

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2013/122



## ZAKLJUČNO POROČILO RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

## A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROJEKTU

## 1. Osnovni podatki o raziskovalnem projektu

<b>Šifra projekta</b>	J2-2099
<b>Naslov projekta</b>	Identifikacija in analiza modelov za načrtovanje vodenja dinamičnih sistemov na podlagi Gaussovih procesov
<b>Vodja projekta</b>	10598 Juš Kocijan
<b>Tip projekta</b>	J Temeljni projekt
<b>Obseg raziskovalnih ur</b>	4650
<b>Cenovni razred</b>	B
<b>Trajanje projekta</b>	05.2009 - 04.2012
<b>Nosilna raziskovalna organizacija</b>	106 Institut "Jožef Stefan"
<b>Raziskovalne organizacije - soizvajalke</b>	
<b>Raziskovalno področje po šifrantu ARRS</b>	2 TEHNIKA 2.06 Sistemi in kibernetika 2.06.02 Znanja o sistemih in vodenju sistemov
<b>Družbeno-ekonomski cilj</b>	13.02 Tehnološke vede - RiR financiran iz drugih virov (ne iz SUF)

2. Raziskovalno področje po šifrantu FOS<sup>1</sup>

<b>Šifra</b>	2.02
<b>- Veda</b>	2 Tehniške in tehnološke vede
<b>- Področje</b>	2.02 Elektrotehnika, elektronika in informacijski inženiring

## B. REZULTATI IN DOSEŽKI RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

3. Povzetek raziskovalnega projekta<sup>2</sup>

SLO

Namen projekta so bile raziskave metod za eksperimentalno modeliranje z modeli na podlagi Gaussovih procesov, primerne za inženirsko uporabo pri načrtovanju avtomatskega vodenja. Ukvarjali smo se z večimi različnimi metodami, ki jih lahko načelno opredelimo z dvema

pristopoma k modeliranju na podlagi modelov z Gaussovimi procesi in sicer identifikacijo po principu črne škatle in identifikacijo po principu sive škatle. Običajni modeli na podlagi Gaussovih procesov so modeli črne škatle in sicer verjetnostni neparametrični modeli in kot taki uporabni samo za načrtovanje prediktivnega vodenja. Modeli po principu sive skrinjice pa so se izkazali uporabni tudi za postopke načrtovanja vodenja na podlagi parametričnih modelov. Nadalje smo reševali problem računske zahtevnosti učenja modelov na podlagi Gaussovih procesov s spremembo strojne opreme in z novimi računskimi algoritmi. Raziskovalni rezultati so bili ovrednoteni na preizkusnih primerih dejanskih kompleksnih sistemov kot so biološke čistilne naprave, mestni prometni sistem in kemijske procesne naprave. Poleg metod samih smo za njih razvili tudi knjižnico podprogramov programskega paketa Matlab za modeliranje dinamičnih sistemov na podlagi Gaussovih procesov.

ANG

The purpose of the project was research of experimental modelling methods, namely Gaussian process models, suited for engineering use in automatic control design. Various different methods that can be principally divided into two modelling approaches for nonlinear dynamic systems based on Gaussian process models were foreseen: black-box and grey-box modelling approaches. Gaussian process models are probabilistic, nonparametric models and as black-box models only applicable for model predictive control methods. Grey-box Gaussian process models on the other hand make use of control design methods based on parametric models possible. Further a problem of computational burden of learning Gaussian process models was dealt with changes in computational hardware and with novel computational algorithms. Research results were assessed with case studies on real-life complex systems like wastewater treatment plants, urban transportation system and process engineering plants. A software library of general purposed functions based on programme package Matlab was also developed for modelling of dynamic systems with Gaussian process models.

#### 4. Poročilo o realizaciji predloženega programa dela na raziskovalnem projektu<sup>3</sup>

##### Opis raziskovanja

Na projektu smo raziskovali področje modeliranja dinamičnih sistemov, ki je nepogrešljivi del načrtovanja avtomatskega vodenja in sicer z modeli na podlagi Gaussovih procesov, takoimenovanih GP modelov.

V prvi fazi projekta smo raziskovali identifikacijo modela črne škatle in vrednotili metodo modeliranja z GP modeli. Predvsem smo se osredotočili na naslednje točke:

- izbira kovariančne matrike, ki določa povezave med podatki v GP modelu;
- izbira možnih razredov modelov na podlagi izbire regresorjev uporabljenih za identifikacijo;
- razvoj rekurzivne/sprotne metode identifikacije za GP modele.

V drugi fazi projekta smo raziskovali identifikacijo modela sive škatle z GP modeli. Predvsem smo se osredotočili na vključevanje strukture kot predznanja, kar pelje k tako imenovanim Wienerjevimi in Hammersteinovim modelom nelinearnih dinamičnih sistemov. Poleg naštetih oblik modelov smo raziskovali tudi vključevanje lokalnih lineariziranih modelov v GP modele celotnega nelinearnega modela.

Tretja faza projekta je bila posvečena problemu računske zahtevnosti postopkov učenja pri identifikaciji GP modelov. V tej fazi raziskali uporabo različnih vrst strojne opreme, ki je namenjena vzporednem računanju. Pri tem smo se omejili predvsem na ekonomsko dostopnejšo strojno opremo za katero ni potrebno posebno strokovno znanje, ki presega sposobnosti raziskovalcev, ki ne raziskujejo področje vzporednega računanja. Večji del raziskav smo posvetili paralelizaciji algoritmov za izračun regresije na podlagi Gaussovih procesov in pa markovske verižne metode Monte Carlo za simulacijo dinamičnih sistemov na podlagi Gaussovih procesov. Preučili in izpeljali smo izvedbo paralelnih algoritmov na večprocesorski grafični kartici in poslali rezultate v objavo.

V četrti fazi smo naredili pregled obstoječih orodij za analizo, ki bi jih lahko uporabili za analizo neparametričnih verjetnostnih modelov na podlagi Gaussovih procesov in naredili nastavke za nadaljnje raziskave, ki pa niso predvidene v okviru tega projekta.

Razvite algoritme modeliranja z GP modeli in raziskane hipoteze smo vrednotili z računalniškimi simulacijami in uporabo na dejanskih, torej merjenih, podatkih in sistemih, čemur je bila namenjena peta faza projekta.

Vse faze so močno prepletene, kar pomeni, da so bili tudi rezultati posameznih faz prepleteni oziroma je prispevek k eni fazi obenem lahko tudi delni rezultat neke druge faze.

