim potencijalom i najbližeg postojećeg čvora eksperimentalno je podešeno na vrednost $d_{\min} = 0.25$.

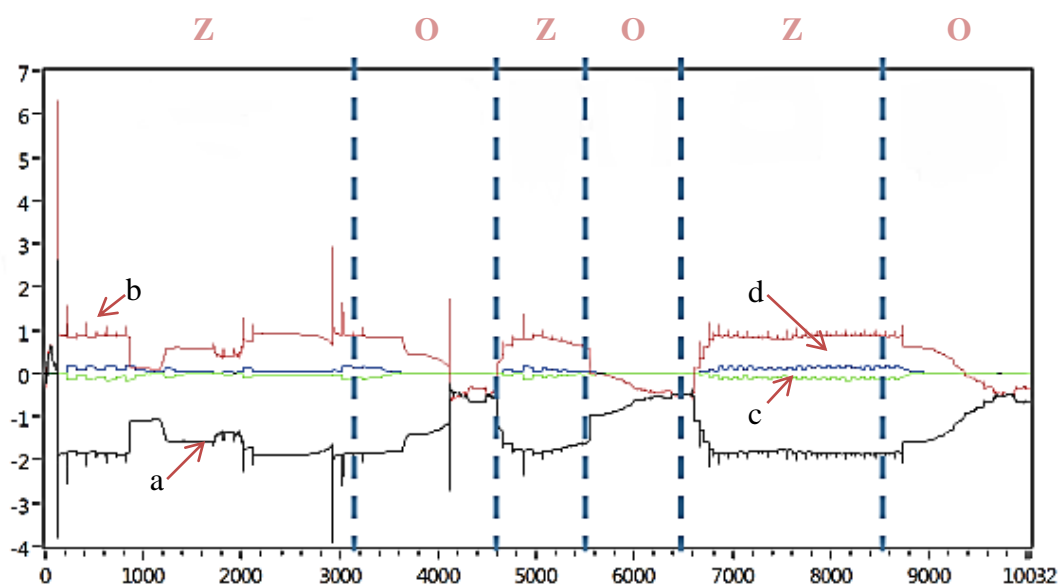
Treba napomenuti da je, iako je na početku eksperimenta proces u stabilnom stanju, potrebno određeno vreme da se izlazi Kalmanovog filtra smire. Tokom ovog prelaznog perioda, izlazi iz Kalmanovog filtra ne opisuju dobro stvarno stanje procesa. Stoga je poželjno da algoritam za klasifikaciju (PBRC) zanemari određen broj podataka koje dobija od generatora svojstava. U ovom eksperimentu zanemarili smo prvih 1000 odabiraka iz Kalmanovog filtra i klasifikator je inicijalizovan sa kašnjenjem od 1000 odabiraka u odnosu na generator svojstava.

Signali upravljanja i pritiska ventila odnosno ulazni i izlazni signali iz procesa dati su na slici 22.



Slika 22. Ulazni i izlazni podaci snimljeni tokom eksperimenta. Vertikalne linije prikazuju promenu radnog stanja procesa. Slova iznad grafika označavaju rasno stanje: O- otvoren rezervoar, Z- zatvoren rezervoar

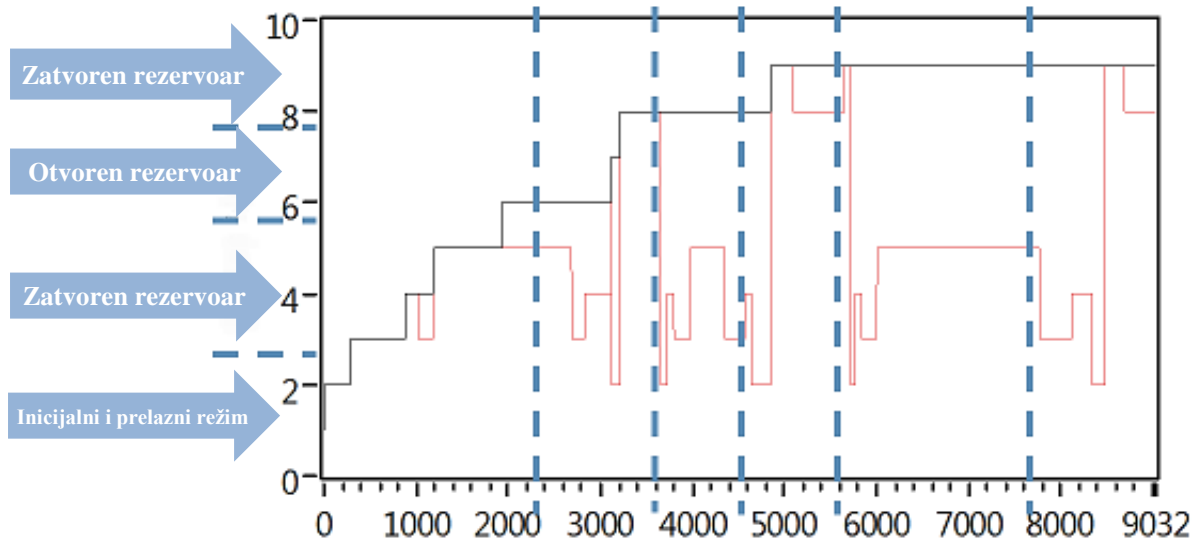
Prelazi između dva posmatrana radna stanja mogu se jasno uočiti ako posmatramo izlaze iz generatora vektora svojstava, odnosno Kalmanovog filtra. Ove vrednosti prikazane su na slici 23.



Slika 23. Izlazi iz Kalmanovog filtra, odnosno estimirane vrednosti parametrara modela drugog reda. Vertikalne linije prikazuju promenu radnog stanja procesa. Slova iznad grafikona označavaju radno stanje: O- otvoren rezervoar, Z- zatvoren rezervoar

Inicijalno stanje jeste ono stanje kada su sve vrednosti parametara jednake nuli. Ujedno to je i prvi čvor koji se pojavljuje budući da, kao što je već rečeno, baza znanja inicijalno ne sadrži nikakva znanja o procesu. Čvorovi 3,4 i 5 odgovaraju radnom režimu zatvorenog rezervoara. Kada je rezervoar otvoren aktivni su Čvorovi 8 i 9. Usled nelinearnosti samog procesa javlja se više čvorova koji zapravo opisuju jedno isto radno stanje. Povezivanje radnih režima sa odgovarajućim čvorovima nije moguće vršiti automatski, već je potrebno da poznavalac procesa (ekspert ili operater koji prati sistem) da dodatna objašnjenja prilikom pojave novih čvorova i/ili radnih stanja. U ovom slučaju to je urađeno nakon što je eksperiment završen, tako što smo posmatrali veze između stvarnih radnih stanja u kojima se proces nalazio i čvorove koji su u tim trenucima bili aktivni. U svakom slučaju, kada se jednom uradi ovo pridruživanje, praćenje procesa se može vršiti automatski budući da prilikom svake

naredne pojave istog neželjenog radnog stanja dati opis ostaje da važi, odnosno isti čvorovi će biti aktivni. Na slici 24 prikazan je izlaz iz ekspertskog sistema. Plavom bojom prikazan je ukupan broj čvorova dok je crvenom bojom prikazan indeks tekućeg aktivnog čvora.



Slika 24. Izlaz iz ekspertskog sistema. Ukupan broj čvorova i indeks tekućeg aktivnog čvora

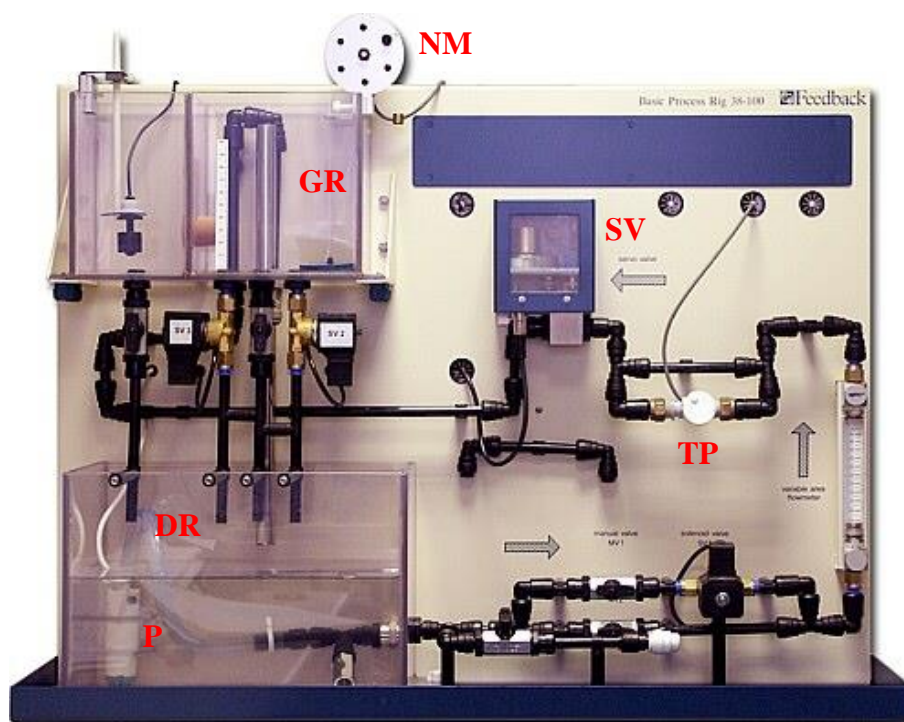
U nastavku je data tabela 2 koja prikazuje estimirane parametre linearnih modela drugog reda koje daje Kalmanov filter.

Broj modela	a	b	c	d	Radni režim
1	0	0	0	0	inicijalni
2	-1.1088	0.1203	-0.0588	0.0644	prelazni
3	-1.795	0.6788	-0.0487	0.0465	zatvoren rezervoar
4	-1.3836	0.3834	-0.03973	0.0388	zatvoren rezervoar
5	-1.8992	0.9009	-0.0479	0.0479	zatvoren rezervoar
6	-3.9408	2.9310	-0.0667	0.0670	prelazni
7	-2.7386	1.7312	-0.0009	0.0003	prelazni
8	-0.5470	-0.4672	-0.0004	-0.0025	otvoren rezervoar
9	-0.8566	-0.1449	-0.0072	0.0036	otvoren rezervoar

Tabela 2. Linearni modeli (radna stanja) koje na izlazu daje predloženi ekspertski sistem

5.1. Primer praćenja radnih stanja pilot-postrojenja za regulaciju nivoa i protoka

U sledećem eksperimentu posmatrali smo promenu radnih režima na pilot-postrojenju za upravljenje nivoom i protokom. Na slici 25 prikazano je laboratorijsko postrojenje.



Slika 25. Pilot-postorjenje za upravljanje nivoom i protokom PROCON 38-100

Centrifugalna pumpa (P) povlači vodu iz donjeg rezervoara (DR) preko sistema cevi u gornji rezervoar (GR). Protokom se može upravljati pomoću elektromotornog servo-ventila (SV). Protok se meri pomoću turbinskog protokomera (TP). Nivo u gornjem rezervoaru se meri pomoću nivomera (NM) koji radi na principu plovka.

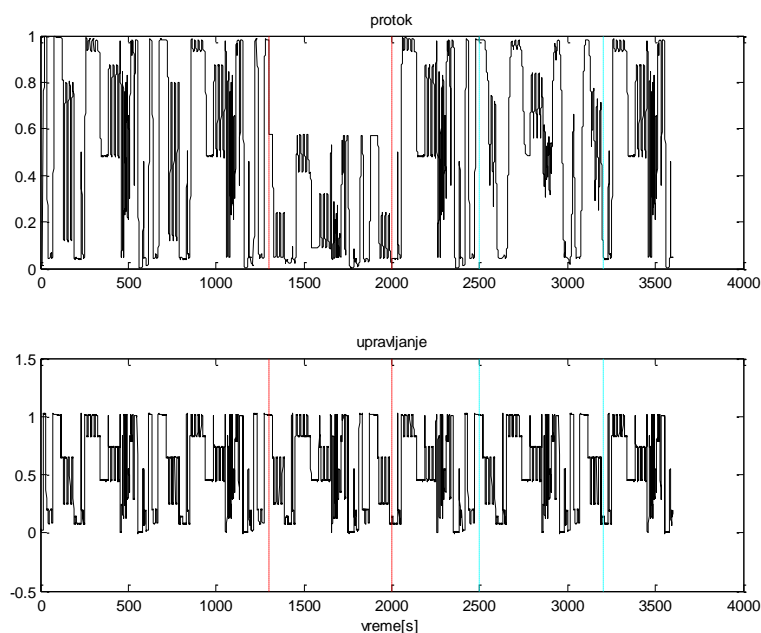
Pretpostavljeno je da je model posmatranog procesa prvog reda, odnosno da se proces može opisati diferencnom jednačinom

$$y[k] = -ay[k-1] + bu[k-1] + c \quad (4.32)$$

gde je ulazni signal $u(t)$ komandni signal servo-ventilu dok je izlaz sistema $y(t)$ protok tečnosti kroz sistem.

Posmatrani proces može se nalaziti u nekoliko neželjenih radnih stanja. Konkretno, može se dogoditi da dođe do **kvara na pumpi**, kada ona počne da radi sa značajno manjim napajanjem ili do **kvara na ventilu** kada usled kvara na elektronici servo-ventil počne da reaguje sporije.

U ovom eksperimentu simulirana je pojava oba tipa kvara sukcesivno. Slika 26 prikazuje ulazni i izlazni signal procesa. Vremenska osa pokazuje indekse odabiraka. Odabiranje je vršeno 10 puta u sekundi.

