



ISSN 1311-0829

ГОДИШНИК НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ

том 66, книга 2, 2016

МЕЖДУНАРОДНА КОНФЕРЕНЦИЯ АВТОМАТИКА'2016, ФА
ФАКУЛТЕТ АВТОМАТИКА
03 - 05 юни 2016 г., Созопол, България



PROCEEDINGS OF TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

Volume 66, Issue 2, 2016

INTERNATIONAL CONFERENCE AUTOMATICS'2016, FA
FACULTY OF AUTOMATICS
June 03 - 05, 2016, Sozopol, Bulgaria

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

главен редактор

проф. дтн Емил НИКОЛОВ

зам. главен редактор

проф. дтн Елена ШОЙКОВА

членове

проф. дтн Георги ПОПОВ

проф. дтн Иван КОРОБКО

проф. дфн Иван УЗУНОВ

проф. дтн Иван ЯЧЕВ

проф. дтн Кети ПЕЕВА

проф. дтн Ганчо БОЖИЛОВ

проф. д-р Бончо БОНЕВ

проф. д-р Евелина ПЕНЧЕВА

проф. д-р Иво МАЛАКОВ

проф. д-р Младен ВЕЛЕВ

проф. д-р Огнян НАКОВ

секретар-организатор

инж. Мария ДУХЛЕВА

EDITORIAL BOARD

Editor -in -Chief

Prof. D.Sc. Emil NIKOLOV

Editor -in -Vice -Chief

Prof. D.Sc. Elena SHOYKOVA

Editors

Prof. D.Sc. Georgi POPOV

Prof. D.Sc. Ivan KOROBKO

Prof. D.Sc. Ivan UZUNOV

Prof. D.Sc. Ivan YACHEV

Prof. D.Sc. Keti PEEVA

Prof. D.Sc. Gantcho BOJILOV

Prof. Ph.D. Boncho BONEV

Prof. Ph.D. Evelina PENCHEVA

Prof. Ph.D. Ivo MALAKOV

Prof. Ph.D. Mladen VELEV

Prof. Ph.D. Ognyan NAKOV

Organizing Secretary

Eng. Maria DUHLEVA

Технически университет-София
София 1000, бул. "Кл. Охридски" 8
България <http://tu-sofia.bg>

Technical University of Sofia
Sofia, 1000, boul. Kliment Ohridski 8
Bulgaria <http://tu-sofia.bg>



© Технически Университет-София
© Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ

ФАКУЛТЕТ АВТОМАТИКА

форум

„ДНИ НА НАУКАТА НА ТУ-СОФИЯ“ Созопол'2016

МЕЖДУНАРОДНА КОНФЕРЕНЦИЯ

АВТОМАТИКА'2016, ФА

Созопол 03.06. - 05.06.2016

ПРОГРАМЕН КОМИТЕТ

почетен председател

Емил Николов (BG)

председател

Нина Николова (BG)

членове

Петко	Петков	(BG)	Хасан	Абуайса	(FR)
Тодор	Йонков	(BG)	Даниел	Жоли	(FR)
Снежана	Йорданова	(BG)	Жил	Гонкалвес	(FR)
Валери	Младенов	(BG)	Иван	Калайков	(SE)
Емил	Гарипов	(BG)	Николай	Христов	(FR)
Пламен	Цветков	(BG)	Стефан	Козак	(SK)
Живко	Георгиев	(BG)	Алена	Козакова	(SK)
Михо	Михов	(BG)	Снежана	Терзиева	(BG)
Васил	Гълъбов	(BG)	Теофана	Пулева	(BG)

ОРГАНИЗАЦИОНЕН КОМИТЕТ

председател

Владислав Славов

зам. председател

Антония Панделова

членове

Георги Ценов

Александър Ишев

Евтим Йончев

Станислав Енев

ТЕХНИЧЕСКИ КОМИТЕТ

координатор

Антония Панделова

системен администратор

Александър Маринчев

организационен секретар

Мая Стойчева

TECHNICAL UNIVERSITY - SOFIA

FACULTY OF AUTOMATICS

Forum

„DAYS OF SCIENCE OF TU-SOFIA“ Sozopol'2016

FACULTY OF AUTOMATICS

INTERNATIONAL CONFERENCE

AUTOMATICS'2016, FA

June 03 - 05, 2016, Sozopol, Bulgaria

PROGRAM COMMITTEE

honorable chair of PC

Emil Nikolov (BG)

chair of PC

Nina Nikolova (BG)

members of PC

Petko	Petkov	(BG)	Hassane	Abouaïssa	(FR)
Todor	Ionkov	(BG)	Daniel	Jolly	(FR)
Snejana	Yordanova	(BG)	Gilles	Gonçaves	(FR)
Valeri	Mladenov	(BG)	Ivan	Kalaykov	(SE)
Emil	Garipov	(BG)	Nicolai	Christov	(FR)
Plamen	Tzvetkov	(BG)	Stefan	Kozak	(SK)
Jivko	Georgiev	(BG)	Alena	Kozáková	(SK)
Mikho	Mikhov	(BG)	Snejana	Terzieva	(BG)
Vasil	Galabov	(BG)	Teofana	Puleva	(BG)