### **Ugotovljeni rezultati**

V prvi fazi smo preučevali kovariančne funkcije, ki jih delimo na stacionarne in nestacionarne. Postavili in ovrednotili smo nekaj smernic za izbiro primerne kovariančne funkcije. Ugotovili smo, da je izbira kovariančne funkcije ključnega pomena za delovanje GP modela. Z njo izrazimo znanje o obnašanju oz. splošnih lastnostih neznanega sistema, naj je to apriorno ali pa pridobljeno empirično. Največkrat, zlasti kadar ne poznamo ozadja povezave med podatki, za funkcijski del kovariančne funkcije lahko uporabimo kar Gaussovo kovariančno funkcijo, saj sta za naravne sisteme, gladkost izhoda in stacionarnost pogostokrat predpostavljeni lastnosti. Razred možnih modelov dinamičnih sistemov je odvisen od izbire regresorjev, ki jih uporabimo za učenje/identifikacijo modela dinamičnega sistema. To velja tudi za GP modele, kar smo sistematično prikazali in razvili ustrezno programsko podporo poleg za že znano metodo s posplošenim pogreškom, še za modele z izhodnim pogreškom in filtre z neskončnim odzivom. Potrdili smo, da se lastnosti teh GP modelov ujemajo z dognanji, ki so znana za tovrstne strukture modelov na drugačnih podlagah. Poleg struktur smo ovrednotili tudi različne optimizacijske pristope za učenje, tako deterministične kot tudi stohastične in pri tem razvili učinkovito metodo za določanje začetnih vrednosti optimizacije hiperparametrov, ki temelji na metodi naključnega iskanja. Zaradi velike računske zahtevnosti učenja GP modelov, ki raste s tretjo potenco glede na število učnih primerov, je ta model v osnovi neprimeren za sprotno učenje. Zato smo pregledali obstoječe metode za pohitritev postopka učenja in izbrali primerno za sprotno učenje. Ugotovili smo, da le ena metoda, izmed preučenih, ustreza vsem kriterijem sprotnega učenja, torej tudi kriteriju, ki zahteva zmožnost sprotnega/rekurzivnega posodabljanja. Pri tej metodi s pravilno določitvijo začetnih parametrov lahko zagotovimo približno konstanten čas posodabljanja modela z vsakim novim vhodnim primerom.

V drugi fazi smo razvili postopek za identifikacijo nelinearnih Wienerjevih modelov na podlagi Gaussovih procesov in postopek za identifikacijo Hammersteinovih modelov na podlagi Gaussovih procesov. Oba postopka temeljita na aproksimaciji verjetnostnih distribucij izhodov z Gaussovimi procesi in sicer tako, da dobljeni model obdrži prva dva momenta distribucije pri prenosu podatkov skozi nelinearni sistem. Postopka za identifikacijo sta dvofazna in sta sestavljena iz identifikacije statične nelinearnosti in dinamičnega linearnega dela. Pri tem gre za metodo modeliranja omejenega, vendar v praksi dovolj velikega, razreda nelinearnih dinamičnih sistemov. V tej fazi smo izdelali programsko opremo za identifikacijo in vrednotenje nelinearnih Wienerjevih modelov na podlagi Gaussovih procesov in za identifikacijo in vrednotenje nelinearnih Hammersteinovih modelov na podlagi Gaussovih procesov. Poleg omenjenih postopkov pa smo rezultate dobili tudi pri vključevanju linearnih dinamičnih sistemov v modele na podlagi Gaussovih procesov. Rezultat tega dela raziskav druge faze je postopek za pridobivanje modela z linearno strukturo in spremenljivimi parametri in sicer tako v zvezni obliki zapisa dinamičnih modelov kot tudi diskretizirani obliki. Drugi rezultat pa je bila izvedba vključevanja celotnih linearnih dinamičnih podmodelov v globalni nelinearni GP model, kar se razlikuje od modela z linearno strukturo in spremenljivimi parametri iz prejšnjega rezultata. Dobljeni rezultati so bili neposredno vezani na nekatere ugotovitve iz prve faze.

Rezultat tretje faze je bil izboljševanje hitrosti učnega algoritma za učenje GP modelov na

grafični kartici Nvidia, ki s primerno programsko podporo omogoča paralelno računanje na svojih 240 oziroma 336 grafičnih procesorjih. Drugi rezultat te faze pa je algoritem za izračunavanje markovske veržne metode Monte Carlo na grafični kartici, s katero lahko pospešimo simulacijo dinamičnih sistemov, ki so modelirani z GP modeli. Vse razvite algoritme smo izvedli na grafičnih karticah Nvidia GeForce GTX275 in GeForce GTX460 in uspeli pospešiti računanje od nekajkrat do nekaj desetkrat odvisno od tega ali je šlo za modeliranje ali za Monte Carlo simulacijo. Opravili smo tudi primerjave med eno in večprocesnim računanjem ter računanjem na procesorjih grafičnih kartic v primeru, če uporabljamo predpripravljeno programsko opremo proizvajalca Matlaba oziroma programsko opremo, ki smo jo razvili sami.

Pri četrti fazi smo naredili okvirni pregled potencialnih orodij za analizo modelov na podlagi Gaussovih procesov in sicer s poudarkom na analizi stabilnosti, dosegljivosti in asimptotičnih lastnostih modelov. Določeno količino časa smo posvetili tudi numeričnim postopkom analize s simulacijo stohastičnega zaprtozannega sistema. Poleg tega, da smo rezultate poslali v objavo, smo za vsako končano fazo naredili tudi interno poročilo, ki prikazuje dobljene rezultate.

Peta in obenem zadnja faza projekta je bila namenjena uporabi razvitih metod in potrjevanju hipotez in je opisana v naslednjem razdelku o uporabi rezultatov.

### **Uporaba rezultatov**

Algoritme in dognanja smo uporabili v naslednjih praktičnih primerih:

- Modeliranje polindustrijske pripravljalne enote za plin z ločevanjem od tekočine, konkretno spremembe tlaka plina v enoti, kjer smo preizkušali izbiro kovariančnih funkcij, metodo identifikacije modela črne škatle, metodo identifikacije modela sive škatle, konkretno modela z linearno strukturo in od delovnega področja odvisnimi spremenljivimi parametri in metodo sprotne identifikacije GP modela.
- Pripravljalno enoto za plin z ločevanjem od tekočine, smo modelirali tudi kot multivariabilni sistem, to je sistem z več vhodi in izhodi, v našem primeru sta bila izhoda tlak plina in nivo tekočine, medtem ko sta bila vhoda signala odprtosti odtočnih in pritočnih ventilov. Narejeni model smo uporabili za načrtovanje eksplicitnega prediktivnega vodenja.
- Modeliranje procesa spreminjanja dolžin vrst v mestnem prometu, kjer smo poleg modeliranja z GP modeli preizkusili tudi izvedbo numeričnega postopka za postopek analize s stohastično simulacijo.
- Izdelava mehkega senzorja na podlagi GP modela za detekcijo in rekonstrukcijo meritev prometa v izbranem mestnem križišču mesta Praga na Češkem.
- Modeliranje onesnaženja zraka z ozonom na področju mesta Burgas v Bolgariji in sicer na dva načina: kot običajen GP model črne škatle in kot samorazvijajoči GP model na podlagi sprotne prihajajočih podatkov, kar je omogočilo boljše rezultate pri sezonskih spremembah v ozračju. Model onesnaženja smo uporabili za napovedovanje koncentracij ozona, kar je osnova sistema za pravočasno alarmiranje prebivalstva pri prekoračitvah dovoljenih koncentracij ozona.
- GP model smo uporabili za glajenje rezultatov infrardeče spektroskopije pri raziskavah aktivnosti človeških možganov v sodelovanju s skupino na National University of Ireland v Maynoothu.
- Uporaba GP modelov za modeliranje in klasifikacijo pri vodenju faz pilotne šaržne biološke čistilne naprave za komunalne odpadne vode.
- Uporab GP modelov za poenostavljanje modela bioreaktorja, t.j. biološke čistilne naprave, za proizvodnjo bioplina za numerično analizo delovanja bioreaktorja in njegovih negotovosti.
- Modeliranje hidravlične naprave z večimi shranjevalniki z GP modelom z vključenimi lokalnimi linearnimi modeli.
- Modeliranje finančnega sistema, konkretno borzne vrednosti valut in blaga, z GP modelom z linearnimi kovarančnimi funkcijami.
- Modeliranje obrabljenosti zobnikov obdelovalnega stroja za napovedovanje življenjske dobe zobnikov, ki je potrebna za izdelavo sistema zgodnjega alarmiranja in odpravljanja okvar na

obdelovalnih strojih.