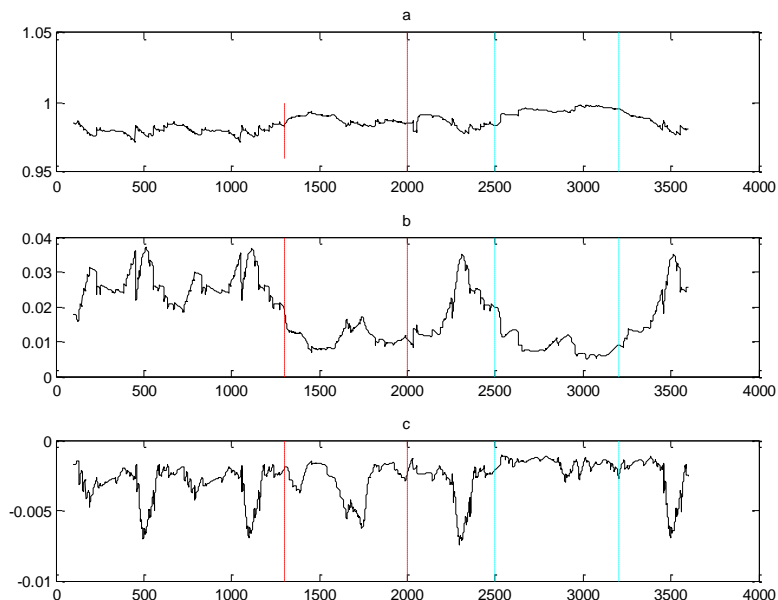


Slika 26. Ulazni i izlazni podaci snimljeni tokom eksperimenta. Vertikalne linije prikazuju promenu radnog stanja procesa.

Na samom početku pretpostavili smo da nema dostupnih znanja o radnim režimima posmatranog procesa. Stoga je inicijalna baza znanja prazna.

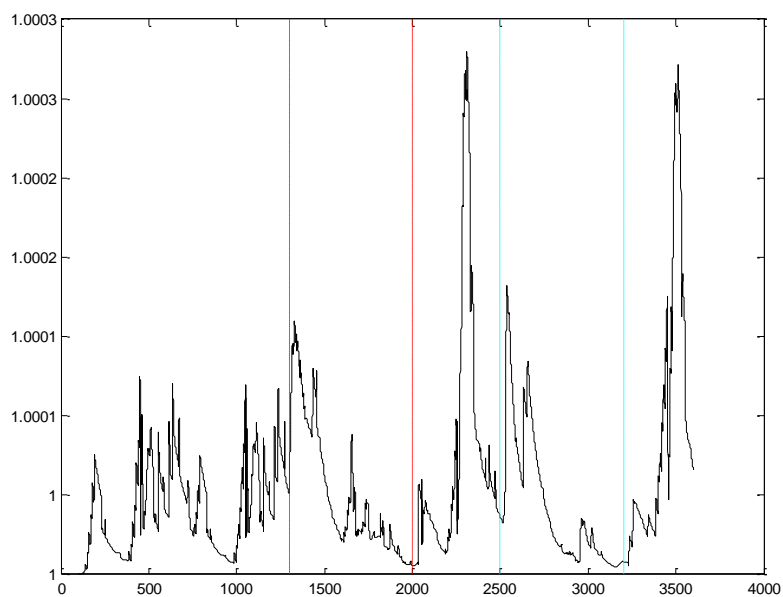
Vrednost praga $P_{th,1} = 0.05$ iz uslova (3.26) podešena je u numeričkom eksperimentu. Minimalno rastojanje između čvorova u (3.27) podešeno je na vrednost $d_{min} = 0.06$. Faktor zaboravljanja algoritma podešen je na istu vrednost kao i faktor zaboravljanja Kalmanovog filtera, odnosno $\lambda = \lambda_{kf} = 0.999$. Estimirane vrednosti

parametara prikazane su na slici 27. Između vertikalnih linija crvene boje nalazi se kvar pumpe dok se između vertikalnih linija plave boje nalazi kvar na ventilu.



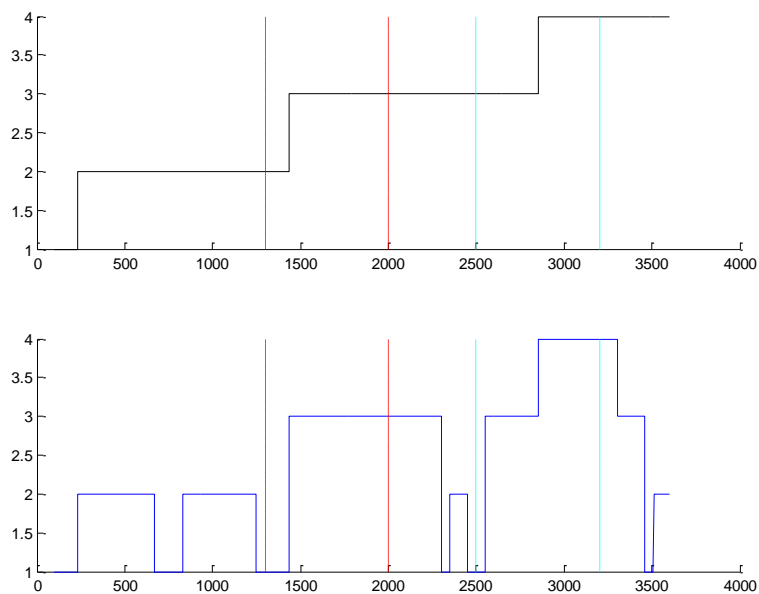
Slika 27. Izlaz iz Kalmanovog filtra. Estimirane vrednosti parametara modela prvog reda

Slika 28 prikazuje recipročnu vrednost informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava.



Slika 28. Recipročna vrednost informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava

Na slici 29 prikazan je ukupan broj detektovanih linearnih modela koji odgovaraju različitim radnim režimima, kao i indeks trenutno aktivnog čvora, odnosno modela koji najbolje opisuje trenutno stanje u kome se posmatrani proces nalazi.



Slika 29. Ukupan broj čvorova i indeks aktivnog čvora

Nominalni radni režim, pre pojave kvara na pumpi (prva vertikalna crvena linija), opisuju **Čvor 1** i **Čvor 2**. Kada se pojavi kvar na pumpi sistem detektuje da je došlo do promene stanja procesa i nakon određenog vremena pojavljuje se novi čvor. Ovaj novi model ostaje aktivan dokle god je prisutan kvar na pumpi. Potrebno je određeno vreme da bi ekspertski sistem registrovao da se proces nakon prestanka kvara pumpe ponovo nalazi u nominalnom radnom režimu te da **Čvor 2**, koji označava nominalno stanje, ponovo postane aktivan (između crvene i plave vertikalne linije).

Kada dođe do pojave kvara na ventilu, aktivni čvor ponovo postaje **Čvor 3** koji zapravo opisuje prethodni kvar u procesu. Nakon nekog vremena, sistem ipak detektuje da se trenutno radno stanje ipak razlikuje od stanja u kome je došlo do kvara na pumpi i reaguje tako što uvodi novi **Čvor 4** koji sada opisuje stanje procesa kada je

prisutan kvar na ventilu. Nakon što nestane kvar na ventilu, proces se vraća u nominalni režim, a aktivni čvor ponovo postaje **Čvor 1**, odnosno **Čvor 2** koji opisuje rad procesa bez prisutnih kvarova.

U nastavku je data tabela 3 koja prikazuje estimirane parametre linearnih modela prvog reda koje daje Kalmanov filter.

Broj modela	a	b	c	Radni režim
1	0	0	0	inicijalni
2	0.9804	0.0249	-0.0027	nominalni
3	-1.795	0.6788	-0.0027	kvar pumpe
4	-1.3836	0.3834	-0.03973	kvar ventila

Tabela 3. Linearni modeli prvog reda (radna stanja) koje na izlazu daje predloženi ekspertski sistem

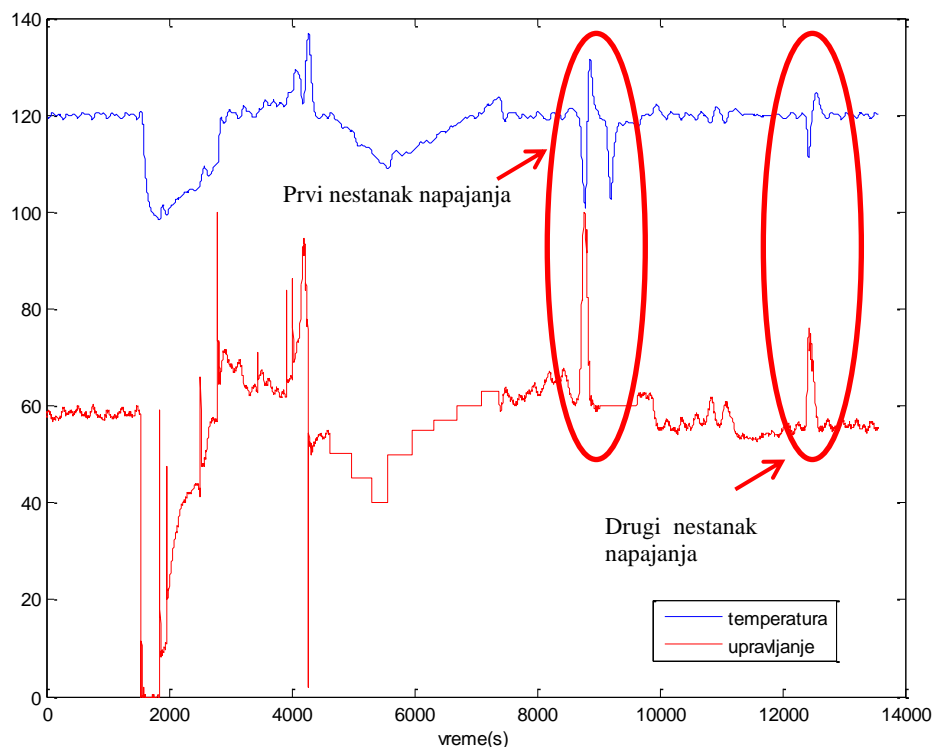
6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa

U ovom poglavlju biće predstavljene rezultati praktične primene ekspertskog sistema za praćenje složenih industrijskih procesa u okviru koje je vršena detekcija kvarova u podsistemima dva složena industrijska postrojenja, čije su osnove predstavljene u prethodnom poglavlju. Eksperimenti su sprovedeni na dve lokacije, u fabrici za preradu ulja Victoria Oil iz Šida i u Termoelektrani Kostolac B.

Svi prikazani rezultati realizovani su u okviru rada na projektu Ministarstva prosvete i nauke Vlade Republike Srbije pod nazivom „*Inteligentni nadzorno-upravljački sistem za rano otkrivanje i eliminaciju neželjenih stanja i promena na uređajima, opremi i procesima procesne industrije*“, ugovor broj 32018 za 2011. godinu.

6.1. Primer nestanka napajanja na ventilu

U ovom primeru prikazaćemo rezultate primene u delu pogona u kome se suncokretovo ulje zagreva pomoću vodene pare. Aktuator u procesu jeste ventil koji upravlja tokom vodene pare. Procesom se upravlja pomoću regulatora PID tipa. Podaci prikupljeni snimanjem signala u ovom sistemu prikazani su na slici 30.



Slika 30. Ulazni i izlazni signali posmatranog procesa

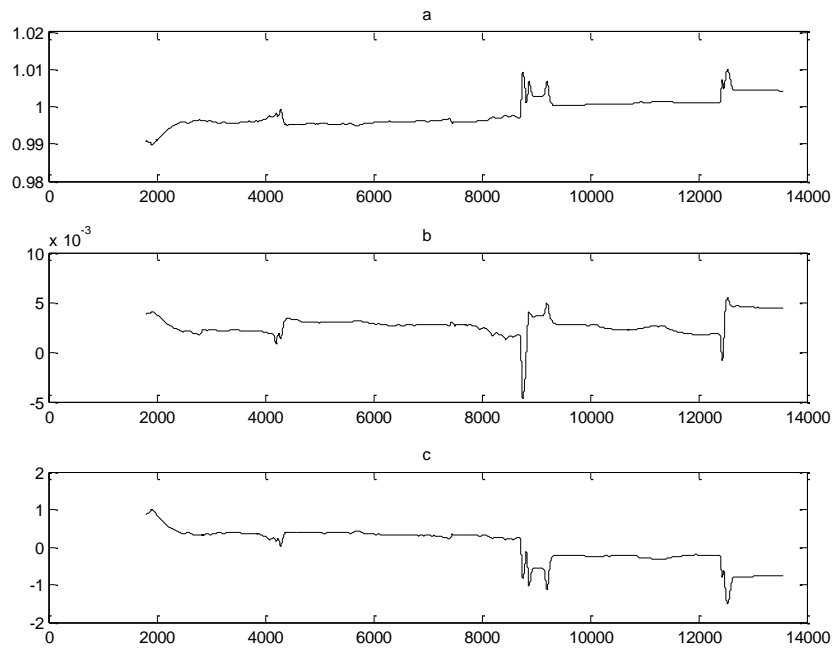
Proces se može opisati modelom prvog reda, odnosno jednačinom

$$y[k] = -ay[k-1] + bu[k-1] + c.$$

Odabiranje je vršeno svake sekunde.

Tipičan neželjeni radni režim u ovom pogonu nastaje kada ventil izgubi napajanje i potpuno se zatvori bez obzira na vrednost upravljačkog signala. Posledično, PID regulator u nastojanju da kompenzuje poremećaj povećava vrednost upravljačkog signala. Slika 31 prikazuje izdvojena obeležja procesa, odnosno parametre modela prvog reda koje na izlazu daje Kalmanov filter.

