

## РАЗМИТ МОДЕЛ ПРИ ДИАГНОСТИКА НА НЕИЗПРАВНОСТИ С УРАВНЕНИЯ НА ПОДОБИЕ. ПРИЛОЖЕНИЕ ЗА СЕРВОСИСТЕМА

Александър Ищев, Гергана Йорданова

**Резюме:** В тази статия се разглежда приложението на размит модел на обекта при един от подходите за моделно базирана диагностика на неизправности: чрез използване на уравнения на подобие. Задачата е представена, както в общ вид, така и за конкретна сервосистема. Поради наличието на значителни нелинейности в обекта е необходимо да се състави нелинеен модел. Той се получава на базата на предварително събрани входно-изходни данни при изправна работа на обекта. Получените първични остатъци са подобрили за целите на диагностиката на неизправности. Проведени са реални експерименти с лабораторен стенд. Получените експериментални резултати са анализирани.

**Ключови думи:** диагностика на неизправности, размит Такаги-Сугено модел, уравнения на подобие, структурирани остатъци, сервосистема.

## FUZZY MODEL FOR FAULT DIAGNOSIS BASED ON PARITY RELATIONS. APPLICATION FOR A SERVOSYSTEM.

Alexandar Ichtev, Gergana Jordanova

**Abstract:** In this paper an application of a fuzzy model of the plant for one of the model based approaches for fault diagnosis (with parity relations) is investigated. The problem is stated in its general formulation as well as implementation to a servo system. It is necessary to use nonlinear model of the plant due to substantial nonlinearities. The model is obtained on the base of pre-recorded input-output data for a fault free operation of the plant. The obtained residuals are improved for the fault diagnosis purposes. Experiments with laboratory setup are carried out. The obtained results are discussed.

**Keywords:** fault diagnosis, fuzzy Takagi-Sugeno model, parity relations, structured residuals, servo system

## 1. Въведение

Възникването на неизправност в автоматичните системи може да доведе влошаване на качествените показатели на системата, да причини нежелани последици за околната среда и дори да застраши живота на хората. От една страна се появяват все повече автоматични системи, а от друга се засилват изискванията за безопасност, сигурност и надеждност. Това превръща диагностиката на неизправности в необходимост при проектирането на такива системи [1], [2]. Чрез подходящо управление е възможно до голяма степен да се елиминира или компенсира негативният ефект от настъпилата неизправност [3]. Поради изложеното по-горе, тази статия е насочена именно към тематиката на диагностика при неизправности. Изследваният обект е от класа на системите с най-широко приложение в съвременните автоматични системи за управление – сервосистемите [4]. Разгледаната система е лабораторен стенд, но в него са заложени всички нелинейности, които се срещат при реалните системи. Това обуславя използването и на нелинеен модел за описание на обекта. В тази статия се предлага за тази цел да бъде използван размит Такаги-Сугено модел.

## 2. Размит модел от тип Такаги-Сугено

Размитите модели от тип Такаги-Сугено могат да бъдат използвани като описание на голям клас нелинейни системи [5], [6], включително и разглежданата в тази статия сервосистема. Описанието на нелинейната система се представя като претеглена сума на локални линейни модели. За определянето (тренирането) на параметрите на модела предварително се събира входно-изходна информация от обекта. За да се получи по-добър модел, е възможно да се зададе предварителна информация за модела. Задава се структурата и броят на правилата. Структурата се избира на базата на сложността на обекта и желаната сложност на описанието, а броят на правилата се определя от големината на нелинейността. При използването на подхода на черната кутия е възможно да се намери описание от по-нисък ред. За целите на диагностиката на неизправности е възможно да се наложи използването на набор от модели, описващи системата, както в различни изправни режими, така и при отделни неизправности.

За моделирането на динамиката на сервосистемата са избрани модели от втори ред. При създаването на модела се използват две предишни измервания на изходният сигнал, както текущото и предходните входни въздействия. Използвани са четири локални модела за пресъздаване на нелинейността на системата.