#### Sodelovanje s tujimi partnerji

V okviru projekta smo imeli razvejano sodelovanje s tujimi partnerji. Aktivnosti so potekale v okviru dveh bilateralnih projektov z Bolgarijo, kjer so bili partnerji z Institute of System Engineering and Robotics, Bulgarian Academy of Sciences (modeliranje in uporaba na kemijskih procesih in modeliranje onesnaženja v mestu Burgas) in z republiko Češko, s skupino z Institute of Information Theory and Automation, Czech Academy of Sciences (modeliranje v prometu mesta Praga). Pravtako je sodelovanje potekalo s partnerji iz republike Irske in sicer s skupino na Department of Electronics Engineering na National University of Ireland v Maynoothu (infrardeča spektroskopija). Poleg tega pa je bil nosilec projekta slovenski predstavnik v evropskem projektu COST akcija 0702, ki je projekt s področja, ki se okvirno ujema s področjem tega projekta in v okviru katerega smo delovali na področju sprotnega učenja GP modelov.

### 5. Ocena stopnje realizacije programa dela na raziskovalnem projektu in zastavljenih raziskovalnih ciljev<sup>4</sup>

Zastavljeni cilji predlagane raziskave so bili:

- Pregled dosedanjih metod modeliranja črne škatle na podlagi Gaussovih procesov in njihova nadgradnja z metodo spremenljivk stanj, rekurzivno identifikacijo in metodo faktorja pozabljanja.
- Metoda za identifikacijo modela sive skrinjice na osnovi Gaussovih procesov z Wienerjevo in Hammersteinovo strukturo in izpopolnitev modeliranja z linearno strukturo in spremenljivimi parametri.
- Zmanjšanje računske zahtevnosti postopka učenja s strojno opremo za vzporedno računanje ali z dopolnitvijo algoritmov.
- Orodja za analizo neparometričnih verjetnostnih modelov na osnovi Gaussovih procesov za potrebe vodenja sistemov.
- Prikaz in ovrednotenje razvitih algoritmov za modeliranje za uporabo pri načrtovanju vodenja z računalniško simulacijo in uporabo na dejanskih procesih.

Ocenjujemo, da smo prav vse zastavljene cilje izpolnili. Vse našete metode, postopki in orodja so bili razviti. Razvite metode smo v največji možni meri izvedli v obliki algoritmov in programske opreme v sintaksi programskega paketa Matlab.

Vse faze projekta smo končali pravočasno in v obsegu, ki smo ga planirali. Rezultate vseh petih faz smo zbrali v petih delovnih poročilih Instituta Jožef Stefan. Večino rezultatov projekta smo že objavili v recenziranih revijah in na mednarodnih konferencah, drugi pa so v objavo poslani oziroma so v pripravi za objavo v recenziranih revijah.

### 6. Utemeljitev morebitnih sprememb programa raziskovalnega projekta oziroma sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine<sup>5</sup>

Ni bilo nobenih bistvenih odstopanj in sprememb od predvidenega programa raziskovalnega projekta.

### 7. Najpomembnejši znanstveni rezultati projektne skupine<sup>6</sup>

Znanstveni dosežek			
1.	COBISS ID	26152231	Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i>	Metodologija ocenjevanja strategij obratovanja bioloških procesov za čiščenje odpadnih voda z upoštevanjem negotovosti in različnih možnih izidov
		<i>ANG</i>	Multi-criteria analyses of wastewater treatment bio-processes under an

		uncertainty and a multiplicity of steady states
Opis	SLO	Predlagali smo novo večkriterijsko metodologijo ocenjevanja strategij obratovanja bioloških procesov čiščenja odpadnih voda, ki temelji na analizi matematičnega modela procesa ob upoštevanju negotovosti in različnih možnih izidov. Metodologija uporablja Monte-Carlo simulacijo in teorijo verjetnosti, s katerima analiziramo izbor rizičnih strategij obratovanja z več možnimi izidi. Metodologijo smo preizkusili na modelu anaerobnega reaktorja, ki je prilagojen za doziranje različnih vrst substrata. Pokazali smo kako se z aproksimacijo z modeli na podlagi Gaussovih procesov zmanjša računsko zahtevnost večkriterijske analize in kako je mogoče določiti področja zanesljivosti strategij obratovanja ob upoštevanju negotovosti in različnih možnih izidov. Področje zanesljivosti je na modelu anaerobnega reaktorja prikazano kot področje verjetnosti ustavitve proizvodnje bioplina pri različnih strategijah doziranja substrata.
	ANG	A multi-criteria evaluation methodology was proposed for determining the operating strategies for bio-chemical, wastewater treatment plants based on a model analysis under an uncertainty that can present multiple steady states. The method is based on Monte Carlo (MC) simulations and the expected utility theory in order to deal with the analysis of choices among risky operating strategies with multi-dimensional outcomes. The motivation is given by a case study using an anaerobic digestion model (ADM) adapted for multiple co-substrates. It is shown how the multi-criteria analyses' computational complexity can be reduced within an approximation based on Gaussian-process regression and how a reliability map can be built for a bio-process model under uncertainty and multiplicity. In our uncertainty-analyses case study, the reliability map shows the probability of a biogas-production collapse for a given set of substrates mixture input loads.
Objavljeno v		Pergamon Press.; Water research; 2012; Vol. 46, no. 18; str. 6121-6131; Impact Factor: 4.865;Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.311; A'': 1;A': 1; WoS: IH, JA, ZR; Avtorji / Authors: Južnič-Zonta Živko, Kocijan Juš, Flotats Xavier, Vrečko Darko
Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek
2.	COBISS ID	24397351 Vir: COBISS.SI
Naslov	SLO	Eksplicitno zaprtozračno nelinearno prediktivno vodenje na podlagi modelov črne škatle
	ANG	Explicit output-feedback nonlinear predictive control based on black-box models
Opis	SLO	V članku smo predstavili izpeljavo metode za reševanje problema načrtovanja eksplicitnega nelinearnega prediktivnega vodenja z omejitvami z uporabo metode približnega več-parametričnega nelinearnega programiranja na podlagi identificiranih modelov nelinearnih sistemov kot so na primer umetne nevronske mreže in modeli na podlagi Gaussovih procesov. Za rešitev problema vodenja brez napake v ustaljenem stanju v primeru omejenih motenj in/ali odstopanj v modelu je uporabljena strategija dveh načinov delovanja.
	ANG	This paper describes an approximate multi-parametric nonlinear programming approach to explicitly solve output-feedback NMPC problems for constrained nonlinear systems described by black-box models like for example artificial neural networks or Gaussian process models. A dual-mode control strategy is employed in order to achieve an offset-free closed-loop response in the presence of bounded disturbances and/or model errors.
Objavljeno v		Pineridge Press; Engineering applications of artificial intelligence; 2011; Vol. 24, no. 2; str. 388-397; Impact Factor: 1.665;Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 0.881; A': 1; WoS: AC, EP, IF, IQ;