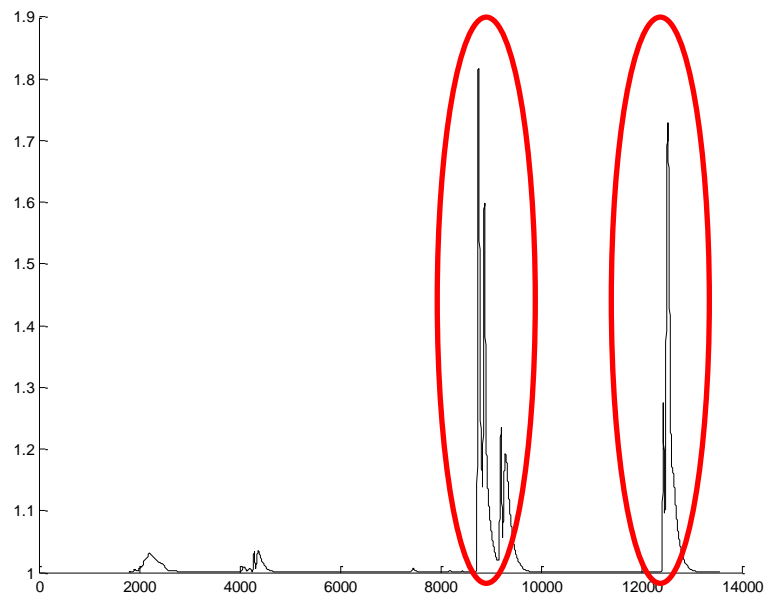
6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa



slika 31. Izlaz iz Kalmanovog filtra. Estimirane vrednosti parametara modela prvog reda

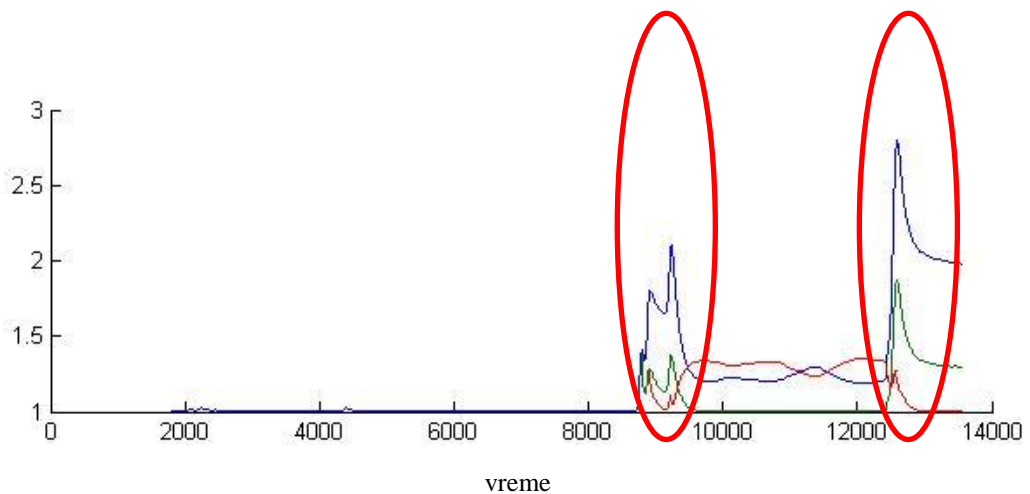
Primenom predloženog sistema ustanovljeno je da se proces može opisati pomoću 3 različita čvora (klastera), od kojih se dva odnose na nominalni radni režim, a jedan na neželjeno radno stanje. Veći broj klastera odgovara istom radnom stanju usled izbora parametara linearnog modela procesa kao svojstava. Usled inherentne nelinearnosti, jedno radno stanje se prividno javlja kroz veći broj klastera. Recipročna vrednost informacionih potencijala tekućeg vektora svojstava prikazana je na slici 32.

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa



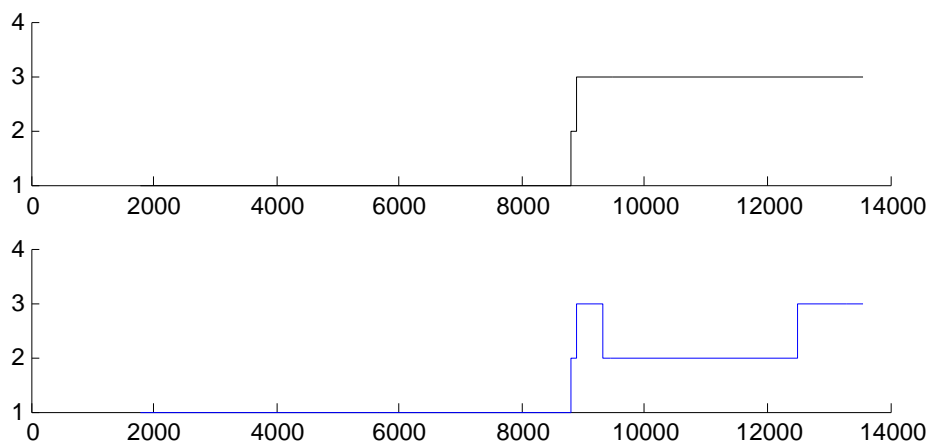
Slika 32. Recipročna vrednost ponderisanog informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava

Slika 33 prikazuje recipročnu vrednost informacionih potencijala čvorova, dok slika 34 prikazuje broj prethodno identifikovanih čvorova i indeks tekućeg aktivnog čvora.



Slika 33. Recipročna vrednost ponderisanih informacionih potencijala čvorova

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa



Slika 34. Ukupan broj čvorova i indeks aktivnog čvora

Jasno se uočava da vrednost informacionog potencijala naglo raste u trenutku kada se javlja neželjeno stanje. Takođe, jasno se vidi promena radnog režima procesa prilikom nestanka napajanja ventila i ponovnog uspostavljanja napajanja.

6.2. Primer praćenja promene parametara procesa desolventizacije u fabrici za preradu ulja

6.2.1. Opis opreme i funkcionisanje dela sistema za ekstrakciju fabrike za preradu ulja

U ovom primeru posmatrali smo jedan od podsistema fabrike *Viktoria Oil* [78] iz Šida.

Grubo gledano, čitav fabrički sistem može se podeliti na tri podsistema:

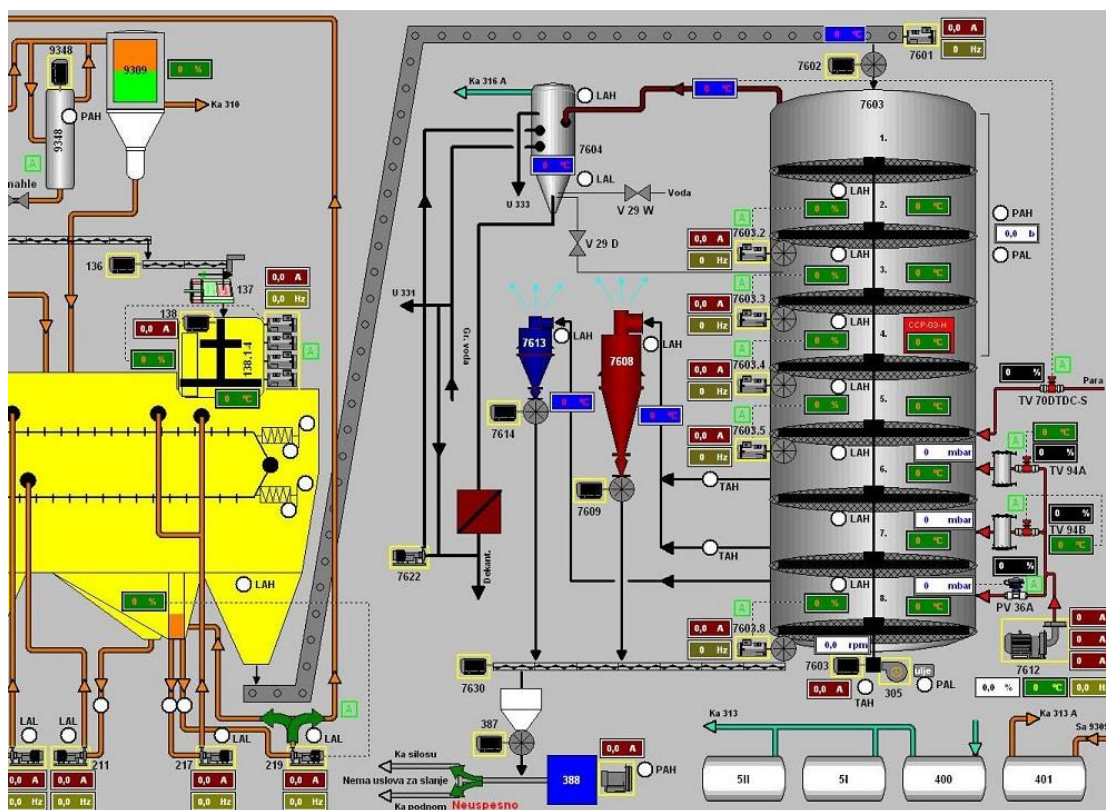
1. *Ljuštiona*
2. *Presaona*
3. *Ekstrakcija*

Podsistem ekstrakcije koji ćemo posmatrati u ovom primeru može se dalje podeliti na:

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa

1. Ekstraktor
2. Desolventizer
3. Destilaciju
4. Absorpciju

Na slici 35 prikazan je izgled dela operatorskog ekrana SCADA sistema podsistema za ekstrakciju.



Slika 35. Deo operatorskog ekrana podsistema za ekstrakciju. Sa desne strane prikazan je Desolventizer (toster)

Obezmaščena saćma na izlazu iz ekstraktora transportuje se do desolventizera, u kom se zagreva i stripuje direktnom parom radi uklanjanja rastvarača. Cilj postupka desolventizacije osim uklanjanja rastvarača jeste i tostiranje kojim se, uglavnom kod sojinog zrna, inaktiviraju antinutritivni faktori u saćmi, kao što su tripsin inhibitori. U okviru desolventizacije vrši se i sušenje i hlađenje saćme tako da je ona na izlazu iz

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa

desolventizera pogodna za skladištenje i transport. Mešavina pare i rastvarača (heksana) izlazi iz procesa desolventizacije kroz filter koji iz nje uklanja zaostale čestice sačme odakle se dalje nastavlja proces destilacije.

Sekcija desolventizacije i tostiranja je kombinovana sa sekcijama sušenja i hlađenja sačme unutar istog uređaja.

Desolventizer-sušara-hladnjak je vertikalni cilindar sastavljen od osam nivoa. Podovi su numerisani od vrha do dna, prateći tok sačme u uređaju: najviši pod je **Pod 1**, a najniži **Pod 8**.

Podovi za desolventizaciju (2, 3, 4) greju se parom i svi imaju rotacione zaustave, koje omogućavaju da sačma pada sa jednog poda na drugi.

Podovi za sušenje su opremljeni mehaničkim klapnama, a pod za hlađenje, koji je ujedno i najniži pod, ima takođe rotacionu zaustavu.

Prečnik uređaja je 4 m.

Šematski, uređaj je podeljen na četiri sekcije:

- **Sekcija za pred-desolventizaciju** na najvišem **Podu 1**, gde se heksan (rastvarač) otparava pomoću indirektnog zagrevanja preko poda grejanog parom. Sačma na ulazu u desolventizer ima temperaturu od oko 60°C i sadrži 26- 30% rastvarača. Ovaj pod je tipa “korpe”, prečnik ovoga poda je manji od spoljašnjeg prečnika i dizajniran je sa unutrašnjom “suknjom”, visine 500 mm, što omogućava gasovima i pari za stripovanje iz donjeg dela uređaja da prolaze prema izlazu gasova na vrhu desolventizera. Sačma na ulazu u desolventizer ima temperaturu od oko 60°C. Na izlazu iz sekcije za pred-desolventizaciju sačma ima temperaturu oko 70°C, a 10-25% rastvarača je već uklonjeno. Sloj sačme u ovom podu nije od značaja i može biti tanak (čak i do 150 mm). Nije predviđena nikakva regulacija nivoa, sačma prolazi kroz fiksne trapezoidne otvore (200x300x850 mm) do sledećeg nivoa.
- **Sekcija za desolventizaciju** sa tri **Pod**a (2, 3, 4) sa protivstrujnim tokom: kombinacija indirektna i direktna pare se koristi za stripovanje zaostalog heksana, a istovremeno se odvija tostiranje sačme.

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa

Na ovim podovima se nalaze okrugla sita, sastavljena od klinastih šipki. Para prolazi kroz otvore pri relativno maloj brzini. Okrugla sita su raspoređena po celom podu, obezbeđujući ravnomernu distribuciju pare.



Slika 36. Kraci za mešanje na podu #4

- **Sekcija za stripovanje** na **Podu 5**. Direktna para, pritiska max. 0,5 bar (g) se uvodi u parnu komoru i injektuje kroz otvore prečnika 3 mm u poslednji pod za desolventizaciju.

Regulacija nivoa i pražnjenje sačme se postiže kao i na podovima sa protivstrujnim tokom.



Slika 37. Sita i krak za mešanje u podu za stripovanje

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa

- **Sekcija za sušenje** sastoji se od dva **Pod**a (6, 7) u kojima se topao vazduh prodivava kroz desolventizovanu sačmu. Ambijentalni vazduh se zagreva u grejačima vazduha 94A i 94B i udvava u vazdušne komore **Pod**a 6 i **Pod**a 7. Gornje ploče vazdušnih komora su perforirane (oko 6000 otvora prečnika 4 mm), čime se omogućava da vazduh prolazi kroz sloj sačme.
- **Sekcija za hlađenje** sastoji se od jednog **Pod**a 8 u kom se ambijentalni vazduh prodivava kroz osušenu sačmu. Gornje ploče vazdušne komore su perforirane (oko 6.000 otvora prečnika 4 mm), čime se omogućava da vazduh prolazi kroz sloj sačme.

Desolventizer je opremljen centralnim vratilom, sa kracima za mešanje na svakom podu. Svaki pod za desolventizaciju i sušenje-hlađenje ima po jedan par krakova za mešanje. Svrha ovih krakova za mešanje je da brzo promešaju sačmu u sloju i da je pomere ka rotacionoj zaustavi ili klapni za pražnjenje.

Ekstrahovana pogača se uvodi u prvi pod za desolventizaciju kroz levak (slika 38).