Разглежда се описание по един от изходите на системата. По този начин се прави описание на едномерна система. Прави се предположение, че моделите са от тип NARX [5], [6]. Тогава за сервосистемата се получава:

$$y(k) = R_i(\xi(k)), i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

където вектора на регресорите е:

$$\xi(k) = [y(k-1) \quad y(k-2) \quad u(k) \quad u(k-1)] \quad (2)$$

$R_i$  базирани на правила размити модели от тип Такаги-Сугено [5],[6]:

$$R_i : \text{Ако } y(k-1) \text{ е } A_{i1} \text{ и } y(k-2) \text{ е } A_{i2} \text{ и } y(k) \text{ е } A_{i3} \text{ и } u(k-1) \text{ е } A_{i4}. \quad (3)$$

$$\text{Тогава } y_i(k) = a_{i1}y(k-1) + a_{i2}y(k-2) + b_{i1}u(k) + b_{i2}u(k-1) + \Theta_i$$

Изходът на модела се изчислява като претеглена сума от линейните следствени параметри на отделните правила (3).

$$y(k) = \sum_{i=1}^4 \gamma_i(k) y_i(k) / \sum_{i=1}^4 \gamma_i(k) \quad (4)$$

### 3. Диагностика на неизправности

В този доклад се използва дефиницията за понятието неизправност от [7]: „Неизправност е всяко непозволено отклонение на поне едно характерно качество на системата от нейните допустими обикновени (стандартни) условия.”

Системите за диагностика на неизправности имат три основни задачи, като първите две се изпълняват задължително [8]:

- откриване на неизправността - оказва възникването на неизправност;
- изолиране на неизправността - локализира нейното местоположение;
- идентифициране на неизправността - определя се нейната големина.

При диагностиката на неизправности могат да бъдат използвани два подхода за формиране на така наречените остатъци:

- хардуерен (директен) - за формирането на остатъците се използват допълнителни сигнали, за които са необходими специални хардуерни канали или компоненти.
- аналитичен - за формиране на остатъците се използват аналитични зависимости между отделните сигнали.

Разглежданият метод за диагностика на неизправности в тази статия е на базата на аналитичен остатък и се състои от два етапа: предварително се получава размит Такаги-Сугено модел на обекта и в реално време се получават и обработват остатъците. Тук не се дискутира идентификацията на неизправността. Разискването е съсредоточено върху втората задача - диагностика на неизправности, като откриването се осъществява едновременно с определянето на местоположението на неизправността. При този метод остатъкът е разлика между измерена от обекта и аналитично изчислена стойности. Като първичен остатък в тази статия се използва разликата между измерваните променливи и изходът на размития модел. При изправна система остатъкът следва да има нулева стойност, но това не се наблюдава при реалните системи поради присъствието на смущения и шумове. Има разработени специални подходи, с които се цели постигането на нечувствителност на остатъците към шумовете и смущенията [1], [4]. В конкретния случай се използват уравнения на подобие. При тях е възможно да се открият грешки вследствие на шумове и смущения в системата.

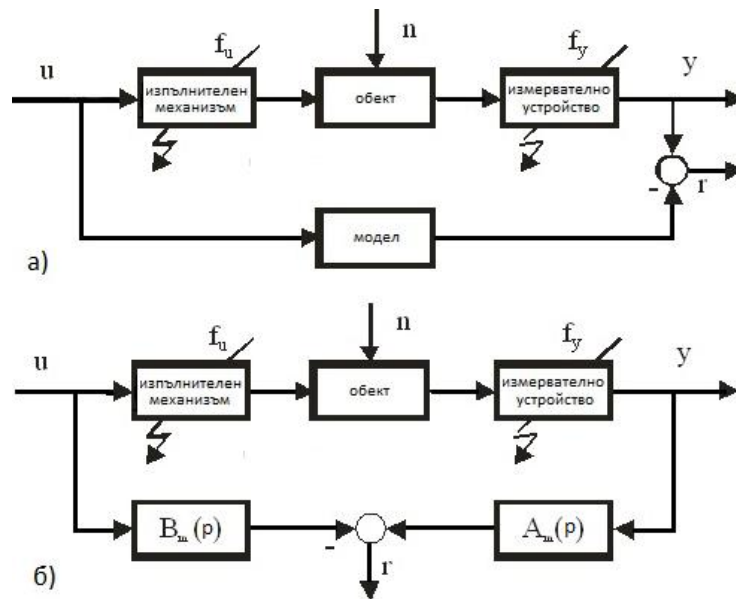
Най-често неизправност настъпва в изпълнителните и измервателните устройства. Именно такива неизправности се разглеждат в тази статия. Тяхното състояние би могло да се следи по време на профилактика на системата. С цел да се увеличи периода между отделните профилактични прегледи е възможно да се използва системата за диагностика. Тя позволява да се определи момента,

когато е необходима интервенция. По този начин се спестява време, през което системата не работи и средства за осъществяване на отделните профилактики.