ORGANIZING COMMITTEE

chair of OC

Vladislav Slavov

vice chair of OS

Antonia Pandelova

members of OC

Georgi Tsenov

Aleksandar Ishtev

Evtim Jonchev

Stanislav Enev

TECHNICAL COMMITTEE

coordinator

Antonia Pandelova

system administrator

Alexandar Marinchev

organizing secretary

Maya Stoycheva

СЪДЪРЖАНИЕ том 66, книга 2

АВТОМАТИКА

1.	Емил Николов	15
	<i>Приложение на дробното смятане за инверсно робастно управление - част I (синтез)</i>	
2.	Емил Николов	25
	<i>Приложение на дробното смятане за инверсно робастно управление - част II (анализ)</i>	
3.	Огнян Каменов	35
	<i>Пространствени отклонения в неинтегруемите, нелинейни, частни диференциални уравнения</i>	
4.	Огнян Каменов, Магдалина Узунова	45
	<i>Периодични и солитарно-вълнови решения за полуинтегруеми еволюционни уравнения</i>	
5.	Ганчо Божилов	55
	<i>Изчисляване на стационарните характеристики на асинхронни машини при използване на нелинеен модел и итеративен метод</i>	
6.	Дочо Цанков, Евтим Йончев, Тодор Йонков	61
	<i>Рекуперативен импулсен преобразувател за постояннотоков двигател с последователно възбуждане</i>	
7.	Николай Братованов, Владимир Заманов	71
	<i>Моделiranje и симулация чрез SOLIDWORKS API на работи за манипулиране на силициеви пластини</i>	
8.	Иван Аврамов, Никола Ценов, Людмил Спиров	81
	<i>Роботизирани системи за принудително преместване на леки автомобили</i>	
9.	Станислав Василев, Васил Балавесов	91
	<i>Един подход към управление на нехолономни мобилни платформи</i>	
10.	Камен Христов, Евтим Йончев	99
	<i>Отдалечено управление с Matlab на мрежов AC/DC импулсен преобразувател в реално време - I част</i>	
11.	Камен Христов, Евтим Йончев	107
	<i>Отдалечено управление с Matlab на мрежов AC/DC импулсен преобразувател в реално време - II част</i>	
12.	Евтим Йончев, Камен Христов	117
	<i>Анализ и синтез на трифазни синхронни AC/DC импулсни преобразуватели с двустранен обмен на енергия</i>	
13.	Владимир Христов, Георги Рачев	127
	<i>Управление на превключваем реактивен двигател чрез размит регулатор</i>	
14.	Емил Николов, Нина Николова, Борис Грасиани	137
	<i>Приложение на хиперболичните репетитивни филтри в системите за управление с параметрична стабилизация - част I (синтез)</i>	

15.	Емил Николов, Нина Николова, Борис Грасиани.....	147
	<i>Приложение на хиперболичните репетитивни филтри в системите за управление с параметрична стабилизация - част II (анализ на качеството)</i>	
16.	Емил Николов, Нина Николова, Борис Грасиани.....	157
	<i>Робастен анализ на репетитивни параметрически компенсационни системи за управление</i>	
17.	Павел Николов, Александър Ефремов	167
	<i>Трансформации на Фурие и техните приложения в икономиката</i>	
18.	Станислав Енев	175
	<i>Алгоритъм за генериране на скоростни профили на движение за позициониращи приложения базирани на ПЛК</i>	
19.	Весела Карлова-Сергиева	181
	<i>Системи за управление с условна обратна връзка</i>	
20.	Борислав Георгиев, Методи Георгиев, Ивайло Михайлов.....	189
	<i>Анализ на технологичното осигуряване на обучението по индустриална автоматизация</i>	
21.	Александър Маринчев, Десислава Стоицева-Деличева, Борис Киров	197
	<i>Интердисциплинарен подход за изследване влиянието на музика с определени честотни характеристики върху психо-физиологичните особености на човека - част I</i>	
22.	Александър Маринчев	205
	<i>Приложение на съвременни алгоритми за регулиране на ниво посредством LabView</i>	
23.	Христина Галева.....	213
	<i>План за управление на продуктивен старт като ключов фактор за успешно внедряване на системи за управление на бизнеса</i>	
24.	Владимир Янков	223
	<i>Енергоефективно размито адаптивно на основа на супервайзор управление на ниво</i>	
25.	Георги Милушев.....	233
	<i>Изчисляване на отделните земни съпротивления на система от три заземителя при безконтактен клещови метод на измерване на съпротивление</i>	
26.	Красимир Гълъбов, Иван Коджабашев.....	239
	<i>Обобщен алгоритъм за калибриране на енергоанализатори по напрежение, ток и мощност</i>	
27.	Юлия Калъпчийска, Антония Панделова	245
	<i>Приложения на безжичните сензорни мрежи за измерване параметри на околната среда</i>	
28.	Красимир Гълъбов, Антония Панделова, Карамфилия Василева	255
	<i>Разработване на виртуален инструмент за оценка на неопределеността при калибриране на цифров волтметър</i>	
29.	Николай Гуров.....	263
	<i>Моделиране на превключването на мощностен превключвател с вакуумни дъгогасителни камери</i>	

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНО РАЗМИТО АДАПТИВНО НА ОСНОВА НА СУПЕРВАЙЗОР УПРАВЛЕНИЕ НА НИВО

Владимир Янков

Резюме: *Управлението на ниво осигурява технологичен запас, материален и енергиен баланс, филтриране на смущения и свързаност между променливи и оптимални режими на редица енергоемки промишлени инсталации. Обектът е нелинеен, без надежден модел и труден за управление с класически методи. Тук се предлага синтез на нелинеен адаптивен енергоефективен регулатор на база на размити множества и генетични алгоритми без нужда от модел на обекта и анализ на устойчивост на затворената система. Управлението на ниво в реално време с размити регулатори и супервайзор за он-лайн адаптация на мащабните му коефициенти и негова апроксимация с паралелно разпределена компенсация поддържа избрани показатели (вкл. енергийни) в желани норми.*
Ключови думи: *ЛМН, MATLABTM, ниво, паралелно-разпределена компенсация, размити регулатори, реално време, супервайзор, устойчивост.*

ENERGY-EFFICIENT FUZZY SUPERVISOR BASED ADAPTIVE LEVEL CONTROL

Vladimir Yankov

Abstract: *Level control ensures technological reserves, material and energy balance, filtering of disturbances and coupling effect among variables and optimal operation mode for many high energy consuming industrial installations. The plant is nonlinear, without reliable model and difficult to control by classical means. Here a model-free design of a nonlinear adaptive energy-efficient controller on the basis of fuzzy logic and genetic algorithms and analysis of the closed loop systems stability are suggested. The real time level control by the fuzzy logic controller and supervisor for on-line adjustment of its scaling factors and the parallel distributed compensation equivalent keeps selected performance and energy-efficiency indicators to their desired norms.*
Keywords: *fuzzy controller, level, LMI, MATLABTM, parallel-distributed compensation, real time, stability, supervisor.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА

Енергоефективното управление на ниво е актуален проблем, свързан с осигуряване на необходимия технологичен запас, материален и енергиен баланс на редица енергоемки промишлени инсталации от енергетиката, хранително-вкусовата, химическата др. индустрии [1].