Slika 38. Ulazni levak kroz koji materijal ulazi u toster

6.2.2. Opis problema

Temperatura mešavine vodene pare i heksana koja izlazi iz desolventizera i ulazi u filter za uklanjanje čestica predstavlja veoma važnu promenljivu ovog procesa. Ova temperatura nikada ne sme da pređe vrednost od 90°C budući da se sam filter nalazi u eksplozivnoj zoni.

Promenljive koje su uzete u razmatranje i koje (indirektno) utiču na posmatranu temperaturu jesu struje i brzine rotacionih zaustava **Podova 2, 3, 4 i 5**, gde najveći uticaj ima brzina rotacione zaustave **Podu 2**. Posmatrane su još i vrednosti temperature sačme na ulazu u desolventizer kao i nivoi sačme (količine materijala) na **Podovima 2, 3, 4, 5 i 8**. Dalje, veoma veliki uticaj na temperaturu mešavine ima struja centralnog vratila koje pokreće krake za mešanje na podovima za desolventizaciju.

Kada sačma uđe u desolventizer, ona se meša uz pomoć jedinstvenog vratila na kome se u svakom podu nalaze kraci za mešanje. Na ulaz **Podu 5** se preko ventila (TV70DTDC-S) u pod ubacuje vrela vodena para koja služi za sušenje sačme. S obzirom da para suši sačmu, njena temperatura opada i ona se zatim meša sa heksanom koji se otparava. Ta mešavina pare i heksana zatim izlazi iz desolventizera i ulazi u filter koji je prečišćava pre destilacije. Kako se filter nalazi u EX zoni, temperatura mešavine heksana i pare veća od 90°C dovela bi do eksplozije. Zato je veoma važno strogo kontrolisati kretanje temperature na izlazu iz desolventizera.

Problem koji se povremeno javlja prilikom rada postrojenja jeste da se u desolventizer ne doprema dovoljno materijala (sačme) i da se usled toga para više temperature meša sa heksanom i ulazi u filter. Zato je potrebno posmatrati promenljive kojima se može uticati na to da se temperatura mešavine održi u dozvoljenim granicama.

Kao najvažnije veličine koje utiču na temperaturu od interesa odabrane su:

- **Brzina rotacione zaustave Podu 2** koja nam indirektno govori o količini materijala u sistemu
- **Struja centralnog vratila** koja nam govori o tome da li se materijal meša na odgovarajući način, odnosno indirektno, da li se odgovarajuća količina pare

koristi za sušenje ili se para veće temperature meša sa heksanom i izlazi ka filteru.

Za rešavanje ovog problema potrebno je što brže detektovati pojavu radnog režima u kome je u sistemu više pare nego što to zahteva količina i kvalitet materijala i tada reagovati na odgovarajući način (ubacivanjem više materijala ili kompletnim zaustavljanjem sistema).

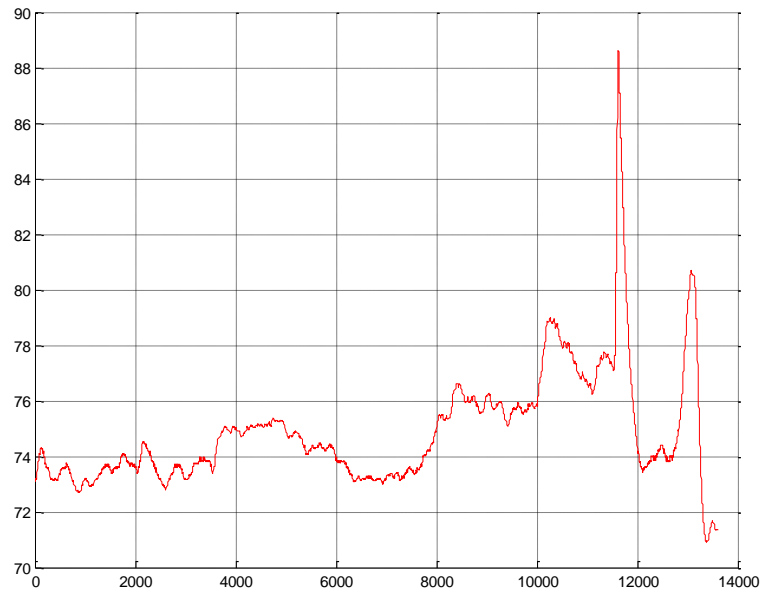
6.2.3. Rešenje problema

Pretpostavljeno je da je model posmatranog procesa drugog reda, odnosno da se proces može opisati diferencnom jednačinom

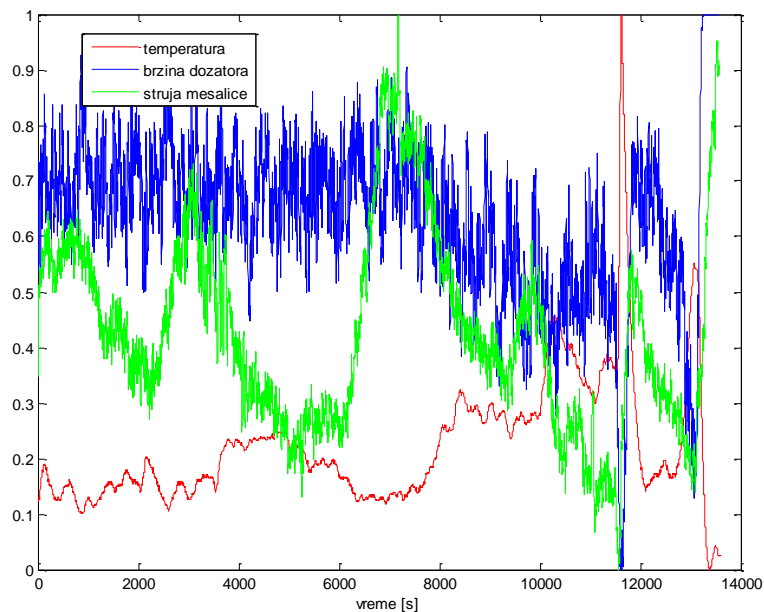
$$y[k] = ay[k-1] + by[k-2] + cu_1[k-51] + du_1[k-52] + eu_2[k-51] + fu_2[k-52] + g$$

gde je izlaz sistema y temperatura mešavine pare i heksana na izlasku iz desolventizera. Ulazi u_1 i u_2 predstavljaju signale **brzine rotacione zaustave Poda 2** i **struje centralnog vratila**, respektivno. Eksperimentalno je utvrđeno da je neophodno uvesti kašnjenje ulaznih signala koje se javlja usled velike inertnosti procesa. Izlazni signal procesa (temperatura mešavine heksana i vodene pare na izlazu iz desolventizera) prikazan je na slici 39 dok su skalirani i filtrirani signali ulaza i izlaza prikazani na slici 40. Vremenska osa pokazuje indekse odbiraka.

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa



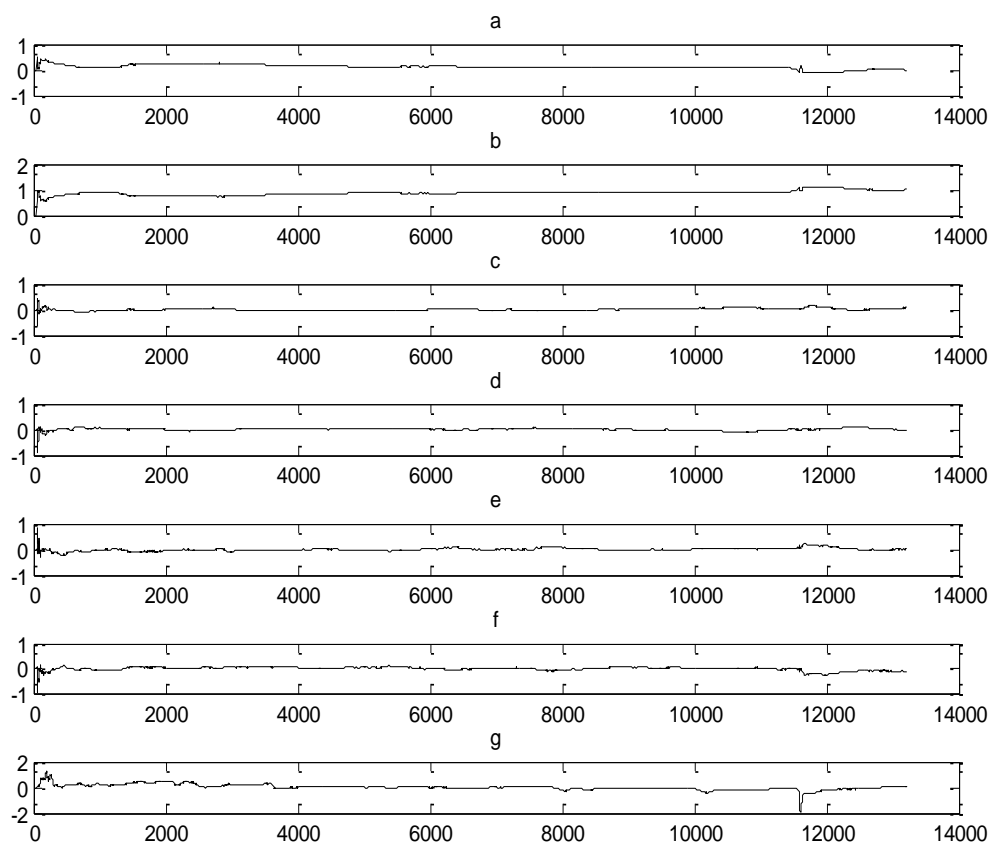
Slika 39. Izlaz procesa. Temperatura mešavine heksana i pare na izlazu iz desolventizera



Slika 40. Izlazni i ulazni signali procesa. Temperatura mešavine heksana i pare na izlazu iz desolventizera označena je cvenom bojom, brzina dozatora plavom a struja mešalice zelenom bojom.

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa

Za vektor svojstava odabran je skup estimiranih parametara procesa $\mathbf{z}_k = (\hat{a}_k, \hat{b}_k, \hat{c}_k, \hat{d}_k, \hat{e}_k, \hat{f}_k, \hat{g}_k)$ koje je generisao Kalmanov filter sa faktorom zaboravljanja $\lambda_{kf} = 0.99$. Estimirane vrednosti parametara prikazane su na slici 41.

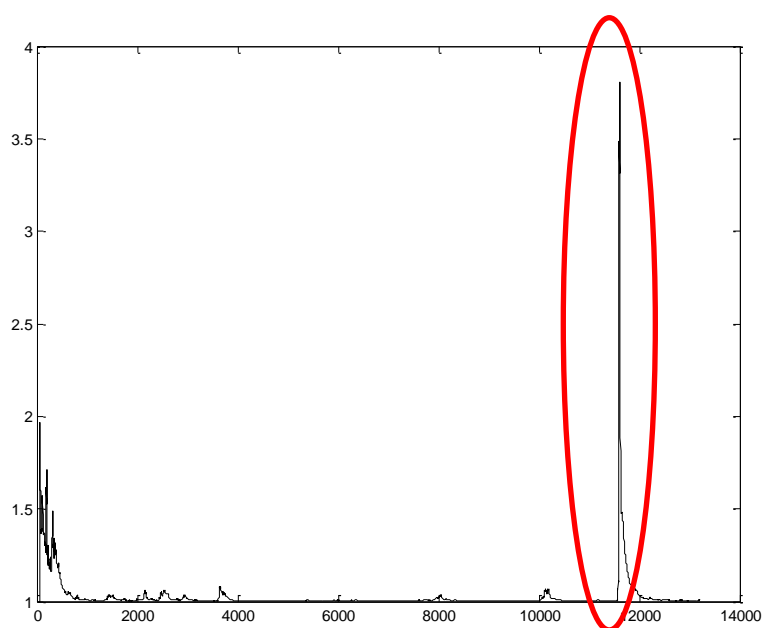


Slika 41. Estimirane vrednosti parametara procesa. Izlaz Kalmanovog filtera

Vrednost praga $P_{th,1} = 0.25$ iz uslova (3.26) podesili smo u nizi numeričkih eksperimenata. Za merenje rastojanja koristili smo standardnu euklidsku normu, a minimalno rastojanje između čvorova u (3.27) podešeno je na vrednost $d_{\min} = 0.35$. Faktor zaboravljanja algoritma podešen je na istu vrednost kao i faktor zaboravljanja Kalmanovog filtera, odnosno $\lambda = \lambda_{kf} = 0.99$.

Dobijena recipročna vrednost ponderisanog informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava prikazana je na slici 42.

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa

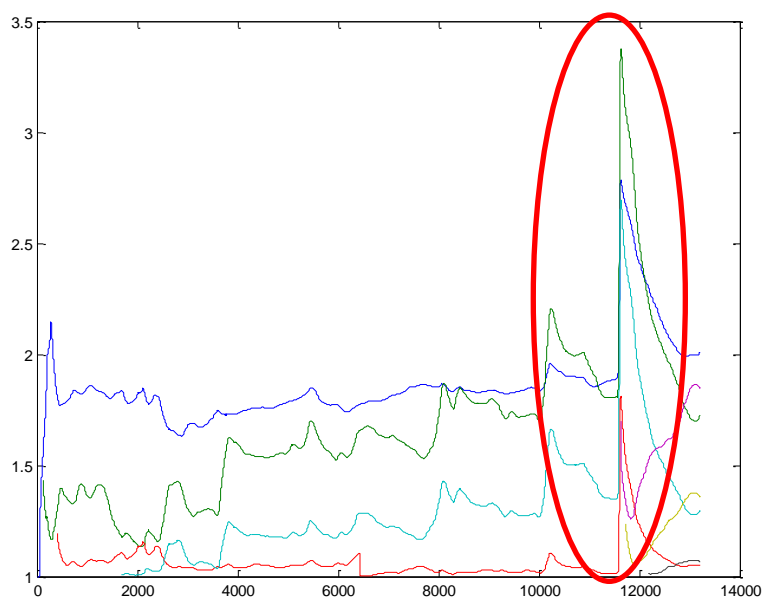


Slika 42. Recipročna vrednost ponderisanog informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava

Vršne vrednosti ponderisanog informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava označava pojavu naglih pjumena u ponašanju posmatranog procesa. Primetimo da se na 11575. odabirku pojavljuje vršna vrednost potencijala što odgovara naglom porastu temperature mešavine heksana i pare na izlazu.