#### 4. Уравнения на подобие

Уравненията на подобие е подход за откриване на неизправности, базиран на сравнението между конкретен модел на системата и реалния обект (сравнението има ролята на проверка дали между тях има съответствие) [1], [8]. Разликата между модела на системата и реалния обект се дефинира като остатък. Остатъкът има стойност нула, когато системата е исправна, и различна от нула, при наличие на неизправност [4]. Независимо от вида на неизправностите - в измервателни устройства (на изхода) и/или изпълнителни механизми (на входа) се предполага, че те са адитивни, т.е. техният ефект се добавя към конкретното измерване/управление и не зависи от абсолютната му стойност. Входната и изходната неизправности се означават съответно с  $f_u$  и  $f_y$ , а шума - с  $n$ . Трябва да се отбележи, че при едномерните системи изходната величина е скалар, докато при многомерните изходните величини са вектори.

За реализацията на уравнения на подобие се използват две схеми, показани съответно на Фиг. 1а и б.



Фигура 1. Блок-схеми за реализиране на уравнения на подобие

За целите на този доклад е реализирана случай а. При него е извършено сравнение между измеримия изход на обекта и изчисления изход на размития модел при еднакво входно въздействие. Ако моделът е точен и липсват шумове и смущения, остатъкът  $r(p)$  ще клони към нула.

$$r(p) = y_o(p) - y_m(p) \quad (5)$$

Означенията  $y_o(p)$  и  $y_m(p)$  са съответно изхода на обекта и изхода на модела.

От (5) може да се види, че броя на остатъците е еквивалентен на броя на изходите на системата. Броят на остатъците определя броя на неизправностите,

които могат да бъдат открити, т.е. броят на откриваемите неизправности при този подход е равен на броя на измеримите изходи на обекта.

На практика, обаче, в реалните системи винаги има наличие на шумове и смущения и затова обикновено остатъкът  $r(p)$  има вида:

$$r(p) = \Delta G_m u(p) + G_o(p) f_u(p) + n(p) + f_y(p) \quad (6)$$

където  $G_o(p)$  и  $G_m(p)$  са представянията съответно на обекта и модела.

При едномерна система има само един остатък. Той би имал стойност нула, само ако има идеално съвпадение на модела с обекта, няма шумове и смущение, нито наличие на входна и изходна неизправности. В общия случай на едномерна система отделянето на съответните компоненти е невъзможно. Това означава, че дори и при изправна работа на системата, остатъците ще се отличават от нула. Поради тази причина обикновено остатъците се сравняват с някакъв праг [9]:

$$r = \begin{cases} 0 & \text{ако } |r_i(t)| \leq r_n \\ 1 & \text{ако } |r_i(t)| > r_n \end{cases} \quad (7)$$

където  $r_n$  дефинира прага.  $r = 1$  означава, че един от праговете е преминал [9].

Ситуацията се променя благоприятно, когато са налични повече измервания - при многомерни системи. В този случай някои от компонентите на вектора на остатъка се променят, а други - не. Както ще бъде показано по-долу, това ще помогне при изолирането на неизправностите.

Уравнението на подобие позволява локализиране на неизправността. За целта е необходимо остатъците, които се получават, да бъдат структурирани, т.е. да бъдат известни комбинациите между отделните остатъци и конкретните неизправности, които ги причиняват.

При проектирането на структурираните остатъци се залагат специални свойства на остатъците. Например, може да се направи така, че остатъците да са чувствителни към някои, но нечувствителни върху други неизправности. Други желани свойства може да са независимост на остатъците от шума и/или някои смущения в обекта. Тогава може да се създаде вектор или таблица, които да покажат взаимовръзка между отделните остатъци и съответна неизправност. Трябва да има поне един остатък, който да не е засегнат от дадена неизправност [10]. Ако грешка в един остатък не води до изолирането на друга неизправност, то структурираната матрица на взаимовръзките се нарича силно изолираща. Слабо изолираща матрица означава, че следствие на една грешка се изолира друга неизправност. В тази статия съответните взаимовръзки за остатъците са представен в Табл. 1. В нея за да се генерират остатъци с добри изолационни качества на изолационния вектор, е необходимо остатъкът да е независим от неизправността, която се опитва да изолира (взаимовръзката е реализирана за три остатъка, след като са приложени ограниченията от уравнение (7)) [9].