Обектът за управление е нелинеен, инерционен, многосвързан, с моделна неопределеност – сложен за моделиране и управление с класически методи. Управлението му при минимум разход на енергия изисква интелигентни подходи. Перспективни са методите за интелигентно адаптивно на основа на супервайзор управление при съчетаване на техниките на размитата логика, размитоневронните структури и генетичните алгоритми (ГА), осигуряващи устойчивост и добри показатели на процесите в затворената система (ЗС) при икономия на енергия и робастност към неопределености [2-6].

Размитата логика позволява да се използва човешкия опит, да се обработват словесни описания, да се синтезира размит регулатор (РР) без необходимост от модел на обекта – особено важно при управление на сложни обекти.

Невронните мрежи осигуряват обучение от експериментални данни и подобряват адаптивните свойства на РР. ГА са в основата на обективизация на настройката на параметрите на РР – мащабните коефициенти (МК), функциите на принадлежност (ФП) и размитите правила. Този безградиентен подход осигурява многокритериална глобална оптимизация с паралелно случайно търсене, удобно при нелинейни целеви функции на много параметри.

Адаптивните интелигентни регулатори по подобие на класическите адаптивни са: размити адаптивни регулатори с еталонен модел, размити самоорганизиращи се регулатори и размити самонастройващи се регулатори [2, 7]. Размитата компонента се въвежда в еталонния модел, обратния модел на механизма за адаптация или модификатора на правилата. Адаптивно се променят: 1) МК на РР [8] за равномерна промяна на коефициента на РР; 2) параметрите на ФП за промяна на коефициента на РР в специфична област от универсалното множество; 3) размитите правила – идентифициране на тези от тях, които причиняват влошаване на показателите на системата.

Супервайзорното размито управление се разглежда като базирано на показатели адаптивно управление, което използва оценки на избрани показатели на системата по надеждни измерими он-лайн променливи, които се подобряват чрез влияние най-често върху МК като най-ефективен подход [3]. Регулаторът се състои от основен регулатор на първо ниво - линеен, размит или невронно-размит за осигуряване на устойчивост и добри показатели на качеството на регулиране в ЗС, и размит супервайзор на второ ниво за нелинейна он-лайн настройка на основния регулатор с цел подобряване на избрани показатели и енергийната ефективност на управлението.

Известни са различни методи за синтез и алгоритми за адаптация на основа на размит основен регулатор и размит супервайзор за различни приложения, предимно използващи адаптация на МК на РР [7,10-12]. В [14] е предложен системен подход за ГА многокритериална оптимизация при синтеза на супервайзор за адаптация на параметрите на ПИД регулатор като претеглена сума от критерии. В [15] е разработен супервайзор с използване на наблюдател на относителната скорост на промяна на грешката (relative rate observer RRO) за он-лайн нас-

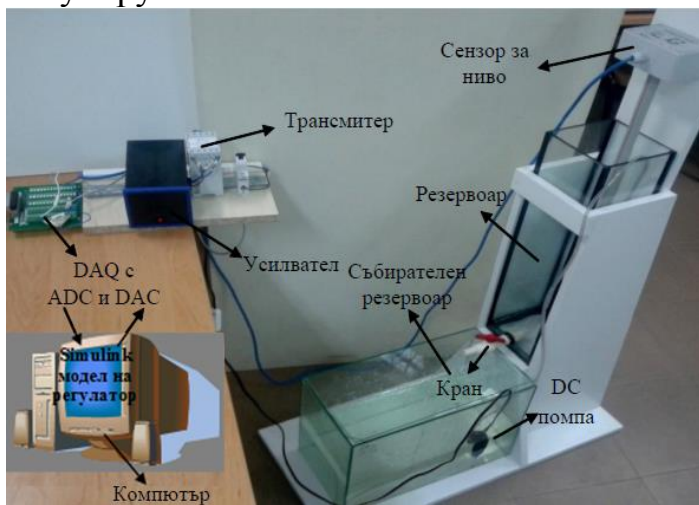
тройка на МК и коефициентите в ПИ допълнителната обработка на ПИД РР, като това е реализирано на програмируем логически контролер. В [16] принципът на RRO е сравнен с други методи за синтез на супервайзори.

Независимо от напредъка в разработване на енергоикономични адаптивни системи за интелигентно управление (АСИУ) все още липсва независима от приложението обща методология за проектиране и анализ на устойчивостта им. Това определя целта и задачите на настоящата статия.

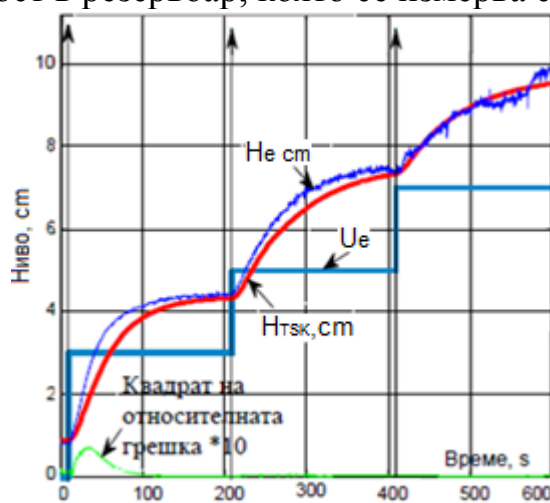
2. TAKAGI-SUGENO-KANG (TSK) МОДЕЛИРАНЕ НА ОБЕКТА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ

Лабораторният модел на обекта за управление е представен на фиг.1.