Na slici 43 prikazani su recipročni ponderisani informacioni potencijali postojećih čvorova.

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa

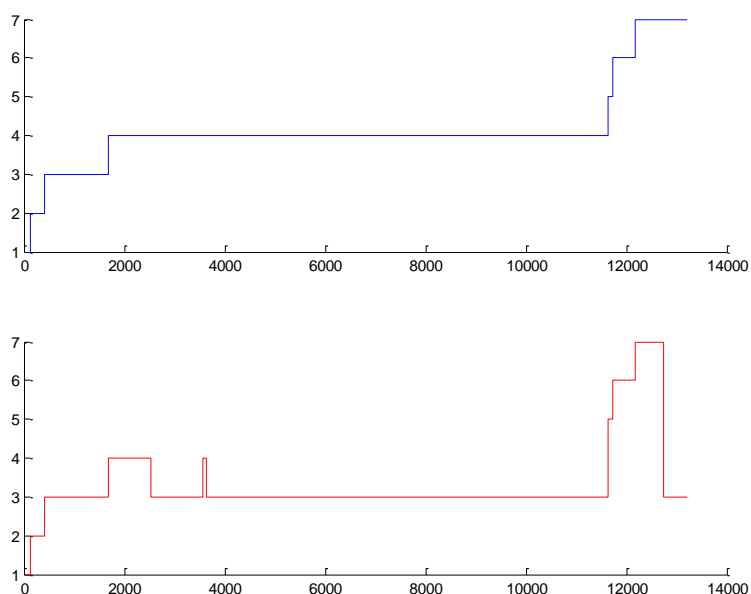


Slika 43. Recipročna vrednost ponderisanih informacionih potencijala čvorova

Čvor 1 predstavlja inicijalni lažni čvor uveden prilikom inicijalizacije postupka. **Čvor 2** se pojavljuje gotovo istovremeno budući da Čvor 1 zapravo ne opisuje radni režim u kome se proces nalazi. **Čvor 3** i **Čvor 4** se pojavljuju u periodu kada je temperatura u dozvoljenom opsegu.

Čvor sa najmanjom recipročnom vrednošću potencijala proglašavamo za aktivni čvor. Indeks aktivnog čvora u vremenu prikazana je na slici 44.

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa



Slika 44. Ukupan broj čvorova i indeks trenutno aktivnog čvora

Iako se vrednost informacionog potencijala menjaju gotovo jednovremeno sa promenom radnog režima, potrebno je određeno vreme da čvor koji odgovara tekućem radnom režimu postane aktivan. Zaključujemo da **Čvor 3** odgovara radnom režimu kada se temperatura kreće u dozvoljenom opsegu, dok **Čvorovi 6 i 7** odgovaraju radnom režimu kada temperatura naglo raste i nalazi se blizu granice dozvoljene vrednosti.

6.3. Primer praćenja promene parametara procesa mlevenja uglja u Termoelektrani Kostolac B

Prethodno opisani sistem za praćenje radnih stanja i detekciju grešaka uspešno je primenjen u pogonima termoelektrane Kostolac B. Konkretno, ilustrovaćemo rezultate primene u delu pogona u kome se nalazi ventilatorski mlin koji se koristi za mlevenje uglja i predstavlja veoma važan podsistem termoelektrane.

6.3.1. Opis podsistema termoelektrane Kostolac B- Krug čvrstog goriva

Pod krugom čvrstog goriva podrazumevamo niz uređaja čija je namena uskladištenje, transport, sušenje, meljava i uduvanje uglja u ložište kotla.

Bunkerski trakt- Bunker uglja

Kotao je opremljen sa osam bunkera uglja računajući do prevoja (razdelnika) bunkera. Donji deo svakog bunkera završava se ispustom koji je opremljen sa sedam pločastih zatvarača. Na proširenjima iznad zatvarača nalaze se otvori sa poklopcima koji služe za ručno obaranje" nalepljenog uglja.

Dodavač uglja

a) Lančasti dodavač uglja

Lančasti dodavač je u osnovi člankasti lanac, koji se kreće po vođicama jednog zatvorenog-vazdušno zaptivenog kućišta. Regulisanje količine uglja vrši se grubo-pomoću pregrade za sloj (visina) i kontinualno-promenom brzine lančastog dodavača. Promena brzine vrši se pomoću varijatora koji je integrisan u pogonskom mehanizmu. Pogon dodavača predstavlja varijator sa prirubičkim elektromotorom, koji je preko fleksibilne spojnice vezan sa pogonskim mehanizmom.

Spoj člankastog lanca sa pogonskim mehanizmom ostvaren je preko lančastog prenosnika.

b) Trakasti dodavač uglja

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa

Sa lančastog dodavača, ugalj se prebacuje na trakasti dodavač. Glavni deo ovog dodavača je transportna gumena traka čiji gornji deo nose grupe od po tri noseća valjka. Donji deo nose povratni valjci. Traka je postavljana u jednom vazdušnom zaptivenom kućištu. Pogon dodavača čini jedan varijator sa prirubničkim elektromotorom, koji je preko elastične spojnice vezan sa vratilom pogonskog bubnja transportera sa trakom.

Usisni trakt

a) Padni kanal

Sa trakastih dodavača, ugalj pada u presipni levak na koji se nastavlja padni kanal. Kanal veličine 600 do 1000 mm, napravljen od čeličnog lima, služi za odvod uglja u reirkulacioni kanal. Neposredno ispod presipnog levka, u kanal je ugrađena klapna sa motornim pogonom (NL3HSOT2). Kanal je takođe opremljen kompenzatorom okruglog preseka koji omogućava diletaciju kanala u odnosu na recirkulacioni kanal.

Na mestu gde se padni kanal spaja na reirkulacioni kanal nalazi se rešetka koju čine 23 štapa koji slobodno vise okačeni o jednu pokretnu osovinu. Namena "rešetke" je da osigura ravnomerno "rasipanje" uglja po celom preseku recirkulacionog kanala.

b) Recirkulacioni kanal

Recirkulacioni kanal služi za usis vrelih dimnih gasova kao i za transport i sušenje sirovog uglja. Sam kanal se sastoji iz usisne glave, tela kanala te prirubnice za vezivanje na kotao i mlin.

Kanal je priključen na zid ložišta kotla na način koji omogućava međusobnu diletaciju, a da se pri tome ne narušava zaptivnost kotla.

Na recirkulacioni kanal su priključeni kanali za: hladni gas (topli vazduh), padni kanal i kanal hladnog vazduha. Svi priključni kanali opremljeni su odgovarajućim klapnama. Kanal je opremljen odgovarajućim osloncima i kompenzatorima. Sa unutrašnje strane kanal je ozidan odgovarajućom izolacionom opekom.

Mlinski agregat

a) Ventilatorski mlin

Opis mlina

Priključak recirkulacionog kanala sastoji se od jedne višedelne konstrukcije. Donji deo se može podići pomoću uređaja za podizanje čime se omogućava pomeranje vrata mlina. Na priključku su postavljeni tablasti (pločasti) zatvarači: koji služe za pregrađivanje recirkulacionog kanala kod radova na mlinu.

Kućište mlina - je zatvorene, čelične konstrukcije i sa svih strana je obloženo pancirima. Kućište je sa prednje strane zatvoreno pokretnim vratima. Na kućištu postoje i montažni otvori koji služe za pojedinačnu zamenu udarnih ploča.

Vrata mlina - se sastoje od kućišta vrata, upuštene kragne i kolica. Kućište vrata i upuštena kragna montirani su na kolicima i iznutra obloženi pancirima sa svih strana. Vrata mlina se mogu pomerati po Šinama.

Udarno kolo - obrće se u kućištu mlina. Opremljeno je fiksno učvršćenim udarnim pločama i konzolno učvršćeno na vratilu duplog ležaja. Konzolna dispozicija udarnog kola omogućava laku izmenu istoga.

Vratilo duplog ležaja - je u duplom ležaju oslonjeno na dva samopodešavajuća valjkasta ležaja na koje se dovodi potrebna količina ulja za podmazivanje.

b) Uljni sistem duplog ležaja

Uljna pumpa pogonjena elektromotorom siše ulje iz kućišta duplog ležaja i potiskuje ga preko duplog filtera i hladnjaka ulja na oba valjkasta ležaja. Prigušnim ventilom NL558002 može se menjati raspodela ukupne količine ulja na jedan i drugi valjkasti ležaj. Nivo ulja se može tačno kontrolisati samo kada je mlin van pogona. Sistem je opremljen instrumentima za merenje pritiska, temperature te kontrolnicima protoka.

Zaptivni prsten - zaptiva vratilo duplog ležaja na mestu ulaska u kućište mlina. Na zaptivni prsten se preko klapne NL31SOTU dovodi vreli vazduh (vazduh za zaptivanje).

Klapna hladnog vazduha - NL325001 normalno se otvara samo pri zaustavljanju mlina da bi se delovi mlina zaštitili od pregrevanja.

Separator - na kućište mlina priključen je međudeo i separator. Uzlazni kanal je sa svih strana obložen panelrima. U separatoru se nalaze separatorske klapne (žaluzine) pomoću kojih se može menjati količina vraćenog griza tj. regulisati finoća meljave. Međudelu pripada i povratni kanal za griz.

Princip rada

Iz bunkera za ugalj usitnjeni vlažni ugalj se sistemom dodavača dovodi do padnog kanala. Kroz padni kanal ugalj ulazi u recirkulacioni kanal u kome struje dimni gasovi. Za vreme padanja, usled mešanja sa vrelin dimnim gasovima, dolazi do sušenja uglja. Pri sprašivanju u udarnom kolu, ugalj se potpuno osuši te kao mešavina nosećeg gasa i ugljanog praha (AEROSMEŠA) odlazi u separator. U separatoru se vrši odvajanje griza, to jest čestice koje prelaze određenu finoću se povratnim kanalom vraćaju na ponovno mlevenje.

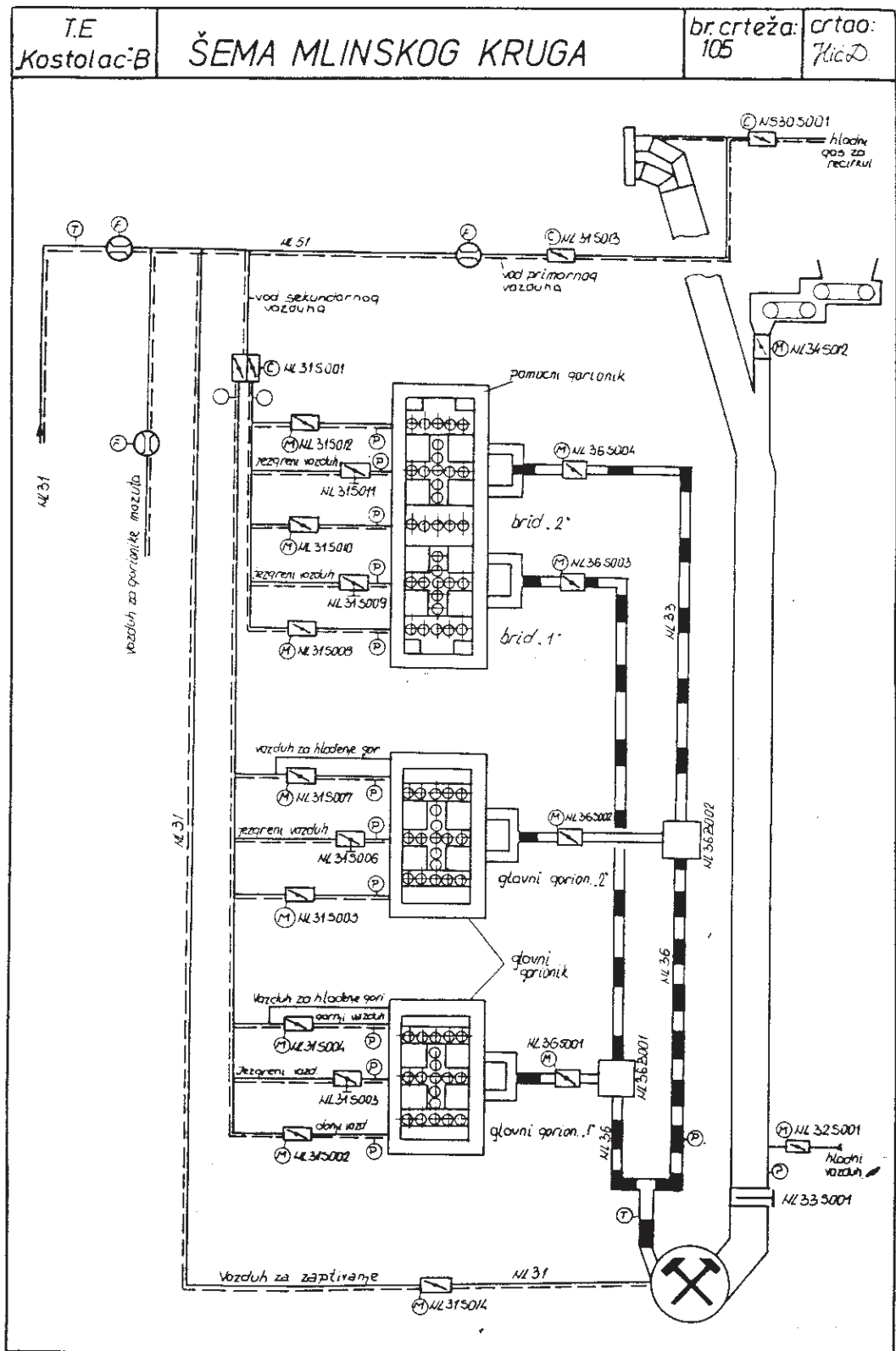
Pod ventilacionim dejstvom podrazumevamo zapreminu aerosmeše koju mlin izbacije i ona zavisi od broja okretaja udarnog kola i stanja pohabanosti mlina.