		Avtorji / Authors: Grancarova Alexandra, Kocijan Juš, Johansen Tor Arne	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
3.	COBISS ID	24397095	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Identifikacija dinamičnih sistemov z modeli na podlagi Gaussovih procesov z vključenimi lokalnimi modeli
		ANG	Dynamical systems identification using Gaussian process models with incorporated local models
	Opis	SLO	V članku smo na primeru dejanskega hidravličnega procesa prikazali metodo identifikacije dinamičnega sistema z vključevanjem predznanja v obliki lokalnih linearnih dinamičnih modelov. Članek vsebuje rezultate prve do sedaj znane uporabe metode identifikacije modela na podlagi Gaussovih procesov z vključenimi linearnimi lokalnimi modeli za identifikacijo sistema višjega reda in prvo tovrstno identifikacijo na podlagi meritev na dejanskem procesu.
		ANG	The paper describes the validation of the method for identification of Gaussian process model with incorporated prior knowledge in the form of local linear dynamic models. These are the first ever published results of Gaussian process model with incorporated local models method used to identify a higher order system and also the first results where the method was used to identify a system using measurement data.
	Objavljeno v	Pineridge Press; Engineering applications of artificial intelligence; 2011; Vol. 24, no. 2; str. 398-408; Impact Factor: 1.665; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 0.881; A': 1; WoS: AC, EP, IF, IQ; Avtorji / Authors: Ažman Kristijan, Kocijan Juš	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
4.	COBISS ID	24443431	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Sprotni model na podlagi Gaussovih procesov za napovedovanje onesnaženosti zraka z ozonom
		ANG	On-line Gaussian process model for the prediction of the ozone concentration in the air
	Opis	SLO	Metodo sprotnega modeliranja na podlagi Gaussovih procesov smo uporabili za razvoj modela za napovedovanja onesnaženosti zraka z ozonom. Izbrana metoda modeliranja je primerna zaradi kompleksne dinamike in ne dovolj poznanega ozadja nastajanja ozona, saj se model lahko sproti prilagaja glede na sproti prihajajoče podatke.
		ANG	On-line Gaussian process modelling method has been implemented for the study of the ozone pollution in the air. The selected method is suitable in particular because it adapts model according to streaming measurement data to the complex dynamics and not entirely known mechanism in the background of ozone generation.
	Objavljeno v	B'lgarska akademija na naukite; Dokladi na B'lgarskata akademija na naukite; 2011; Vol. 64, no. 1; str. 117-124; Impact Factor: 0.210; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.271; WoS: RO; Avtorji / Authors: Petelin Dejan, Kocijan Juš, Grancarova Alexandra	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
5.	COBISS ID	23224615	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Model na podlagi Gaussovih procesov z linearno strukturo in spremenljivimi parametri
		ANG	Fixed-structure Gaussian process model
	Opis	SLO	V članku predlagamo in opisujemo algoritem za razvoj diskretnega modela dinamičnega sistema z vnaprej postavljeno linearno strukturo in spremenljivimi parametri, ki jih opisujejo modeli na podlagi Gaussovih

		procesov. Struktura predstavlja osnovo za načrtovanje avtomatskega vodenja nelinearnih procesov z razvrščanjem ojačenj.
	ANG	Algorithm for the modelling of discrete dynamic system's model with fixed structure and varying parameters that are modelled with Gaussian process models is proposed and described in the paper. This model structure represents the basis for gain-scheduling control design.
Objavljeno v		Taylor & Francis; International Journal of Systems Science; 2009; Vol. 40, no. 12; str. 1253-1262; Impact Factor: 0.918; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.262; WoS: AC, EX, PE; Avtorji / Authors: Ažman Kristjan, Kocijan Juš
Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek

### 8. Najpomembnejši družbeno-ekonomski rezultati projektne skupine<sup>7</sup>

	Družbeno-ekonomski dosežek	
1.	COBISS ID	23079719 Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO Modeliranje sistemov na podlagi merilnih podatkov ANG Systems identification from measured data
	Opis	SLO Vodja projekta je bil v jesenskem semestru 2009/2010 povabljen, da prevzame vlogo nosilca predmeta Modeliranje sistemov na podlagi merilnih podatkov na magistrskem programu na Fakulteti za promet Češke tehniške univerze v Pragi. Vsebina predavanj je bila identifikacija sistemov, med drugim tudi z metodo na podlagi Gaussovih procesov. ANG The principal investigator manager was appointed the lecturer in the course Systems modelling from the measured data in the autumn semester 2009/2010 for the MS programme at the Faculty of transportation sciences, Czech Technical University in Prague. The course dealt with system identification methods, including modelling with Gaussian process models.
	Šifra	B.05 Gostujoči profesor na inštitutu/univerzi
	Objavljeno v	Czech Technical University; 2009; Avtorji / Authors: Kocijan Juš
	Tipologija	3.14 Predavanje na tuji univerzi
2.	COBISS ID	Vir: vpis v poročilo
	Naslov	SLO Članstvo v uredniškem odboru mednarodne revije Evolving systems, založba Springer ANG Associate editor of the international journal Evolving systems, Springer
	Opis	SLO Vodja projekta je 2012 postal pridružen urednik in član uredniškega odbora, revije Evolving systems, Elsevier, od začetka leta 2013 naprej. Revija, za katero se pričakuje faktor vpliva po SCI od leta 2012 naprej je pomembna na področju ved o umetnih samorazvijajočih sistemih. ANG The principal investigator become an associate editor and a member of editorial board of the scientific journal Evolving systems, Springer, in year 2012, and valid since start of 2013. The scientific journal is expected to gain SCI impact factor since year 2012 and is an important journal in the field of artificial evolving systems.
	Šifra	C.04 Uredništvo mednarodne revije
	Objavljeno v	Evolving systems. Kocijan, Juš (član uredniškega odbora 2013-). Heidelberg; Berlin: Springer, 2010-. ISSN 1868-6478. [COBISS.SI-ID 8735572]
	Tipologija	4.00 Sekundarno avtorstvo

3.	COBISS ID	25087783	Vir: COBISS.SI
Naslov	SLO	Pregled stanja na področju algoritmov vodenja z modeli na podlagi Gaussovih procesov	
	ANG	Control algorithms based of Gaussian process models	
Opis	SLO	V prispevku prikazujemo pregled stanja na področju algoritmov vodenja z modeli na podlagi Gaussovih procesov. Poleg poglobljenega pregleda objav s tega področja so analizirani tudi trendi, izzivi in priložnosti v prihodnosti za razvoj metod načrtovanja vodenja na podlagi Gaussovih procesov. Prispevek je bil pripravljen za vabljeni predavanje na mednarodni konferenci s področja avtomatskega vodenja, komunikacij in računalništva.	
	ANG	A detailed state-of-the-art survey of control algorithms based on Gaussian process models is given in the paper. Beside the survey of control algorithms also trends, challenges and future opportunities are discussed in the paper. The contribution was prepared for the invited lecture at the international conference from the topic of control, communications and computing.	
Šifra	B.04 Vabljeni predavanja		
Objavljeno v	Society for Electronics, Telecommunications, Automation, and Informatics of the Republic of Macedonia; Proceedings of COSY 2011 papers; 2011; Str. 69-80; Avtorji / Authors: Kocijan Juš		
Tipologija	1.06 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci (vabljeni predavanja)		
4.	COBISS ID	24721447	Vir: COBISS.SI
Naslov	SLO	Napovedovanje stanja zobnikov z modelom na podlagi Gaussovih procesov	
	ANG	Prognosis of gear health using Gaussian process model	
Opis	SLO	V prispevku smo prikazali uporabo modelov na podlagi Gaussovih procesov za napovedovanje stanja obrabljenosti zobnikov v prestavnem razmerju. Tovrstna uporaba je namenjena diagnostiki obdelovalnih strojev z namenom pravočasno napovedati izpad delovanja in omogočiti pravočasno nadomestitev obrabljenih delov.	
	ANG	Application of Gaussian process models are demonstrated for the prognosis of gear health in a gear-box. This application is meant for the diagnostics of rotational tool machinery for prediction of gear failure and for enabling replacement of the failed part in time.	
Šifra	B.03 Referat na mednarodni znanstveni konferenci		
Objavljeno v	s. n.]; EUROCON 2011; 2011; 4 str.; Avtorji / Authors: Kocijan Juš, Tanko Vesna		
Tipologija	1.08 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci		
5.	COBISS ID	23915303	Vir: COBISS.SI
Naslov	SLO	Pospešeno učenje modelov na podlagi Gaussovih procesov	
	ANG	Accelerated learning of Gaussian process models	
Opis	SLO	V prispevku opisujemo izvedbo algoritma za paralelno računanje za učenje modelov na podlagi Gaussovih procesov na večprocesorski grafični kartici osebnega računalnika. Z izrabo večprocesorske strukture na podlagi ustreznega prilagojenega algoritma za učenje modela smo dosegli nekajkratno povečano hitrost učenja in s tem povečali njegovo učinkovitost in uporabnost.	
	ANG	An application of algorithm for the parallel processing of Gaussian process models' training on a multicore graphic unit for personal computer is shown in the paper. This training is accelerated a few times in comparison with	