Регулируемата величина е нивото H на течност в резервоар, която се измерва с



Фиг.1. Лабораторен модел на обекта за управление



Фиг.2. Идентификация на обекта в отворен контур

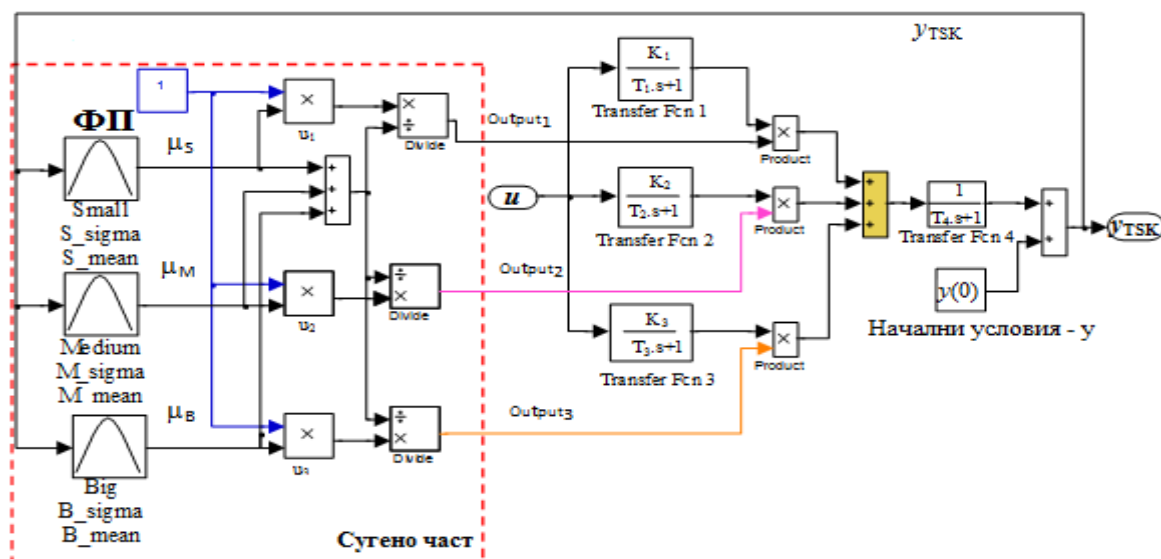
преобразувател на налягане. Законът за управление се реализира софтуерно. Връзката между лабораторния модел и компютър става с интерфейсна платка DAQ NI-6014. Поддържането на желано ниво H_s се осъществява чрез промяна на оборотите на постояннотокова помпа от усилвател на мощност на чийто вход постъпва управляващото въздействие U от регулатора.

От преходните процеси показани на фиг.2 се вижда, че обектът е нелинеен, което изисква за моделирането му да се приложат интелигентни подходи на база на размита логика и ГА. Търсеният размит модел трябва точно в смисъл на приетия критерий да апроксимира променливата динамика на обекта в три негови работни точки при произволен входен сигнал в зададен обхват. Затова е необходимо входните сигнали към обекта да бъдат с достатъчно богата амплитуда и честота, което от своя страна налага провеждане на идентификация в затворен контур. За целта се синтезира линеен ПИ регулатор, параметрите на който се настройват по емпиричен метод [3] за осигуряване на до 20% пререгулиране σ в системата:

$$K_p = 0.3T_{\min} / (K_{\max} \tau_{\max}) = 0.67; T_i = 0.6T_{\min} = 18s, \quad (1)$$

където $K_{\max} = 1.7s$, $T_{\min} = 30s$ и $\tau_{\max} = 8s$ са най-лошите от гледна точка устойчивост на ЗС стойности за параметрите на получените трипараметрични модели по преходните характеристики на фиг.2.

Снемат се преходни процеси от управление на обекта в реално време при три задания. Диапазоните на изменение на управляващия сигнал и нивото са $D_u \in [0-7] \text{ VDC}$ и $D_h \in [0.78-10] \text{ cm}$. На тази основа се синтезира размит TSK модел със структурата от фиг. 3, състояща се от размита (Сугено) и динамична части. Сугено частта е от нулев ред с гаусови ФП за входа. Предполага се три области на линейна работа на обекта - S (ниско ниво), M (средно ниво) и B (високо ниво), като във всяка област динамиката на обекта се описва с две апериодични звена. Методът за извеждане на размито заключение е претеглено средно от степените на активация за всяко правило.



Фиг.3. TSK модел на обекта.

ЗС от TSK модела и ПИ регулатора се симулира в Simulink при същите задания и с помощта на ГА се намират параметрите на TSK модела: начално ниво, коефициенти и времеконстанти на апериодичните звена на динамичната част и параметри на гаусовите ФП в Сугено частта. Минимизира се целевата функция (2) на грешката между изхода на обекта $H_e(t)$ и изхода на TSK модела $H_{TSK}(t)$:

$$F_p = \int_0^t \left\{ \left[\frac{H_{TSK}(t) - H_e(t)}{H_e(t)} \right]^2 dt \right\}_{q_{TSK}} \rightarrow \min. \quad (2)$$

В резултат на оптимизацията е достигната минимална стойност $F_p = 1.11$ при оптимални параметри на TSK модела:

$$q_{TSK} = \left[\begin{array}{l} K_1 = 1.16, K_2 = 1.41, K_3 = 1.25, T_1 = 40.85, T_2 = 77.4, T_3 = 80.13, T_4 = 10.4, y(0) = 0.88, \\ S_{sigma} = 1.58, S_{mean} = 2.78, M_{sigma} = 0.77, M_{mean} = 7.78, B_{sigma} = 0.92, B_{mean} = 8.3. \end{array} \right].$$

На фиг.4 е показано сравнение на преходните процеси в ЗС с линеен ПИ регулатор в реално време и от симулация с оптималния TSK модел. Квадратът на относителната грешка между двата изхода е под 1%.

TSK моделът е валидиран при различни входни въздействия в допустимия интервал, като резултатите са дадени на фиг. 2. Максималната относителна квадратична грешка между H_e и H_{TSK} е под 5%, което доказва адекватността и точността на модела за целите на симулация при определяне на супервайзор.