Aerosmeša izlazi iz mlina sa temperaturom od 120 - 190 °C (maksimalno 210°C) i ova temperatura zavisi od

- **temperatura usisnih dimnih gasova**
- **početne vlažnosti sirovog uglja**
- **kapaciteta mlina**
- **recirkulacije griza**

Temperatura aerosmeše može se menjati i dodavanjem vrelog vazduha ili recirkulacionih hladnih dimnih gasova i vrši se preko priključaka (sa klapnama) koji su postavljeni na recirkulacionom kanalu. Iz separatora mlina kanalima i gorionioima ugljene prašine, se aerosmeša vodi u ložište kotla. Slika 45 prikazuje šemu opisanog mlinskog kruga.

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa



Slika 45. Šema mlinskog kruga

VOITH - hidrodinamička regulaciona spojnica

Opis spojnice

Primarna strana - sastoji se iz pogonskog (primarnog) vratila, primarnog kola i reduktorskog sklopa za pogon zupčaste uljne pumpe spojnice. Vratilo se na ulaznoj strani oslanja na jedan valjkasti ležaj smešten u kućištu spojnice, dok je na izlaznoj strani preko pr-irubničkog sklopa, zajedno sa primarnim kolom oslonjeno na spoljni deo samopodesivog valjkastog ležaja sekundarnog vratila.

Sekundarna strana - sastoji se iz sekundarnog vratila, sekundarnog kola i zupčanika za pogon izlaznog vratila. Sekundarno vratilo se takođe oslanja na dva samopodesiva valjkasta ležaja od kojih je jedan izveden kao aksijalni ležaj. Ovo vratilo nosi i obrtno kolo hidrodinamičke kočnice.

Izlazno vratilo se preko zupčanika pogoni od sekundarnog vratila i oslanja se na dva samopodesiva valjkasta ležaja od kojih je jedan izveden kao aksijalni ležaj. Zupčasta pumpa snabdeva hidrodinamičku regulacionu Spojnicu radnim uljem, uljem za podmazivanje i uljem za upravljanje.

Uljna pumpa kočnice je pogonjena elektromotorom i šalje ulje u hidrodinamičku kočnicu. Energija kretanja se između obrtnog kola i statora kočnice pretvara u toplotnu i odvodi iz ulja.

Opis rada

Po principu rada ovo je protočna spojnica. Obrtni momenat primarnog kola prenosi se na masu tečnosti koja se u tom kolu ubrzava, da bi se u sekundarnom kolu smanjila, prenoseći isti obrtni momenat. Cirkulacija tečnosti može da se ostvari samo padom pritiska sa primarnog na sekundarno kolo. Preduslov za ovo je da se sekundarno kolo okreće sa nešto manjim brojem okretaja od primarnog kola. Ovu razliku broja okretaja primarnog i sekundarnog kola zovemo proklizavanjem i ono nonnalno iznosi 2-3 %. Usled proklizavanja dolazi do gubitka snage a što se odražava u zagrevanju ulja. Odvođenje toplote se vrši preko hladnjaka.

Kontinualna regulacija broja okretaja vrši se promenom punjenja spojnice čime se povećava ili smanjuje proklizavanje. Da bi se sprečilo nedozvoljeno zagrevanje Spojnice, postavljeni su topljivi osigurači koji se tope pri temperaturi od 160 oC

Ulje za podmazivanje se uzima od rashlađenog radnog ulja a zatim se preko duplog filtera potiskuje u ležišta i zupčanike tj. u sistem za upravljanje.

Izduvni trakt

Kanali aerosmeše

Fino samlevena ugljena prašina i noseći gas se iz separatora mlina preko dva odvojena kanala vode do "Ciklona". U ciklonima se vrši razdvajanje aerosmeše, tako da cca 60 % ugljene prašine odlazi u glavni gorionik a preostalih 40 % ide u pomoćni gorionik. U svakom vodu aerosmeše, kako za glavni tako i za pomoćni gorionik, ugrađena je po jedna pregradna klapna (NL363001-NL365004) koja se zatvara po obustavi mlina, da bi se sprečila recirkulacija vrelih dimnih gasova.

Gorionik ugljene prašine

Kotao je opremljen sa osam trodelnih gorionika ugljene prašine. Donji, glavni gorionik čine u stvari dva odvojena gorionika (gorionik "1" i gorionik "2"). Gornji, pomoćni gorionik je jednodelan, ali ima odvojene ulazne kanale aerosmeše.

Grla glavnog i pomoćnog gorionika, dok su van pogona a kotao radi, izložena su vrlo velikom zračenju toplote iz ložišta. Da bi se sprečile termičke deformacije, u svakoj mlaznici za prašinu, na oba gorionika, ugrađene su cevi za hlađenje koje obrazuju jedan krst. Te cevi se hlade jednim delom sekundarnog vazduha. Količina vazduha za hlađenje, reguliše se ručnim klapnama koje su smeštene u dovodnim vodovima. Osim navedenog, glavni gorionici se hlade po obimu vazduhom. Pomoćni gorionici nemaju ovo hlađenje.

Gorionici su ugrađeni u zidove ložišta kotla na takav način (zaptiveni su kliznim pločama a naleganje je ostvareno preko opruga) da je omogućena međusobna dilatacija, a da se pri tome ne narušava zaptivost kotla.

Regulacija kruga čvrstog goriva

Regulacija vazduha

- a) Glavni regulator vazduha

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa

Glavni regulator vazduha obezbeđuje da vazduh doveden u kotao u svakom trenutku odgovara količini goriva. Zadatu vrednost količine vazduha obrazuje u zavisnosti od količine sveže pare, uzimajući u obzir i željeni višak vazduha koji se postavlja odgovarajućim potenciometrom. Glavni regulator vazduha upravlja sa osam regulatora sekundarnog vazduha pojedinih mlinova uglja.

b) Regulacija količine sekundarnog vazduha

Ukupna količina vazduha koja se dovodi jednom gorioniku uglja mora odgovarati količini uglja koja je na datom gorioniku. Pri tome se mora održavati odgovarajući višak vazduha. Ukupna količina vazduha za gorionik sastoji se od vazduha za mlin i sekundarnog vazduha.

Impuls za količinu uglja je broj obrtaja dozatora. Pošto količina uglja, zbog kolebanja toplotne vrednosti, ne predstavlja jedino merilo snage sagorevanja, zadata vrednost količine vazduha se koriguje signalom sa glavnog regulatora vazduha.

c) Regulacija vazduha za mlin (regulacija temperature aerosmeše)

Temperatura aerosmeše treba da se održava u zavisnosti od kapaciteta mlina (broj obrtaja dodavača). Potenciometrom na pultu može se zadata vrednost temperature menjati u opsegu 195 ± 25 °C. Temperatura aerosmeše se prvenstveno reguliše hladnim dimnim gasom.

Količina hladnog gasa je ograničena za jedan recirkulacioni kanal na vrednost od 29 kg/s. Ako regulaciono odstupanje temperature prekorači 5°C onda se dalja regulacija vrši toplim vazduhom.

Količina toplog vazduha se neće povećavati ako brzina sekundarnog vazduha padne ispod brzine od 20 m/s (signal količine sekundarnog vazduha) i ona je deo ukupne struje vazduha koju kontroliše regulator sekundarnog vazduha.

Glavni regulator uglja

Glavni regulator uglja daje signale zadate vrednosti broja obrtaja na podređene regulatora dozatora uglja. Njegova regulisana veličina odgovara sumi broja okretaja

pojedinih dozatora i količine mazuta.

Ovaj signal se koriguje u zavisnosti od temperature napojne vode dok je zadata vrednost regulatora uglja je pritisak pare.

Regulacija broja obrtaja dozatora

Broj obrtaja dozatora (sistem 2-3 trake koje transportuju ugalj od bunkera do mlinova) određuje glavni regulator uglja. Pošto je zadata vrednost broja obrtaja zajednička za sve trake to znači da se oni svi paralelno vode. Postoji i mogućnost, da se ta zadata vrednost sa pulta, za svaki dozator pojedinačno odredi, čime se opterećenje mlinova može prilagoditi njihovoj pohabanosti.

Slika 46 prikazuje jedan deo ekrana nadzorno- upravljačkog softvera koji se odnosi na milnski krug.

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa

Pod ventilacionim dejstvom podrazumevamo zapreminu aerosmeše koju mlin izbacuje i ona zavisi od broja okretaja udarnog kola i stanja pohabanosti mlina.

Aerosmeša izlazi iz mlina sa temperaturom od 120 - 190 °C (maksimalno 210 °C) i ova temperatura zavisi od

- **temperatura usisnih dimnih gasova**
- **početne vlažnosti sirovog uglja**
- **kapaciteta mlina**
- **recirkulacije griza**

Temperatura aerosmeše može se menjati i dodavanjem vrelog vazduha ili recirkulacionih hladnih dimnih gasova i vrši se preko priključaka (sa klapnama) koji su postavljeni na recirkulacionom kanalu. Iz separatora mlina kanalima i gorionicima ugljene prašine, se aerosmeša vodi u ložište kotla.

Temperatura aerosmeše koja predstavlja veoma važnu promenljivu ovog procesa treba da se održava u zavisnosti od kapaciteta mlina (broj obrtaja dodavača). Impuls za količinu uglja je broj obrtaja dozatora. Pošto količina uglja, zbog kolebanja toplotne vrednosti, ne predstavlja jedino merilo snage sagorevanja, zadata vrednost količine vazduha se koriguje signalom sa glavnog regulatora vazduha.

Kao najvažnije veličine koje utiču na temperaturu od interesa odabrane su:

- **broj obrtaja dozatora mlina**
- **ukupni protok toplog vazduha**

Za rešavanje ovog problema potrebno je što brže detektovati pojavu radnog režima u kome je došlo do pojave niskokvalitetnog uglja na dozatoru ili je nivo uglja na dozatoru nizak i tada reagovati na odgovarajući način.

6.3.3. Rešenje problema

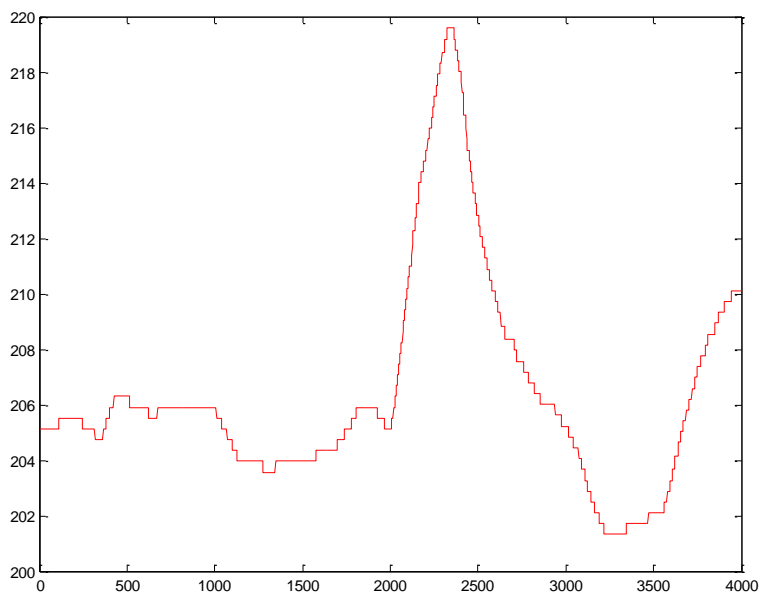
Pretpostavljeno je da je model posmatranog procesa prvog reda, odnosno da se proces može opisati diferencnom jednačinom

$$y[k] = ay[k-1] + bu_1[k-1] + cu_2[k-1] + d$$

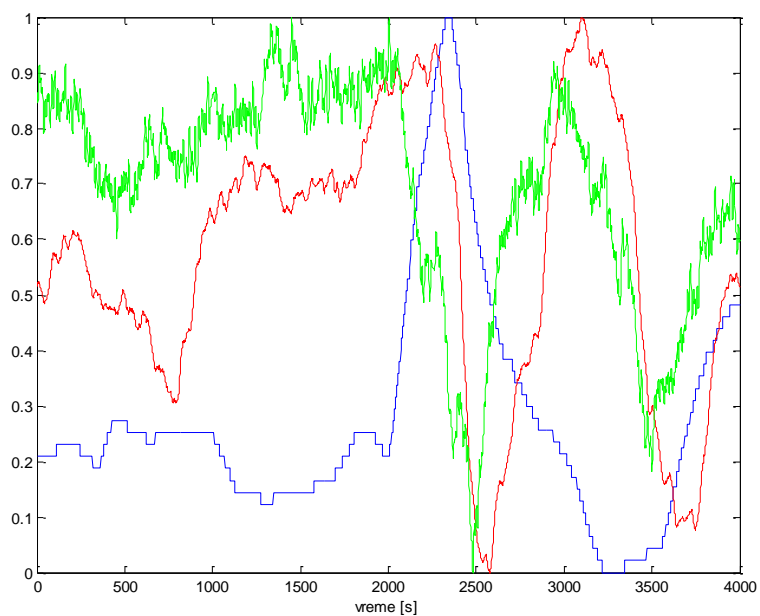
gde je izlaz sistema temperatura aerosmeše. Ulaze predstavljaju signali broja obrtaja dozatora mlina i ukupnog protoka toplog vazduha, respektivno. Izlazni signal procesa

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa

prikazan je na slici 47 dok su skalirani signali ulaza i izlaza prikazani na slici 48. Vremenska osa pokazuje indekse odabiraka.