		conventional processor computing due to multicore use and algorithm adaptation which improves efficiency and applicability of the training algorithm.
Šifra	B.03	Referat na mednarodni znanstveni konferenci
Objavljeno v	Czech Technical University in Prague; EUROSIM 2010; 2010; 7 str.; Avtorji / Authors: Musizza Bojan, Petelin Dejan, Kocijan Juš	
Tipologija	1.08	Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci

## 9. Drugi pomembni rezultati projektne skupine<sup>8</sup>

Poleg objavljenih rezultatov imamo številne članke še v postopku objave v recenziranih revijah kot so: Transportation research Part C, Transportmetrica, Biosource Technology in Simulation modelling practice and theory.

Od začetka projekta so bila izvedena štiri vabljen predavanja na tujih raziskovalnih institucijah na temo modeliranja z modeli na podlagi Gaussovih procesov. Nadalje smo prejeli vabila na tri vabljen predavanja na mednarodnih znanstvenih konferencah od tega na dve plenarni predavanji. Dve sta že bili izvedeni, eno pa bo izvedeno še v mesecu marcu 2013.

Nosilec projekta je bil v času projekta angažiran kot član v štirinajstih različnih mednarodnih programskih komitejih znanstvenih konferenc.

Referat "Dynamic GP models: an overview and recent developments" avtorja Juša Kocijana je bil na konferenci "6th International Conference on Applied Mathematics, Simulation, Modelling", (ASM'12), Vouliagmeni, Atene, Grčija, ki je potekal 7.-9. marec 2012, nagrajen kot najboljši referat konference.

## 10. Pomen raziskovalnih rezultatov projektne skupine<sup>9</sup>

### 10.1. Pomen za razvoj znanosti<sup>10</sup>

SLO

Na področju modeliranja in načrtovanja avtomatskega vodenja obstaja pomanjkanje metod, ki upoštevajo negotovost uporabljenih podatkov. Glavni doprinos končanega projekta je izpopolnitev praktičnega okvira za modeliranje nelinearnih dinamičnih sistemov iz negotovih podatkov z namenom uporabe teh modelov za načrtovanje vodenja. Verjetnostni in statistični pristopi k modeliranju so postali bolj privlačni zaradi hitrega razvoja računalnikov. Vendar pa se v splošnem na področju statistike, kjer se ukvarjajo s tovrstnimi pristopi, ukvarjajo predvsem s statičnimi sistemi. Projekt je temeljil na metodologiji modeliranja z Gaussovimi procesi uporabljeni za modeliranje dinamičnih sistemov. Uporabljeni pristop temelji na popolnoma verjetnostnem opisu sistemov z Gaussovimi procesi na osnovi Bayesovega sklepanja, kjer je uporabljena predhodno dostopna informacija. Prilagoditev te metodologije za modeliranje dinamičnih sistemov iz inženirskega vidika in uporaba teh modelov za načrtovanje vodenja je odprla nove priložnosti za uporabo eksperimentalnega modeliranja ter možnost načrtovanja varnega in robustnega sistema vodenja. Glede na dejstvo, da je rezultat pristopa neparametrični model je pristop še posebej privlačen za inženirje.

Poleg razvoja novih metod in nadaljevanja raziskav obstoječih metod za eksperimentalno modeliranje (identifikacijo) dinamičnih nelinearnih sistemov z modeli na osnovi Gaussovih procesov smo raziskovali tudi dva druga problema, ki sta neposredno povezana s problematiko.

Prvi je skrajšanje postopka učenja pri identifikaciji zaradi računske zahtevnosti, ki smo se ga lotili tako s strojno opremo kot tudi z razvojem novih algoritmov. Predvidevamo, da uspešni rezultati projekta lahko prinesejo večji napredek pri uporabi razvitih metod modeliranja tudi v inženirski praksi. Drugi problem pa je analiza lastnosti neparametričnih modelov za njihovo uporabo pri načrtovanju vodenja. Rezultati v tem primeru bodo povečali možnosti uporabe

obravnavane vrste modelov, ki so zaradi večjega obsega informacije že tako zelo zanimivi.

Celotna metodologija modeliranja z Gaussovimi procesi za namen načrtovanja vodenja je torej namenjena za dinamične sisteme, kar pa pomeni uporabnost tudi za statične sisteme in izhodišče za druge vrste uporabe poleg načrtovanja vodenja. V projektu smo izdelali tudi knjižnico podprogramov in poleg tega prikazali uporabnost metodologije na vrsti praktičnih primerov.

Glavni rezultati projekta so bili naslednji:

- smernice za izbiro kovariančnih funkcij, ki predstavljajo eden od glavnih elementov modelov na podlagi Gaussovih procesov;
- sistematiziranje modelov glede na strukturo, ki je odvisna od izbranih regresorjev in vrednotenje lastnosti;
- metoda sprotne/rekurzivne identifikacije modelov na podlagi Gaussovih procesov;
- metoda za identifikacijo modela z nespremenljivo strukturo in spremenljivimi parametri, kjer so spremembe parametrov modelirane z modeli na podlagi Gaussovih procesov;
- metoda za identifikacijo Wienerjevih in Hammersteinovih modelov na podlagi Gaussovih procesov;
- algoritem za pospeševanje učenja modelov na podlagi Gaussovih procesov z uporabo paralelnega računanja na grafični kartici,
- uporabe razvitih metod na raznih dinamičnih procesih s področja okolja, prometa in kemijske tehnologije.

Ocenjujemo, da smo s pridobljenimi rezultati naredili korak naprej v razvoju metodologije za identifikacijo nelinearnih dinamičnih sistemov.

ANG

Until recently, a reliable data driven method that accounts for uncertainty in a natural manner has been lacking. The main innovation of this project is remedying this lack by the further development of a practical framework for modelling nonlinear dynamic systems from uncertain information with purpose to be used in control design. Due to the rapid increase in computing power over the last decade, probabilistic approaches to modelling have attracted increasing interest. However, the statistics literature, where much of these developments are discussed, is largely concerned with static systems. We proposed to use the Gaussian process modelling methodology for dynamic systems. The proposed approach employs an entirely probabilistic description of the system using Gaussian processes in a Bayesian context whereby a prior is conditioned on the available information. The adaptation of this methodology to the modelling of dynamic systems in an engineering context and application of these models for control design open up new possibilities for data driven modelling and safe and robust control design. Being nonparametric, the modelling is attractive to engineers.

Research considered also dealing with two other related problems beside development of new methods and upgrade of already existing research on methods for experimental modelling, i.e., identification, of dynamic nonlinear systems with Gaussian process models. The first one is decrease of computational burden for model learning at identification which was dealt with multicore-processor hardware and novel algorithms. Successful results are potential advancement in adopting developed modelling methods in engineering practice. The second problem is the analysis of nonparametric models for their use in control systems design. Results in this case will also increase applicability of Gaussian process models that are already very attractive due to the content of information they possess.