3. СИНТЕЗ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИСТЕМА С РАЗМИТ АДАПТИВЕН РЕГУЛАТОР НА ОСНОВА НА СУПЕРВАЙЗОР

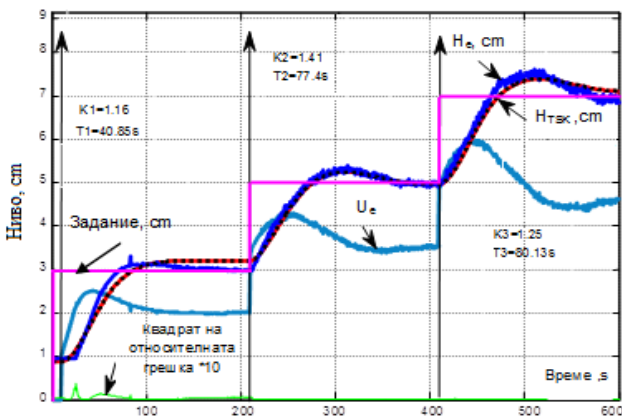
Променливостта на параметрите на обекта в различните работни точки вследствие на неговата нелинейност обосновава необходимостта от използване на размит нелинеен алгоритъм за управление. С помощта на второ размит супервайзорно ниво, явяващо се надстройка на ЗС с основен размит регулатор (ОРР), съществено се подобряват показателите на качество на преходния процес. То спомага конкретни показатели да се поддържат в определена норма, чрез настройка на МК на ОРР и затова съчетанието от ОРР и размит супервайзор (РС) може да се причисли към класа на адаптивните системи с пряка адаптация. Синтезът на АСИУ се състои от синтез на ОРР и синтез на РС.

СИСТЕЗ НА ОСНОВЕН РАЗМИТ РЕГУЛАТОР

Приема се ПИ размит скоростен регулатор (фиг.5), като най-широко използван в практиката, отличаващ с бързодействието си и основа за изграждане на ПИД. За получаване на \dot{y} се използва диференциатор $W_d(s) = K_d T_d s / (T_d s + 1)$. Допълнителната обработка (ДО) за ОРР е интегратор $W_2(s) = K_{du} / s$. Размитата единица (РЕ) е тип Мамдани, синтезирана със стандартни (триъгълни и трапецовидни), нормализирани в обхвата $[-1, 1]$ ФП и 15 твърди размити правила. МК за входовете са K_e и K_{dy} . Синтезът на ОРР най-често се свежда до настройка на параметрите на предварителната (ПрО) и ДО [13] обработки:

$$q = [K_d, T_d, K_e, K_{dy}, K_{du}]$$

Използват се емпирични данни за обхватите на изменение на грешката в системата e , \dot{y} и промяната на управлението Δu . За ПИ ОРР са определени: $K_d = K_{dy} = 1, T_d = 10; K_e = 1/|e_{\max}| = 0.3, K_{du} = 0.2; T_d = (5 - 20)\Delta t, t = 0.1\tau_{\text{средно}} = 0.5$. Управлението в реално време с ПИ ОРР води до подобрене на показателите на преходните процеси във всички работни точки в сравнение с линейния ПИ регулатор - фиг.6.



Фиг.4. Преходни процеси с линейен ПИ регулатор и с TSK модел



Фиг.6. Преходни процеси с ПИ ОРР и линейен ПИ



Фиг.5. Затворена система със скоростен ПИ ОРР.

СИНТЕЗ НА РАЗМИТ СУПЕРВАЙЗОР

Синтезът на РС включва два етапа - структурен синтез и синтез на РЕ и настройка на коефициента K_{FLS} на изхода на РЕ. Структурният синтез се заключава в следните стъпки:

- 1) Определяне на показателите, които следва да се подобрят с помощта на РС – анализират се процесите по ниво и управление в системата с ОРР. Показателите P_i трябва да отговарят на условията: а) да се оценяват по он-лайн измервания на достъпни величини: $y, y_3, e, u, \Delta u, \dot{y}$ и др; б) да са известни областите им на изменение D_{Pi} ; в) да може за всеки показател да се дефинира терма „Норма“ за желаната или най-срещаната област.

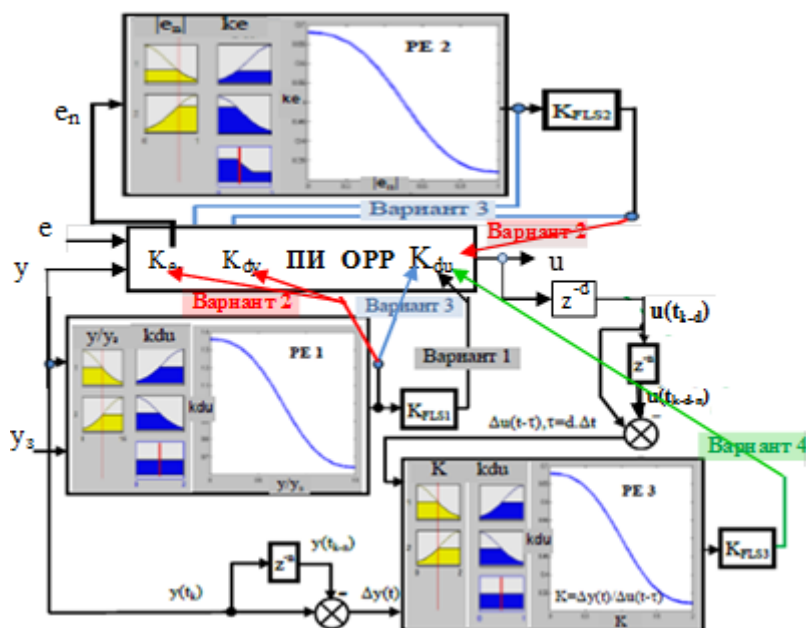
В настоящото изследване чрез различни РС се търси оптималната област на един или два от следните показатели: минимално σ и недорегулиране, оценявани с $P_1 = y / y_3$ с норма около едно (РЕ 1); минимален модул на грешката $P_2 = |e|$ с норма близка до нула (РЕ 2); и максимална робастност - минимално влияние на промените в коефициента на обекта K_k , оценен в текущия момент t_k - $P_3 = K_k, K_k = \Delta y_k / \Delta u_{k-d}$, с d се отчита средното закъснение в обекта $\tau_{\text{средно}} = d\Delta t$ по експертна оценка, $\Delta y_k = y_k - y_{k-n}, \Delta u_{k-d} = u_{k-d} - u_{k-d-n}$ в случая $n=3, d=5$ и за тях при $\Delta t = 0.5$ средният предполагаем текущ коефициент определя нормата на $K_k \approx 1$ (РЕ 3).