Slika 47. Temperatura aerosmeše



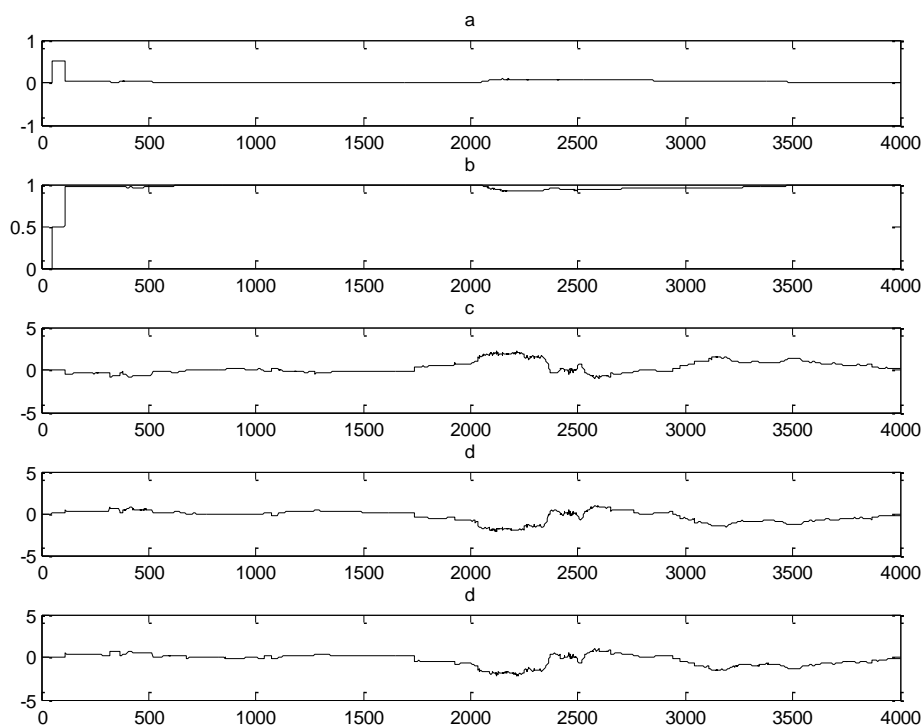
Slika 48. Ulazni i izlazni podaci prikupljeni snimanjem podataka mlinskog kruga u TE-KO Kostolac

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa

Tipičan neželjeni radni režim u ovom pogonu nastaje kada temperatura aerosmeše počne neglo da raste usled pojave manje količine uglja na transporterima-
dozatorima ili usled poremećenih parametara procesa u mlin dospeva ugalj čija
vlažnost nije u dozvoljenom opsegu.

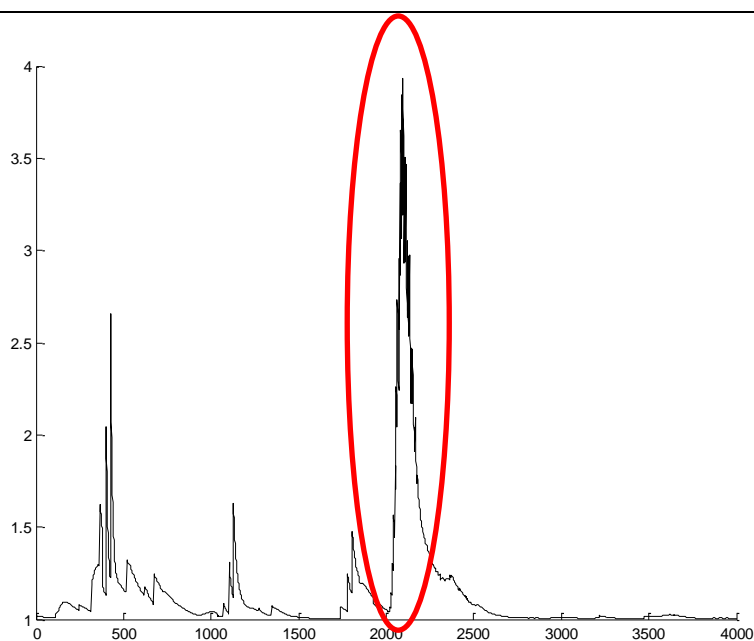
Za vektor svojstava odabran je skup estimiranih parametara koje je generisao
Kalmanov filter sa faktorom zaboravljanja α a dobijene vrednosti parametara linearnog
modela drugog reda prikazane su na slici 49.

Dobijena recipročna vrednost ponderisanog informacionog potencijala tekućeg
vektora svojstava prikazana je na slici 50.



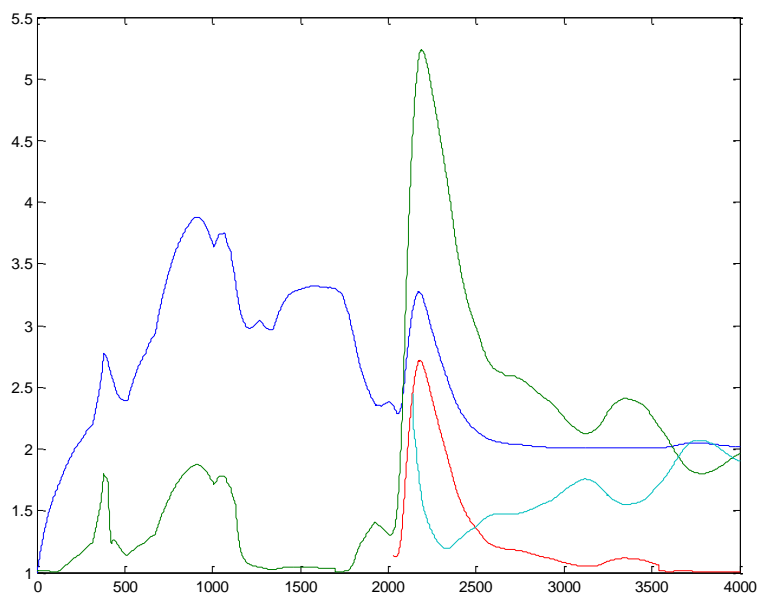
Slika 49. Estimirane vrednosti parametara procesa. Izlaz Kalmanovog filtera

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa



Slika 50. Recipročna vrednost ponderisanog informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava

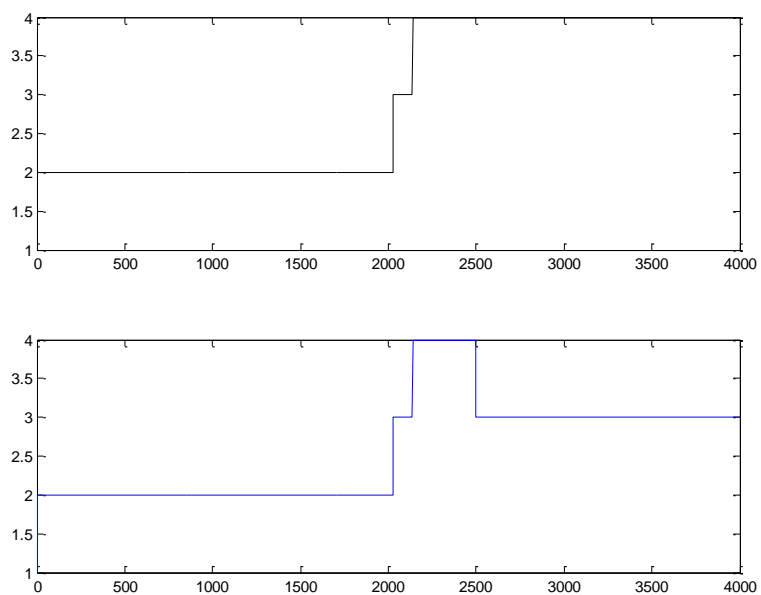
Vršne vrednosti ponderisanog informacionog potencijala tekućeg vektora svojstava označava pojavu naglih promena u ponašanju posmatranog procesa. Jasno se uočava da vrednost informacionog potencijala naglo raste u trenutku kada se javlja neželjeno stanje. Primetimo da se na 2190. odabirku pojavljuje vršna vrednost potencijala što odgovara naglom porastu temperature aerosmeše. Na slici 51 prikazani su recipročni ponderisani informacioni potencijali postojećih čvorova.



Slika 51. Recipročna vrednost ponderisanih informacionih potencijala čvorova

Čvor 1 jeste inicijalni lažni čvor. **Čvor 2** se pojavljuje gotovo istovremeno budući da Čvor 1 zapravo ne opisuje radni režim u kome se proces nalazi. **Čvor 3** i **Čvor 4** se pojavljuju u periodu kada temperatura raste i izlazi iz dozvoljenog opsega. Čvor sa najmanjom recipročnom vrednošću potencijala proglašavamo za aktivni čvor. Broj prethodno identifikovanih klastera (čvorova), te indeks tekućeg aktivnog klastera su prikazani na slici 52.

6. Primeri primene predloženog postupka za praćenje industrijskih procesa



Slika 52. Ukupan broj klastera i indeks trenutno aktivnog čvora

7. Zaključak

U ovom radu predstavljeno je jedno rešenje ekspertskog sistema za brzu detekciju i izolaciju neželjenih stanja dinamičkih sistema. Prikazana je originalna modifikacija prilagodljivog algoritma za grupisanje podataka [10] koje, između ostalog, imaju cilj da u realnim sistemima, gde je vreme izračunavanja posebno kritično, a konkretno u slučaju postupka klasifikacije stanja i detekcije kvarova industrijskih sistema, unaprede performanse i poboljšaju efikasnost i pouzdanost ovih sistema.

Nakon uvodnog poglavlja 1, u poglavlju 2 date su teorijske osnove detkcije i izolacije (dijagnoze) neželjenih stanja dinamičkih sistema. Uvedene su definicije osnovnih pojmova vezanih za detkciju i izolaciju grešaka kao i pregled metoda koje su aktuelne u ovoj oblasti.

U okviru poglavlja 3 predstavljena je originalna varijanta algoritma za grupsannje i razvrstavanje podataka, koju su predložili Angelov i Filev [10]. Objašnjena je osnovna ideja i motivacija za nastanak ovog algoritma, istaknuta i

prikazana je njegova matematička formulacija u obliku jednačine, uz tumačenje uloge i uticaja svih parametara koji u njoj figurišu.

U poglavlju 4 opisana je procedura projektovanja i implementacije prilagodljivi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju grešaka u radu dinamičkih sistema zasnovanog na PBRC algoritmu. Prikazani su rezultati empirijskog testiranja ovog sistema na laboratorijskom postorjenju za regulaciju pritiska.

U poglavlju 5 prikazani su rezultati praktične implementacije prethodno opisanog ekspertskog sistema za detekciju i izolaciju neželjenih stanja. Vršena detekcija kvarova u podsistemima dva složena industrijska postrojenja. Eksperiment je sproveden na dve lokacije, u fabrici za preradu ulja Victoria Oil iz Šida i u Termoelektrani Kostolac B.

Na osnovu predstavljenih rezultata, može se zaključiti da predloženi ekspertski sistem za brzu detekciju i izolaciju neželjenih stanja dinamičkih sistema, baziran na prilagodljivom algoritmu za grupisanje i razvrstavanje podataka [3,4] daje značajan doprinos oblasti detekcije i dijagnoze grešaka u radu sistema kao i oblasti nadzora procesa, u vidu poboljšanja performansi i sveukupnog unapređenja kvaliteta praćenja složenih dinamičkih sistema. Pored toga, iz rezultata eksperimenata izvedenih u kontrolisanom laboratorijskom i realnom industrijskom okruženju, proizilazi zaključak da je predloženi ekspertski sistem u potpunosti adekvatan za primenu u detekciji i klasifikaciji kvarova u složenim industrijskim sistemima i da može obezbediti brze, tačne i pouzdane klasifikatore kvarova koji se mogu uspešno primeniti u realnim industrijskim sistemima.

Bibliografija

- [1] Atanackovic, T.M., Jakovljevic, B.B., Petkovic, M.R., "On the optimal shape of a column with partial elastic foundation," *European Journal of Mechanics A/Solids*, vol. 29, pp. 283-289, 2009..
- [2] Milan R. Rapaić, Milena Petković, Zoran D. Jeličić, "Prilagodljivi postupak za grupisanje podataka sa primenama u otkrivanju grešaka u radu industrijskih procesa," in *ETRAN*, 2011.
- [3] Milan R. Rapaić, Milena Petković, Zoran D. Jeličić, Alessandro Pisano, "An Adaptive Clustering Procedure with Applications to Fault detection," *Electronics*, vol. 15, no. 2, pp. 91-97, Dec. 2011.
- [4] Milena Petković, Milan R. Rapaić, Zoran D. Jeličić, Alessandro Pisano, "On- line adaptive clustering for process monitoring and fault detection," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, pp. 10226-10235, 2012.
- [5] Željko Kanović, Dragan Matić, Zoran Jeličić, Milena Petković, "Induction Motor Fault Diagnosis Based on Vibration Analysis – a Case Study," *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, vol. 17, no. 1, pp. 47-50, 2013.
- [6] Filip Kulić, Željko Kanović, Milena Petković, Dragan Matić, "Expert System for Induction Motor Fault Detection," *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, vol. 14, no. 4, pp. 173-177, 2010.
- [7] Milena R. Petković, Milan R. Rapaić, Boris B. Jakovljević, "Energy Consumption Forecasting in Process Industry Using Support Vector Machines and Particle Swarm Optimization," *WSEAS TRANSACTIONS on INFORMATION SCIENCE and APPLICATIONS*, vol. 6, no. 11, pp. 1761-1770, Nov. 2009.
- [8] Milena Petković, Boris Jakovljević, Željko Kanović, Dušan Petrovački, Milan Rapaić, "Expert systems for fault detection and isolation in process industry," in *2nd Regional Conference Industrial Energy and Environmental Protection*, Zlatibor, Serbia, 2010.
- [9] Milan Rapaić, Željko Kanović, Milena Petković, Boris Jakovljević, Zoran Jeličić, "An overview model- based fault detection in process industry," in *2nd Regional Conference Industrial Energy and Environmental Protection*, Zlatibor, Serbia, 2010.
- [10] P. F. D. P. Angelov, "An approach to on-line identification of Takagi-Sugeno fuzzy models," *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetic, Part B- Cybernetics*, vol. 34, no. 1, pp. 484-498, 2004.
- [11] Angelov, P., Filev, D.P. & Kasabov, N., Ed., *Envolving intelligent systems- methodology and applications*, IEEE Press Series on Computational Intelligence ed. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc, 2010.
- [12] Milena Petkovic, Željko Kanović, Zoran Jeličić, Milan Rapaić, "EXPERT