The Gaussian process modelling methodology and control design were tailored to dynamic systems. However, the results can be used for static systems and can be readily extended for other applications beside control design. A library of software functions embodying the developed techniques was developed and its utility was demonstrated by numerous applications.

The main contributions are as follows:

- Directions for selection of covariance functions, that are the basic elements for modelling with Gaussian process models.
- Systematic presentation of model structures based on used regressors and validation of

models' properties.

- The research of online/recursive identification of Gaussian process models,
- The method for identification of model with fixed structure and varying parameters, where varying parameters are modelled with Gaussian process models.
- The method for the identification of Wiener and Hammerstein Gaussian process models.
- An algorithm for the accelerated learning of Gaussian process models with parallel computation on graphic process unit.
- An algorithm for online/recursive identification of Gaussian process models,
- Applications of developed methods on various environmental, urban traffic and process engineering dynamic systems.

We estimate the contributions as a step forward in the research of nonlinear systems identification.

## 10.2. Pomen za razvoj Slovenije<sup>11</sup>

SLO

V okviru projekta smo za prikaz razvitih metod uporabili več praktičnih primerov s katerimi smo prikazali praktično uporabnost Gaussovih procesov za modeliranje in načrtovanje vodenja. To so bili kemijska tehnološka procesna naprava, biološke čistilne naprave, čakalne vrste v mestnem prometu, rotacijski obdelovalni stroj in drugi.

Kemijska procesna naprava je bila enota za predpripravo plina z ločevanjem od tekočine, ki je bila že v preteklosti uporabljena za prikaz uporabnosti metod v industrijski praksi.

Druga skupina naprav, to so bile biološke čistilne naprave, pa so predstavnik biotehnoloških naprav, ki so znane po svoji kompleksnosti. Posebej so uporabne za prikaz uporabnosti verjetnostnega pristopa k modeliranju in vodenju kompleksnih sistemov, saj predlagani pristop temelji na popolnoma verjetnostnem opisu.

Uporabnost metod za modeliranje dinamičnih sistemov z GP modeli smo prikazali tudi z modeliranjem čakalnih vrst v mestnem prometu, modeliranjem onesnaženja zraka z ozonom in z modeliranjem obrabe zobnikov v obdelovalnem stroju.

Relevantnost predlaganega okvira za modeliranje in načrtovanje vodenja je bila prikazana s praktičnimi primeri, ki imajo veliko podobnosti z različnimi kompleksnimi sistemi, ki so pogosti tudi na drugih področjih industrijske proizvodnje. Skupna značilnost vseh je, da je kvaliteta njihovega vodenja odvisna od kvalitete uporabljenega modela. Zatorej ima celosten okvir za modeliranje na osnovi Gaussovih procesov skupaj z ustreznimi metodami načrtovanja vodenja v inženirski skupnosti lahko izjemno velik pomen.

Doprinos rezultata za razvoj Slovenije lahko povzamemo kot naslednje:

- Projekt predlaga nov pristop k modeliranju in načrtovanju vodenja kompleksnih dinamičnih sistemov iz negotovih podatkov, ki ima vse možnosti, da neposredno vpliva na razvoj nekaterih področij pomembnih za Slovenijo.
- Eno od pomembnih področij, kjer lahko, kot je bilo prikazano, uporabimo predlagani pristop k modeliranju je področje načrtovanja bioloških čistilnih naprav in okoljskih znanosti, kar je bilo prikazano z modeliranjem in napovedovanjem onesnaženja zraka z ozonom.
- Druga pomembna področja na katera lahko vplivajo rezultati sta področji avtomatskega vodenja industrijskih proizvodnih postopkov, kar je bilo prikazano s sistemom za zaznavanje obrabe zobnikov obdelovalnega stroja in kemijske procesne industrije, kar je bilo prikazano z modeliranjem enote za pripravo plina z ločevanjem tekočine. V splošnem sta to področji, kjer lahko z uporabo pridobljenih spoznanj pride do izboljšanja kvalitete postopkov in izdelkov.

Način predstavitve rezultatov projekta in s tem vpliv na širše strokovno občinstvo je bil tudi pedagoški proces. Raziskovalci iz skupine so na različne načine vključeni tudi v visokošolski pedagoški proces in so lahko na ta način učili in promovirali metode za učinkovito modeliranje, simulacijo in avtomatsko vodenje kompleksnih dinamičnih sistemov na osnovi modelov dobljenih iz negotovih podatkov in na ta način prispevali k novim kvalitetnim vsebinam v slovenskem izobraževanju.

ANG

Several applications were used to demonstrate the utility of the Gaussian process modelling methodology and control design, specifically, its application to chemical process plant, wastewater treatment plant, urban transportation system, rotational machinery, etc.

One of the applications in this project was modelling of the gas-liquid separation plant that has been used before to demonstrate utility of various control algorithms for industrial practice.

A further application is modelling and control of different sorts of wastewater treatment plants that are complex systems that represents biotechnological plants. A probabilistic framework capable of representing complex systems is indicated. The proposed framework employs models that provide a complete probabilistic description.

Modelling of queue lengths in urban traffic, modelling of ozone pollution and a system for prognosis of gear health in rotational machinery were further used to demonstrate the utility of Gaussian process models for modelling dynamic systems.

The relevance of the proposed modelling framework and control design to selected process and bio-technological application is indicative of its relevance to complex engineering systems, which can be frequently met also in other fields of industrial production. Their control design and efficiency depends on the use of models. Hence, a general modelling framework and corresponding control design methods has a potential for great strategic value to the engineering community.

Relevance of the proposed project to the development in Slovenia can be summarised as follows.

- The project is proposing a new approach for modelling and control design of complex dynamic systems from uncertain data and therefore has all the potential to facilitate development in some fields important for Slovenia.
- Fields where proposed modelling and simulation framework can be applied is, as demonstrated, wastewater treatment plant technology and environmental science, i.e., air pollution modelling and forecasting.
- The other field that may be affected is automation in the field of manufacturing, i.e., rotational machinery, and process engineering, i.e. gas-liquid separators. Consequences are improved quality of industrial production.

A channel for the dissemination of the results of the project to a wider audience beyond the research and engineering community was the educational process. Researchers in the project are involved in University education as instructors and they taught and promoted methods for efficient modelling, simulation and control of complex dynamic systems from uncertain data and consequently gave a new quality to the content of Slovene education.