- 2) Определяне на най-ефективно влияещите параметри q_{ef} от q върху избраните показатели. Например намаляване на K_{du} понижава σ и възможните области на промяна на тези параметри $D_{q_{ef}}$ от супервайзора, в които ЗС с ОРР запазва устойчивостта си.

За ефективни са определени параметрите $q_{ef} = [K_e, K_{dy}, K_{du}]$.

- 3) Определяне на РЕ на супервайзора – брой, свързаност, вид (с един или два входа, Мамдани или Сугено) и тип въздействие на изхода на РЕ върху q_{ef} - мултипликативно, адитивно, функционално и др.
- 4) Синтез на различни структури на супервайзори и сравняването им чрез симулационни изследвания в ЗС с TSK модел. Анализират се резултатите и се избира този супервайзор, допринасящ за най-голям положителен ефект върху показателите за качество и енергийната ефективност на управлението, имащ най-проста структура.

На фиг.7 са показани четири варианта на супервайзори, изградени при комбиниране на три Мамдани РЕ с един вход и един изход - РЕ 1 е с вход y / y_3 и изход коефициент k_{du} , РЕ 2 има вход $|e|$ и изход коефициент k_e и РЕ 3 е с вход



Фиг.7. Структури на развити супервайзори.

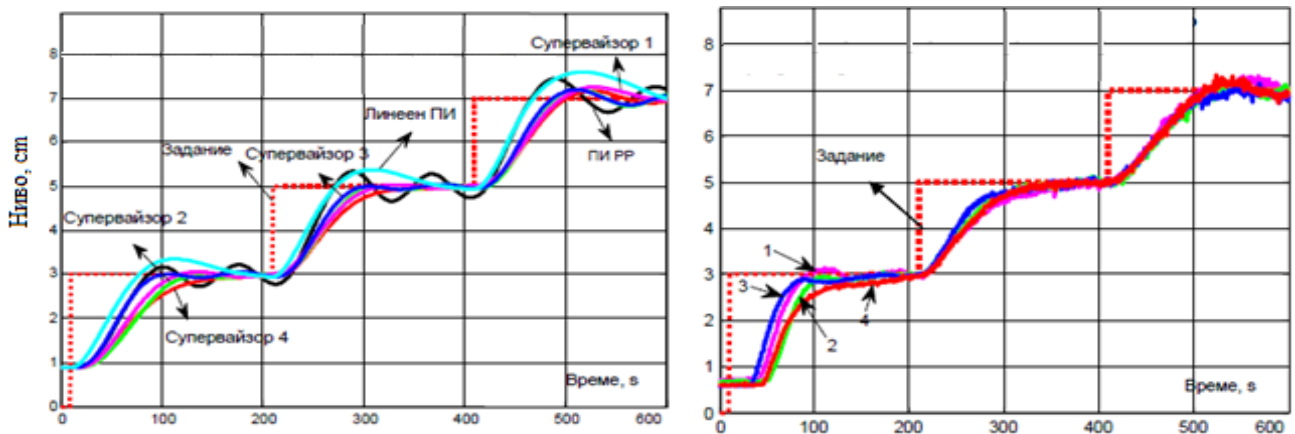
K_k и изход коефициент k_{du} . Изходите на РЕ влияят мултипликативно на q_{ef} . Супервайзор вариант 1 е изграден само от РЕ 1, който въздейства върху u и чрез промяна на K_{du} се опитва да доведе y / y_3 в нормата около едно. Супервайзор вариант 2 е изграден от РЕ 1 и РЕ 2 - РЕ 1 въздейства върху e чрез K_e и върху \dot{y} чрез K_{dy} , докато РЕ 2 адаптира K_{du} . Супервайзор 3 има същите РЕ 1 и РЕ 2, като РЕ 1 променя K_{du} , а РЕ 2 адаптира K_e и K_{dy} . Супервайзор вариант 4 се състои само от РЕ 3 и променя K_{du} .

При синтеза на РЕ на супервайзорите се използват малко на брой стандартни ФП и правила, като метода на деразвиване е центъра на тежеста.

Коефициентите K_{FLS} са определени чрез симулационни изследвания: $K_{FLS1} = 0.5$, $K_{FLS2} = 1.3$, $K_{FLS3} = 0.8$ от съображенията изложени в 4).

На фиг. 8 са представени преходните процеси на ЗС с ОРР, линеен ПИ регулатор и четирите супервайзора в реално време и симулация с TSK модела.

При наличие на РС се намалява времето за регулиране и σ . Енергията за управление оценена по максималната стойност на управлението U_{max} също намалява. Резултатите от управлението в реално време са близки с тези от симулация, като най-добър компромис между качество и икономично управление дава вариант 2 с адаптация на всички параметри в q_{ef} . За целите на изследване се избира развит супервайзор 2 (РС2).



Фиг.8. Преходни процеси от симулация (вляво) и реално време (вдясно) на системите с ОРР и различни размити супервайзори.