	без неизправност	$f_x$	$f_y$	$f_{y1}$
$r_1$	0	0	1	1
$r_2$	0	1	0	1
$r_3$	0	1	1	0

Таблица 1. Взаимовръзка между остатъците за откриване на неизправност

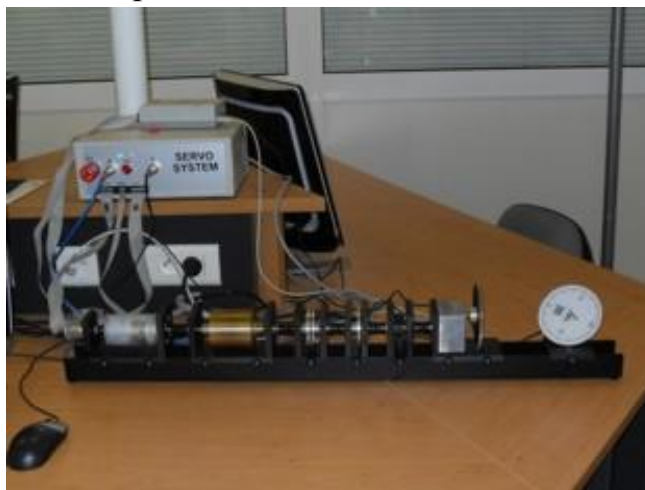
За да се получи изолационен вектор, уравнението на изходната грешка (8) се умножава с генериращата структурирани остатъци матрица  $W$ .

$$r^*(p) = W[y_o(p) - W_m(p)u(p)] \quad (8)$$

Колоните на  $W$  трябва да се избират така, че да направят съответния ред от дясната страна на равенството независим от съответен вход или изход [9]. Това е представено в конкретния случай с обект с един вход и два изхода.

### 5. Лабораторен стенд „сервосистема”

За целите на настоящата статия са проведените експерименти с лабораторен стенд „сервосистема”, произведен от Inteco<sup>®</sup>. Той е показан на Фиг. 2.



Фигура 2. Лабораторният стенд „сервосистема”

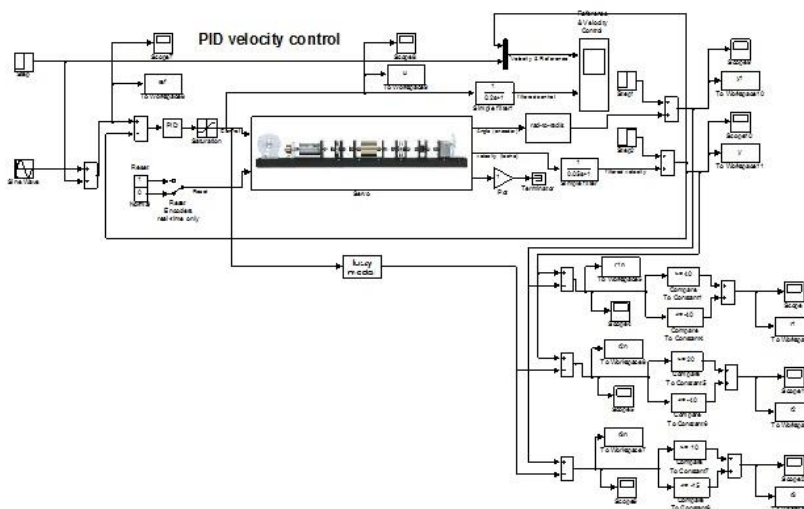
Принципът на действие на сервосистемата се състои в следното: управлението е подадено на постояннотоков двигател, който е свързан с тахогенератор. Двигателят задвижва инерционен модул, свързан със зона на нечувствителност, магнитна спирачка и предавателна кутия. Завъртането на вала на двигателя се измерва с инкрементален енкодер. Постоянно токовият двигател се управлява посредством широчинно-импулсен модулатор (ШИМ). При промяна на коефициента на ШИМ се променя ефективната стойност на подаваното напрежение според формулата  $u(t) = \frac{v(t)}{v_{\max}}$ . Максималното напрежение е  $v_{\max} = 12V$ , а допустимото управление е в диапазона  $[-1 \ 1]$  (знакът на ШИМ определя посоката на въртене). Изход на системата е скоростта

на задвижваният вал. Тя се измерва от тахогенератора, но може да бъде реконструирана и от измерванията на енкодера.

За диагностиката на неизправностите е важно е да се подчертае, че двете измервателни устройства работят на базата на различни физични принципи и не могат да бъдат едновременно повлияни от околната среда. Енкодерът е цифров датчик, използващ светлина, докато тахогенераторът е аналогов датчик, базиран на явлението електромагнетизъм [11].

## 6. Експериментални резултати

Експериментите са проведени посредством използване на предварително изградена блок-схема в средата на MATLAB/Simulink<sup>®</sup> с Real Time Workshop<sup>®</sup>. Блок-схемата на системата е представена на Фиг.3.