### 11. Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!

**Označite, katerega od navedenih ciljev ste si zastavili pri projektu, katere konkretne rezultate ste dosegli in v kakšni meri so doseženi rezultati uporabljeni**

Cilj	
<b>F.01</b>	<b>Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin</b>
Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
Rezultat	<input type="text"/>
Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.02</b>	<b>Pridobitev novih znanstvenih spoznanj</b>
Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
Rezultat	<input type="text"/>
Uporaba rezultatov	<input type="text"/>

		<input type="text"/>
<b>F.03</b>	<b>Večja usposobljenost raziskovalno-razvojnega osebja</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.04</b>	<b>Dvig tehnološke ravni</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.05</b>	<b>Sposobnost za začetek novega tehnološkega razvoja</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.06</b>	<b>Razvoj novega izdelka</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.07</b>	<b>Izboljšanje obstoječega izdelka</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.08</b>	<b>Razvoj in izdelava prototipa</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.09</b>	<b>Razvoj novega tehnološkega procesa oz. tehnologije</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.10</b>	<b>Izboljšanje obstoječega tehnološkega procesa oz. tehnologije</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.11</b>	<b>Razvoj nove storitve</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE

	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.12</b>	<b>Izboljšanje obstoječe storitve</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.13</b>	<b>Razvoj novih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.14</b>	<b>Izboljšanje obstoječih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.15</b>	<b>Razvoj novega informacijskega sistema/podatkovnih baz</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.16</b>	<b>Izboljšanje obstoječega informacijskega sistema/podatkovnih baz</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.17</b>	<b>Prenos obstoječih tehnologij, znanj, metod in postopkov v prakso</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.18</b>	<b>Posredovanje novih znanj neposrednim uporabnikom (seminarji, forumi, konference)</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.19</b>	<b>Znanje, ki vodi k ustanovitvi novega podjetja ("spin off")</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>

<b>F.20</b>	<b>Ustanovitev novega podjetja ("spin off")</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.21</b>	<b>Razvoj novih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.22</b>	<b>Izboljšanje obstoječih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.23</b>	<b>Razvoj novih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.24</b>	<b>Izboljšanje obstoječih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.25</b>	<b>Razvoj novih organizacijskih in upravljavskih rešitev</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.26</b>	<b>Izboljšanje obstoječih organizacijskih in upravljavskih rešitev</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.27</b>	<b>Prispevek k ohranjanju/varovanje naravne in kulturne dediščine</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.28</b>	<b>Priprava/organizacija razstave</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>

	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.29</b>	<b>Prispevek k razvoju nacionalne kulturne identitete</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.30</b>	<b>Strokovna ocena stanja</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.31</b>	<b>Razvoj standardov</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.32</b>	<b>Mednarodni patent</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.33</b>	<b>Patent v Sloveniji</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.34</b>	<b>Svetovalna dejavnost</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
<b>F.35</b>	<b>Drugo</b>	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>

**Komentar**


**12.Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!**  
**Označite potencialne vplive oziroma učinke vaših rezultatov na navedena področja**

	<b>Vpliv</b>	<b>Ni vpliva</b>	<b>Majhen vpliv</b>	<b>Srednji vpliv</b>	<b>Velik vpliv</b>	

<b>G.01</b>	<b>Razvoj visokošolskega izobraževanja</b>					
G.01.01.	Razvoj dodiplomskega izobraževanja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.01.02.	Razvoj podiplomskega izobraževanja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.01.03.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.02</b>	<b>Gospodarski razvoj</b>					
G.02.01	Razširitev ponudbe novih izdelkov/storitev na trgu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.02.	Širitev obstoječih trgov	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.03.	Znižanje stroškov proizvodnje	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.04.	Zmanjšanje porabe materialov in energije	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.05.	Razširitev področja dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.06.	Večja konkurenčna sposobnost	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.07.	Večji delež izvoza	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.08.	Povečanje dobička	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.09.	Nova delovna mesta	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.10.	Dvig izobrazbene strukture zaposlenih	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.11.	Nov investicijski zagon	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.12.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.03</b>	<b>Tehnološki razvoj</b>					
G.03.01.	Tehnološka razširitev/posodobitev dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.02.	Tehnološko prestrukturiranje dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.03.	Uvajanje novih tehnologij	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.04.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.04</b>	<b>Družbeni razvoj</b>					
G.04.01	Dvig kvalitete življenja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.02.	Izboljšanje vodenja in upravljanja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.03.	Izboljšanje delovanja administracije in javne uprave	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.04.	Razvoj socialnih dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.05.	Razvoj civilne družbe	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.06.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.05.</b>	<b>Ohranjanje in razvoj nacionalne naravne in kulturne dediščine in identitete</b>					
<b>G.06.</b>	<b>Varovanje okolja in trajnostni razvoj</b>					
<b>G.07</b>	<b>Razvoj družbene infrastrukture</b>					
G.07.01.	Informacijsko-komunikacijska infrastruktura	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.02.	Prometna infrastruktura	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.03.	Energetska infrastruktura					

			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.04.	Drugo:		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.08.</b>	<b>Varovanje zdravja in razvoj zdravstvenega varstva</b>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<b>G.09.</b>	<b>Drugo:</b>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

**Komentar**

--

**13.Pomen raziskovanja za sofinancerje<sup>12</sup>**

	Sofinancer		
1.	Naziv		
	Naslov		
	Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:		EUR
	Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:		%
	Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja	Šifra	
		1.	
		2.	
		3.	
		4.	
		5.	
	Komentar		
	Ocena		

**14.Izjemni dosežek v letu 2012<sup>13</sup>****14.1. Izjemni znanstveni dosežek**

Razvili smo metodologijo ocenjevanja strategij obratovanja bioloških procesov čiščenja odpadnih voda, ki temelji na analizi matematičnega modela procesa ob upoštevanju negotovosti in različnih možnih izidov. Metodologijo, ki uporablja teorijo verjetnosti smo preizkusili na modelu anaerobnega reaktorja, prilagojenega za doziranje različnih vrst substrata. Pokazali smo kako z aproksimacijo z modeli na podlagi Gaussovih procesov povečati učinkovitost večkriterijske analize in kako določiti področja zanesljivosti strategij obratovanja ob upoštevanju negotovosti in različnih možnih izidov. Področje zanesljivosti anaerobnega reaktorja je prikazano z verjetnostjo ustavitve proizvodnje bioplina pri različnih strategijah doziranja substrata. Raziskavo smo izvedli v sinergiji z aplikativnim projektom L2-2157 in ga imamo za skupni dosežek obeh projektov. Dosežek smo objavili v reviji Water Research, ki ima največji faktor vpliva med revijami na znanstvenem področju obravnave vodnih virov.

**14.2. Izjemni družbeno-ekonomski dosežek**

Referat "Dynamic GP models: an overview and recent developments" avtorja Juša Kocijana je bil na konferenci "6th International Conference on Applied Mathematics, Simulation, Modelling", (ASM'12), Vouliagmeni, Atene, Grčija, ki je potekal 7.-9. marec 2012, izbran za nagrado za najboljši referat konference.

## C. IZJAVE

Podpisani izjavljam/o, da:

- so vsi podatki, ki jih navajamo v poročilu, resnični in točni
- se strinjamo z obdelavo podatkov v skladu z zakonodajo o varstvu osebnih podatkov za potrebe ocenjevanja ter obdelavo teh podatkov za evidence ARRS
- so vsi podatki v obrazcu v elektronski obliki identični podatkom v obrazcu v pisni obliki
- so z vsebino zaključnega poročila seznanjeni in se strinjajo vsi soizvajalci projekta

### Podpisi:

*zastopnik oz. pooblaščen oseba  
raziskovalne organizacije:*

in

*vodja raziskovalnega projekta:*

Institut "Jožef Stefan"

Juš Kocijan

### ŽIG

Kraj in datum: 

Ljubljana	11.3.2013
-----------	-----------

**Oznaka prijave: ARRS-RPROJ-ZP-2013/122**

<sup>1</sup> Opredelite raziskovalno področje po klasifikaciji FOS 2007 (Fields of Science). Prevajalna tabela med raziskovalnimi področji po klasifikaciji ARRS ter po klasifikaciji FOS 2007 (Fields of Science) s kategorijami WOS (Web of Science) kot podpodročji je dostopna na spletni strani agencije (<http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/sifranti/preslik-vpp-fos-wos.asp>). [Nazaj](#)

<sup>2</sup> Napišite povzetek raziskovalnega projekta (največ 3.000 znakov v slovenskem in angleškem jeziku) [Nazaj](#)

<sup>3</sup> Napišite kratko vsebinsko poročilo, kjer boste predstavili raziskovalno hipotezo in opis raziskovanja. Navedite ključne ugotovitve, znanstvena spoznanja, rezultate in učinke raziskovalnega projekta in njihovo uporabo ter sodelovanje s tujimi partnerji. Največ 12.000 znakov vključno s presledki (približno dve strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>4</sup> Realizacija raziskovalne hipoteze. Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikost pisave 11) [Nazaj](#)

<sup>5</sup> V primeru bistvenih odstopanj in sprememb od predvidenega programa raziskovalnega projekta, kot je bil zapisan v predlogu raziskovalnega projekta oziroma v primeru sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine v zadnjem letu izvajanja projekta, napišite obrazložitev. V primeru, da sprememb ni bilo, to navedite. Največ 6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

<sup>6</sup> Navedite znanstvene dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Raziskovalni dosežek iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A" ali A'. [Nazaj](#)

<sup>7</sup> Navedite družbeno-ekonomske dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Družbeno-ekonomski rezultat iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A" ali A'.