4. АПРОКСИМАЦИЯ НА СИСТЕМА С ОСНОВЕН РАЗМИТ РЕГУЛАТОР И РАЗМИТ СУПЕРВАЙЗОР

Анализът на устойчивостта на системата с ОРР-РС2 е подходящо да се проведе на основа на непрекия метод на Ляпунов, тъй като вече има изведен TSK модел на обекта. Необходимо е да се синтезира TSK размит регулатор на принципа на паралелно-разпределена компенсация (ПРК). За целта ОРР-РС2 се преобразува към ПРК от Сугено част (заимства се от TSK модела на обекта - фиг.3) и линейни регулатори (в случая ПИ, но могат да бъдат и ПИД) в трите зони на линеаризация, показано на фиг.9. Всеки регулатор управлява съответния обект в тази област. За да се постигне еквивалентност между поведението на ЗС с РР-ПРК и ОРР-РС2 се решава оптимизационна задача с помощта на ГА за минимизиране на грешката между изходите на двете системи.

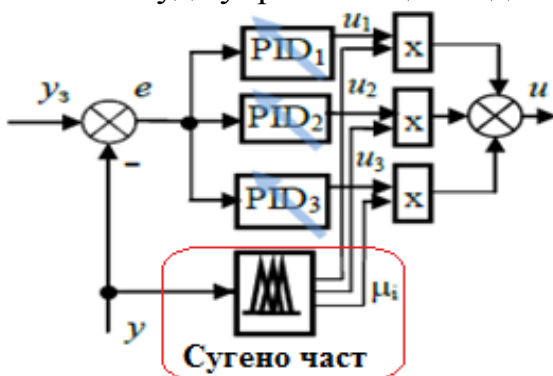
$$F_E = \int_0^t \left\{ \left[H_{ОРР-РС2}(t) - H_{РР-ПРК}(t) \right] / H_{ОРР-РС2}(t) \right\}^2 dt \rightarrow \min. \quad (3)$$

$q_{РР-ПРК}$

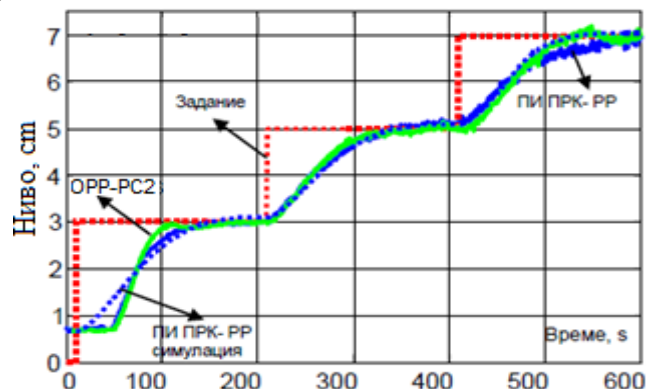
В резултат на минимизацията на (3) се определят търсените параметри на ПИ регулаторите с състава на РР-ПРК:

$$q_{РР-ПРК} = [K_{p1}, K_{I1}, K_{p2}, K_{I2}, K_{p3}, K_{I3}] = [0.33, 0.0157, 0.85, 0.019, 0.4, 0.006], K_{ij} = K_{pj} / T_{ij}.$$

Реакциите по ниво от реално време с оптималния РР-ПРК и ОРР-РС2 от фиг.10 са близки в смисъл на (3). Предимство е, че РР-ПРК работи с по-плавни и малки по амплитуда управляващи въздействия.



Фиг.9. Размит регулатор с ПРК.



Фиг.10. Преходни процеси с ОРР-РС2 и РР-ПРК.

5. АНАЛИЗ НА УСТОЙЧИВОСТТА НА ЗАТВОРЕНАТА СИСТЕМА ОТ TSK Модел И РР-ПРК

TSK моделът на обекта от фиг. 3 се описва с размити правила от вида:

$$R_i : IF \ y(t) \text{ is } Ly_i \ THEN \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases}, \quad (4)$$

където

$$Ly_i = [S, M, B] \text{ и } x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) = y(t) \\ x_2(t) = \dot{x}_1(t) \\ x_3(t) = \dot{x}_2(t) \end{bmatrix}, A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1/T_i T_4 & -(T_i + T_4)/T_i T_4 \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_i/T_i T_4 \end{bmatrix}, C_i = [1 \ 0 \ 0].$$

Линейните локалните динамични модели имат предавателни функции

$$P_i(s) = K_i [T_i T_4 s^2 + (T_i + T_4)s + 1]^{-1}.$$

Интеграторът $1/s$ от локалните ПИ линейни регулатори $C_i(s) = (K_{pi}s + K_{ii})/s$ се привежда към описанието на $P_i(s)$. РР-ПРК се представя със същия брой размити правила с еднакъв предикат и заключения, задаващи останалата част от локалните ПИ регулатори, която представлява ПИ скоростни алгоритми:

$$R_i : IF \ y(t) \text{ is } Ly_i \ THEN \begin{cases} \dot{u}(t) = -F_i x(t) + G_i x_3 \\ или \ \dot{u}(t) = K_{pi} \dot{e}(t) + K_{ii} e(t) \end{cases}, x_3 = \begin{bmatrix} x_{31} = y_3 \\ x_{32} = 0 \\ x_{33} = 0 \end{bmatrix}, F_i = [K_{ii} \ K_{pi} \ 0], G_i = [K_{ii} \ 0 \ 0]. \quad (5)$$

Достатъчните условия на Ляпунов равновесното състояние на ЗС от TSK модел и РР-ПРК да е глобално асимптотически устойчиво се изразяват в съществуването на обща за всички локални линейни ЗС положително определена матрица $P > 0$, удовлетворяваща следните матрични неравенства за $i, j = 1 \div r, j > i$ и тегла на активирание на правилата $h_i \cap h_j \neq \emptyset$ [9, 17]:

$$\begin{cases} G_{ii}^T P + P G_{ii} < 0 \\ 0.5(G_{ij} + G_{ji})^T P + 0.5P(G_{ij} + G_{ji}) \leq 0 \\ G_{ij} = A_i - B_i F_j \end{cases} \quad (6)$$

Неравенствата (6) са линейни и към тях се добавя изискването за положителна определеност на матрицата ($-P \leq -O$), където O вместо нулева е диагонална единична матрица, засилваща условието за устойчивост с цел да се отчете, че отворената система е на границата на устойчивост, поради наличие на интегратор в регулатора и неточността при ГА апроксимацията на ОРР-РС2.