-
- SYSTEM IN DOMAIN OF ENERGY EFFICIENCY AND FAILURE DETECTION IN PROCESS INDUSTRY," in *Zbornik radova četvrte međunarodne konferencije INOPTEP*, 2015.
- [13] J. Love, *Process automation handbook- A guide to theory and practice*. Springer-Verlag London Limited., 2007.
- [14] I. Rolf, *Fault- diagnosos systems- An introduction from fault detection to fault tolerance*. Berlin Heidelberg: Springer- Verlag.
- [15] S. X. Ding, *Model based fault diagnosis techiques*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [16] Venkatasubramanian, V., Rengaswami, R., Yin, K., Kavuri, S.N, "A review of process fault detection and diagnosis Part I : Quantitative model-based methods," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 27, pp. 293-311, 2003.
- [17] Venkatasubramanian, V. Rangaswami, R. Kavuri S.N. , "A review of process fault detection and diagnosis Part II: Quantitative models and search strategies," *Computers and Chemical Engineering* , vol. 27, pp. 213-326, 2003.
- [18] Venkat Venkatasubramanian, Raghunathan Rengaswamy, Surya N. Kavuri, "A review of process fault detection and diagnosis Part III: Process history based methods," *Computer and Chemical Engineering*, vol. 27, pp. 327-346, 2003.
- [19] A. J. Izenman, *Modern multivariate statistical techniques: regression. Classification and manifold learning*. Springer Science+Business Media, 2008.
- [20] J. O. Berger, *Statistical decision theory and Bayesian analysis 2en Ed*. Springer Science+Buisnes Media.
- [21] K. Vojislav, *Learning and soft Computing: support vector machines, neural networks and fuzzy logic models*. MIT Press, 2001.
- [22] Schokoph B. Smola A.J. , *Learning with kernels*. MIT Press, 2002.
- [23] Ignacio Yelamos, Gerard Escruder, Moises Graells, Luis Puigjaner, "Performance assessment of a novel fault diagnosis system based on support vector machines," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 33, pp. 244-255, 2009.
- [24] Ž. Kanović, "Expert System for Induction Motor Fault Detection Based on Vibration Analysis," in *Fault Detection – Classification, Techniques and Role in Industrial Systems*. New York: Nova Publishers, 2013, pp. 113-126.
- [25] Claudio M. Rocco S. Enrico Zio, "A support vector machine integrated system for classification of operation anomalies in nuclear components and systems," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 92, pp. 593-600, 2007.
- [26] Chang Yan-wei, Wang Yao-cai, Liu Tao, Wang Zhi-jie, "Fault diagnosis of a mine hoist using PCA and SVM techniques," *J China Univ Mining & Technolog* , vol. 18, pp. 0327-0331, 2008.
- [27] Jozef Korbicz, Marek Kowal, "Neuro- fuzzy networks and their application to fault detection of dynamical systems," *Engineering Application of Artificial Intelligence* , vol. 20, pp. 609-6017.
- [28] Bo-Suk Yang, Dong-Soo Lim, Andy Chit Chiow Tan, "VIBEX: an expert system for vibration fault diagnosis of rotating machinery using decision tree and
-

-
- decision table," *Expert Systems with Application*, vol. 28, pp. 735-472, 2005.
- [29] Kanović Ž., Rapaić M.R., Jeličić Z.D., "Generalized particle swarm optimization algorithm- Theoretical and empirical analysis with application in fault detection," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 214, no. 24, pp. 10175-10186, Aug. 2011.
- [30] Matić D., Kulić F., Pineda Sanchez M., Kamenko I., "Support Vector Machine Classifier for diagnosis in electrical machines. Application to broken bar," *expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 10, p. 8681–8689, 2012.
- [31] Mendoca L.F., Sousa J., da Costa J.S., "An architecture for fault detection and isolation based on fuzzy models," *Expert systems with Application*, vol. 36, p. 1092–1104, 2009.
- [32] Quian Y., Li X., Wen Y., "An expert system for real-time fault diagnosis of complex chemical processes," *Expert Systems with Application*, vol. 24, no. 4, pp. 425-432, 2003.
- [33] Tang J.Z., Wang Q.F., "Online fault diagnosis and prevention expert system for dredgers," *Expert Systems with Application*, vol. 34, no. 1, pp. 511-521, 2008.
- [34] White C.J., Lakany, H., "A fuzzy interface system for fault detection and isolation: Application to fluid system," *Expert Systems with Application*, vol. 35, no. 3, pp. 1021-1033, 2008.
- [35] "IEC 61508 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic systems," International Electrotechnical Commission, 1997.
- [36] Iserman R., Balle P., "Trends in application of model-based fault detection and diagnosis of technical process," *Control Engineering Practice*, vol. 5, no. 5, pp. 709-719, 1997.
- [37] Karami, F., Poshtan, J., & Poshtan, M., "Detection of broken rotor bars in induction motors using nonlinear Kalman filters," *ISA Transactions*, vol. 49, pp. 189-195, 2010.
- [38] Villeza, K., Srinivasan, B., Rengaswamy, R., Narasimhan, S., & Venkatasubramanian, V., "Kalman-based strategies for fault detection and identification (fdi): Extensions and critical evaluation for buffer tank system," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 35, pp. 806-816, 2011.
- [39] Chinniah, Y., Burton, R., & Habbibi, S., "Failure monitoring in a high performance hydrostatic actuation system using the extended Kalman filter," *Mechatronics*, vol. 16, pp. 643-653.
- [40] F. P., "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy," *Automatica*, vol. 26, no. 3, pp. 459-474, 1990.
- [41] G. J., *Fault detection and diagnosis in engineering systems*. New York: Marcel Dekker, 1998.
- [42] S. X. Ding, *Data-driven Design of Fault Detection and Fault-tolerant Control Systems*, Advances in Industrial Control ed. Springer, 2014.
- [43] B. J. Johnson, "Fault tolerance," in *The Electrical Engineering Handbook, Second Edition*. CRC Press, 1989, ch. 93.
- [44] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Applications Model-Based: Condition Monitoring:*
-

-
- Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems*. Springer, 2011.
- [45] Desai M., Ray A., "A fault detection and isolation methodology- theory and application," in *Proceedings of American Control Conference* , 1984, pp. 262-270.
- [46] R. B. Broen, " A nonlinear voter-estimator for redundant systems," in *Proceedings of IEEE conference on decision control systems*, Phoenix, Arizona, 1974, pp. 743-478.
- [47] J. Korbicz, "Process Diagnostics Methodology," in *Fault Diagnosis- Models, Artificial Intelligence, Applications*, J. ., K. J. M. ., K. Z. ., C. W. Korbicz, Ed. Springer, 2004, ch. 2, pp. 59-117.
- [48] Benbouzid, M.E.H, Vieira, M. ,Theys, C., "Induction motors' faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 14, no. 1, pp. 14-22, 1999.
- [49] Željko Kanović, Zoran Jeličić, Milan Rapačić, Boris Jakovljević, Milena Petković, "An Application for Induction Motor Fault Detection Based on Vibration Analysis and Support Vector Machines," in *24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems- ECOS 2011*, Novi Sad, 2011, pp. 1827-1836.
- [50] Jie Liu, Wilson Wang, Farid Golnaraghi, Kefu Liu, "Wavelet spectrum analysis for bearing fault diagnostics," *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*, vol. 19, 2008.
- [51] G. DALPIAZ, A. RIVOLA, R. RUBINI, "EFFECTIVENESS AND SENSITIVITY OF VIBRATION PROCESSING TECHNIQUES FOR LOCAL FAULT DETECTION IN GEARS," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 14, no. 3, pp. 387-412, 2000.
- [52] Rich, S. H., Venkatasubramanian, V., "Model-based reasoning in diagnostic expert systems for chemical process plants," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 111-122, 1987.
- [53] Margaret E. Janusz, Venkat Venkatasubramanian, "Automatic generation of qualitative descriptions of process trends for fault detection and diagnosis," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 5, pp. 329-339, 1991.
- [54] R. S. H. MAH, A C. TAMHANE, S. H. TUNG, A. N. PATEL, "Process trending with piecewise linear smoothing," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 129-137, 1995.
- [55] Mano Ram Maurya, Raghunathan Rengaswamy, Venkat Venkatasubramanian, "Fault diagnosis using dynamic trend analysis: A review and recent developments," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 20, no. 2, p. 133-146, 2007.
- [56] Bayram, D. Seker, S., "Wavelet based trend analysis for monitoring and fault detection in induction motors," in *IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2014, pp. 1-4.
- [57] ChunMei Yu., Quan Pan Yongmei Cheng, Hongcai Zhang, "A kernel-based
-

-
- bayesian classifier for fault detection and classification," in *7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA*, Chongqing, 2008, pp. 124-128.
- [58] G. Lo Re, F. Milazzo, M. Ortolani, "A Distributed Bayesian Approach to Fault Detection in Sensor Networks," in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference*, 2012, pp. 634-639.
- [59] K. Pearson, "On lines and planes of closest fit to systems of points in space," *Philosophical Magazine Series 6*, vol. 2, no. 11, pp. 559-572, 1901.
- [60] Evan L. Russell, Leo H. Chiang, Richard D. Braatz, "Fault detection in industrial processes using canonical variate analysis and dynamic principal component analysis," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 51, pp. 81-93, 2000.
- [61] Masayuki Tamura, Shinsuke Tsujita, "A study on the number of principal components and sensitivity of fault detection using PCA," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 31, no. 9, p. 1035–1046, 2007.
- [62] Ahmed, M., Gu, Fengshou Ball, Andrew, "Fault Detection and Diagnosis using Principal Component Analysis of Vibration Data from a Reciprocating Compressor," in *18th International Conference On Automation And Computing (ICAC), IEEE, 2012.*, pp. 461-466.
- [63] R. Isermann, "Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods A Survey," *Automatica*, vol. 20, no. 4, pp. 387-404, 1984.
- [64] R. Isermann, "Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing—Tutorial paper," *Automatica*, vol. 29, no. 4, pp. 815-835, 1993.
- [65] Philippe Weber, Sylviane Gentil, "Fault detection using parameter estimation applied to awinding machine," in *IAR Annual Conference*, Duisburg, Germany, 1997.
- [66] Jiang, T., Khorasani, K., Tafazoli, S., "Parameter Estimation-Based Fault Detection, Isolation and Recovery for Nonlinear Satellite Models," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 16, no. 4, pp. 799-808, 2008.
- [67] P. M. Frank, "Enhancement of robustness in observer-based fault detection," *International Journal of Control*, vol. 59, no. 4, pp. 955-981, 1994.
- [68] J. Gertler, *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. CRC Press, 1998.
- [69] J. Gertler, "Analytical redundancy methods in fault detection," in *Proceedings of IFAC/IAMCS symposium on safe process*, 1991.
- [70] A. S. Willsky, "A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems," *Automatica*, vol. 12, pp. 601-611, 1976..
- [71] Janos Gertler, David Singer, "A new structural framework for parity equation-based failure detection and isolation," *Automatica*, vol. 26, no. 2, 1990.
- [72] Janos J. Gertler, Ramin Monajemy, "Generating directional residuals with dynamic parity relations," *Automatica*, vol. 31, no. 4, 1995.
- [73] P. Angelov, *Evolving Rule-Based Models: A Tool for Design of Flexible*
-

-
- Adaptive Systems*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2002.
- [74] National Instruments. [Online]. <http://serbia.ni.com/>
- [75] R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," *Transactions of the ASME--Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. Series D, pp. 35-45, 1960.
- [76] Kovačević Branko, Đurović Željko, *Fundamentals of Stochastic Signals, Systems and Estimation Theory with Worked Examples*. Beograd, Serbia: Springer Academic Mind, 2008.
- [77] N. Instruments. (2012) NI CompactRIO developers guide. [Online]. <http://www.ni.com/compactriodevguide/>
- [78] V. Group. Victoria Oil. [Online]. <http://www.victoriaoil.rs/>
- [79] Milan R. Rapačić, Zoran D. Jeličić, *Projektovanje linearnih reglatora i estimatora u prostoru stanja*. FTN Izdavaštvo, 2014.

Biografija autora

Milena Petković rođena je 04. 06. 1982. godine u Požarevcu, gde je završila osnovnu školu i Gimnaziju „Jovan Šerbanović“, prirodno-matematički smer. Septembra 2001. upisala je osnovne studije na Odseku za elektrotehniku i računarstvo Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Diplomirala je u oktobru 2006. godine na smeru za automatsko upravljanje sistemima sa prosečnom ocenom u toku studija 9,06, a diplomski rad pod nazivom „Predikcija potrošnje električne energije u proizvodnji nafte promenom Support Vector Machines“ odbranla je sa ocenom 10. Iste godine upisao je doktorske studije na smeru Automatika i upravljanje sistemima. Položila je sve ispite sa prosečnom ocenom 10,00.

Od januara 2001. godine zaposlena je prvo kao saradnik u nastavi, a zatim kao asistent-master na Katedri za automatiku i upravljanje sistemima Fakulteta tehničkih nauka, gde učestvuje u nastavi na predmetima Metode optimizacije, Modeliranje simulacija i upravljanje, Nelinearni upravljački sistemi, Nelinearno programiranje i evolutivni algoritmi. Pored toga, objavila je više radova u naučnim časopisima i na domaćim i međunarodnim stručnim skupovima, a učesnik je u izradi više naučnih i stručnih projekata.