Družbeno-ekonomski dosežek je po svoji strukturi drugačen kot znanstveni dosežek. Povzetek znanstvenega dosežka je praviloma povzetek bibliografske enote (članka, knjige), v kateri je dosežek objavljen.

Povzetek družbeno-ekonomskega dosežka praviloma ni povzetek bibliografske enote, ki ta dosežek dokumentira, ker je dosežek sklop več rezultatov raziskovanja, ki je lahko dokumentiran v različnih bibliografskih enotah. COBISS ID zato ni enoznačen, izjemoma pa ga lahko tudi ni (npr. prehod mlajših sodelavcev v gospodarstvo na pomembnih raziskovalnih nalogah, ali ustanovitev podjetja kot rezultat projekta ... - v obeh primerih ni COBISS ID). [Nazaj](#)

<sup>8</sup> Navedite rezultate raziskovalnega projekta iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) v primeru, da katerega od rezultatov ni mogoče navesti v točkah 7 in 8 (npr. ker se ga v sistemu COBISS ne vodi). Največ 2.000 znakov, vključno s presledki. [Nazaj](#)

<sup>9</sup> Pomen raziskovalnih rezultatov za razvoj znanosti in za razvoj Slovenije bo objavljen na spletni strani:

<http://sicris.izum.si/> za posamezen projekt, ki je predmet poročanja [Nazaj](#)

<sup>10</sup> Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

<sup>11</sup> Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

<sup>12</sup> Rubrike izpolnite / prepisite skladno z obrazcem "izjava sofinancerja" <http://www.arrs.gov.si/sl/progproj/rproj/gradivo/>, ki ga mora izpolniti sofinancer. Podpisan obrazec "Izjava sofinancerja" pridobi in hrani nosilna raziskovalna organizacija – izvajalka projekta. [Nazaj](#)

<sup>13</sup> Navedite en izjemni znanstveni dosežek in/ali en izjemni družbeno-ekonomski dosežek raziskovalnega projekta v letu 2012 (največ 1000 znakov, vključno s presledki). Za dosežek pripravite diapozitiv, ki vsebuje sliko ali drugo slikovno gradivo v zvezi z izjemnim dosežkom (velikost pisave najmanj 16, približno pol strani) in opis izjemnega dosežka (velikost pisave 12, približno pol strani). Diapozitiv/-a priložite kot priponko/-i k temu poročilu. Vzorec diapozitiva je objavljen na spletni strani ARRS <http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/>, predstavitev dosežkov za pretekla leta pa so objavljena na spletni strani <http://www.arrs.gov.si/sl/analize/dosez/>. [Nazaj](#)

Obrazec: ARRS-RPROJ-ZP/2013 v1.00

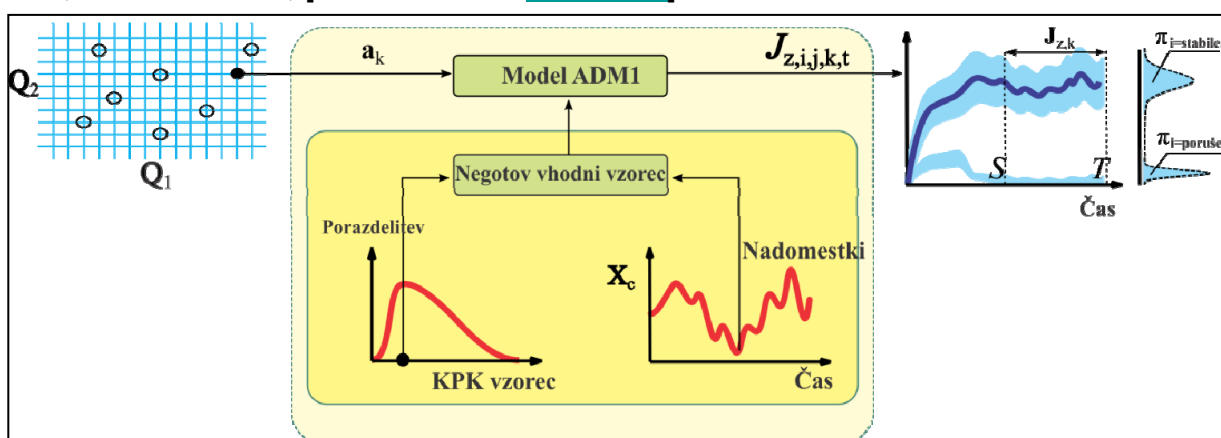
36-DE-B1-4F-94-49-B4-35-4D-FA-49-29-33-9D-6B-8A-69-77-76-43

# TEHNIKA

## Področje: 2.06 – Sistemi in kibernetika

**Dosežek 1:** Nova metodologija ocenjevanja strategij obratovanja bioloških procesov za čiščenje odpadnih voda z upoštevanjem negotovosti in različnih možnih izidov

Vir: JUŽNIČ-ZONTA, Živko, KOCIJAN, Juš, FLOTATS, Xavier, VREČKO, Darko. Multi-criteria analyses of wastewater treatment bio-processes under an uncertainty and a multiplicity of steady states. *Water res. (Oxford)*. [Print ed.], 2012, vol. 46, no. 18, str. 6121-6131, [COBISS.SI-ID [26152231](#)]



Ocenjevanje negotovosti izidov različnih strategij doziranja substrata anaerobnega reaktorja je omogočeno s poenostavitvijo analize z uporabo modelov na podlagi Gaussovih procesov

Razvili smo metodologijo ocenjevanja strategij obratovanja bioloških procesov čiščenja odpadnih voda, ki temelji na analizi matematičnega modela procesa ob upoštevanju negotovosti in različnih možnih izidov. Metodologijo, ki uporablja teorijo verjetnosti smo preizkusili na modelu anaerobnega reaktorja, prilagojenega za doziranje različnih vrst substrata. Pokazali smo kako z aproksimacijo z modeli na podlagi Gaussovih procesov povečati učinkovitost večkriterijske analize in kako določiti področja zanesljivosti strategij obratovanja ob upoštevanju negotovosti in različnih možnih izidov. Področje zanesljivosti anaerobnega reaktorja je prikazano z verjetnostjo ustavitve proizvodnje bioplina pri različnih strategijah doziranja substrata. Raziskavo smo izvedli v sinergiji z aplikativnim projektom L2-2157 „Modeliranje in vodenje čistilnih naprav za izboljšanje kvalitete izтока in energetsko učinkovito obratovanje“ in ga štejemo za skupni dosežek obeh projektov. Dosežek smo objavili v reviji Water Research, ki ima največji faktor vpliva med revijami na znanstvenem področju obravnave vodnih virov.