Така получените линейни матрични неравенства (ЛМН) се решават числено в MATLABTM, като резултата е:

$$P = \begin{bmatrix} 0.0353 & -3.1536 * 10^{-5} & -2.0908 * 10^{-6} \\ -3.1536 * 10^{-5} & 0.0353 & -5.5891 * 10^{-5} \\ -2.0908 * 10^{-6} & -5.5891 * 10^{-5} & 0.0346 \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} \det(P) &= 4.3116 * 10^{-5} > 0, P(1,1), P(2,2), P(3,3) > 0 \\ \det(P(1:2,1:2)) &= 125 * 10^{-5} > 0 \\ \det(P(2:3,2:3)) &= 122.12 * 10^{-5} > 0 \\ \det([P(1,1)P(1,3); P(3,1)P(3,3)]) &= 122.1 * 10^{-5} > 0 \\ \text{cond}(P) &= 1.0221 \end{aligned}$$

Всички диагонални минори имат положителни детерминанти, а малкото число на обусловеност $\text{cond}(P)$ показва слаба чувствителност на резултата към неточности в данните. Следователно системата с ОРР-РС2 запазва устойчивост.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезиран е по емпиричен метод без модел на обекта ПИ РР за управление на ниво; Получен и валидиран е TSK модел на обект на основа на данни от управлението му в реално време. Предложен е подход за синтез на адаптивни на основа на супервайзор РР. Изложена е процедура за анализ на устойчивост по Ляпунов на основата на TSK модела и РР-ПРК.

Бъдещата работа ще бъде насочена към прилагане на методиката за управление на свързани нива и нейната реализация в програмируем логически контролер.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторът изказва своите благодарности на НИС на ТУ-София за финансиране на представените изследвания по проект №152ПД0006-08 „Енергоефективно интелигентно адаптивно управление на ниво в свързани резервоари”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Neshkov T., S. Yordanova, I. Topalova. Process Control and Production Automation. TU-Sofia, S., 207, 152.
- [2] Jantzen J. Foundation of Fuzzy Control. John Wiley & Sons Inc., 2007.
- [3] Йорданова С. Методи за синтез на размити регулатори за робастно управление на процеси, КИНГ, С., 2011.
- [4] Ahmad D., A. Ahmad, V. Redhu, U. Gupta. Liquid Level Control by Using Fuzzy Logic Controller. Int.J. Adv. in Eng.&Techn.,vol. 4, No 1, 2012, pp. 537-549.
- [5] Kumar A., Rajbir, Kuldeepak. Performance Comparison of Level Control with the Three, Five & Nine Fuzzy Rules based method. Int. J. Adv. Res. in Comp. Sci & Electronics Eng., vol.2, No 7, 2013, pp. 561-566.
- [6] Turker T. E. Fuzzy Controller Parameter Optimization Using Genetic Algorithm for a Real Time Controlled System. Proceedings of the World Congress on Engineering -WCE 2013, July 3 - 5, 2013, vol. 2, London, UK.6.
- [7] Passino, K., S. Yurkovich. Fuzzy control. Addison-Wesley Longman, 1998.
- [8] Yamashita Y., S. Matsumoto, M. Suzuki. Start-up of a Catalytic Reactor by Fuzzy Controller. J. Chem. Eng. of Japan, vol.21, 1988, pp. 277-281.
- [9] Yordanova S., V. Yankov. Design and Stability Analysis of Supervisor-based Adaptive Fuzzy Logic Control System for Temperature. Int.J.IT,Eng.&Appl.Sci.Res.,vol.4,No4,2015,pp.20-29.
- [10] Zheng J., S. Zhao, S.Wei. Application of Self-tuning Fuzzy PID Controller for a SRM Direct Drive Volume Control Hydraulic Press. J. Contr.Eng. Practice, No 17, 2009, pp.1398-1404.
- [11] Chung H-Y, B-C Chen, J-J Lin. A PI-type Fuzzy Controller with Self-tuning Scaling Factors. J. Fuzzy Sets and Systems, vol. 93, 1998, pp. 23-28.
- [12] Ghaffari A., A.H.Shamekhi, A.Saki, E. Kamrani. Adaptive Fuzzy Control for Air-Fuel Ratio of Automobile Spark Ignition Engine. Proc. World Academy Sci., Eng.&Techn.,vol.48,2008, pp.284-292.
- [13] Mudi R. K., N. R. Pal. A Self-Tuning Fuzzy PI Controller. J. Fuzzy Sets and Systems,vol.115, No 2, 2000, pp.327-338.
- [14] Wu C-J, C-N Ko, Y-Y Fu, C-H Tseng. A Genetic-Based Design of Auto-Tuning fuzzy PID Controllers, Int. J. of Fuzzy Sys., vol. 11, No 1, 2009, pp. 49-58.
- [15] Karasakal O., E.Yesil, M.Guzelkaya, I. Eksin. Implementation of a new self-tuning fuzzy PID controller on PLC. Turk J Elec Eng., vol.13, No 2,2005, pp.277-286.
- [16] Chen K-Y, M-T Tsai, P-C Tung. An Experimental Analysis of an Active Magnetic Bearing System Using PID-Type Fuzzy Controllers with Parameter Adaptive Methods, Proc. 6th WSEAS Int. Conf. Circ., Sys, Electronics, Contr.&Signal Proc., Cairo, Egypt, Dec 29-31, 2007, pp. 191-195.
- [17] Tanaka K. and HO Wang, Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach. NY, John Wiley & Sons, 2001.

Автор: Владимир Янков, маг. инж. Докторант, катедра „Автоматизация на Непрекъснатите Производства“, Факултет Автоматика, Технически Университет-София; E-mail address: vlyankov@tu-sofia.bg

Постъпила на 23.04.2016

Рецензент: доц. д-р С. Енев