Фигура 3. Блок-схема на Simulink

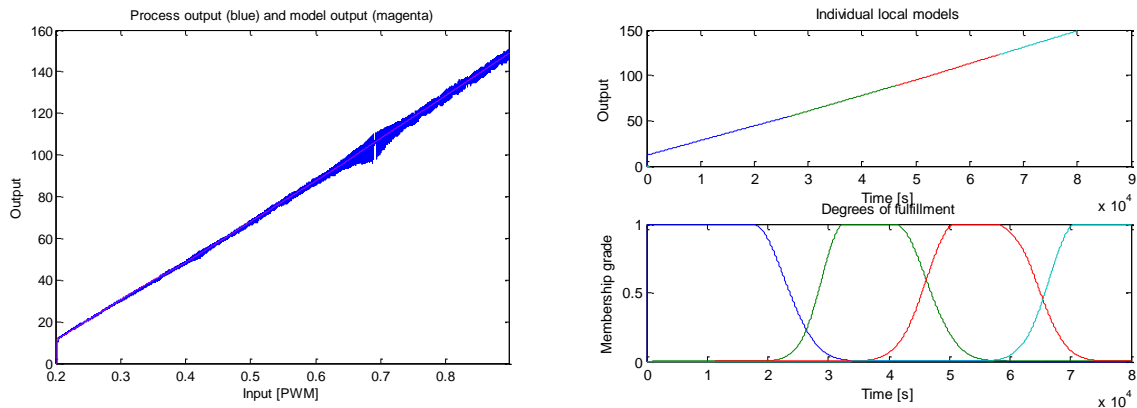
Времето за протичане на експеримента е 80 [s]. Заданието е под формата на стъпаловиден сигнал със стойност 35 [rad/s], комбиниран със синусоидален сигнал с амплитуда 15 и честота 0.01 [rad/s]. Целта е да се демонстрира работа на системата в различни работни точки. Неизправността е моделирана като стъпаловиден сигнал със стойност 8 [rad/s]. В първите 55 [s] в системата няма неизправност. Двигателят се развърта и работи в номиналния си режим. В 55 [s] се появява адитивна неизправност в измервателно устройство (на изхода на системата).

Размитият модел на обекта представлява нелинеен NARX модел. Той е направен за работа в целият диапазон на управление на сервосистемата (управления под 0.2 (2.4 V) не се отработват от двигателят). Той се моделира чрез специалния Fuzzy Modeling and Identification Toolbox<sup>®</sup>. Верификацията между размития модел и обекта (Фиг. 4) показва съответствие 99.91% :

$$VAF = 99.9102$$

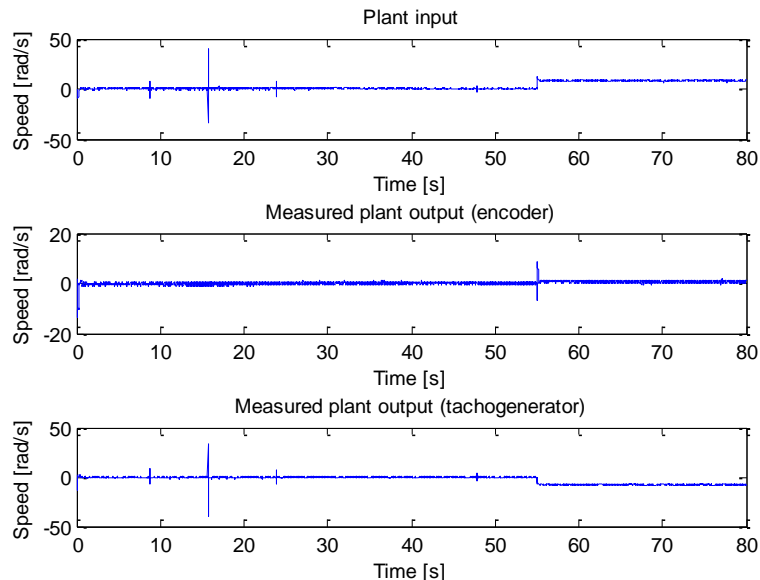
За да се получат структурираните остатъци при диагностика чрез метода на подобие, са необходими предварителни изчисления. За провеждането на експери-

мента са реализирани три остатъка: първият остатък представлява разликата между двата изхода, вторият – между втория изход на обекта и изхода на размития модел и третият – между първия изход на обекта и изхода на размития модел. Взаимовръзките между отделните остатъци бяха показани в Табл. 1. По този начин се моделират структурираните остатъци. Тъй като в системата има наличие на относително голям шум, което създава наличието на големи пикове в сигналите, те са филтрирани и след това са зададени и прагови стойности, като след прилагането на тези прагови стойности са получени окончателните т.н. бинарни остатъци.



Фигура 4. Верифициране на размития модел и обекта

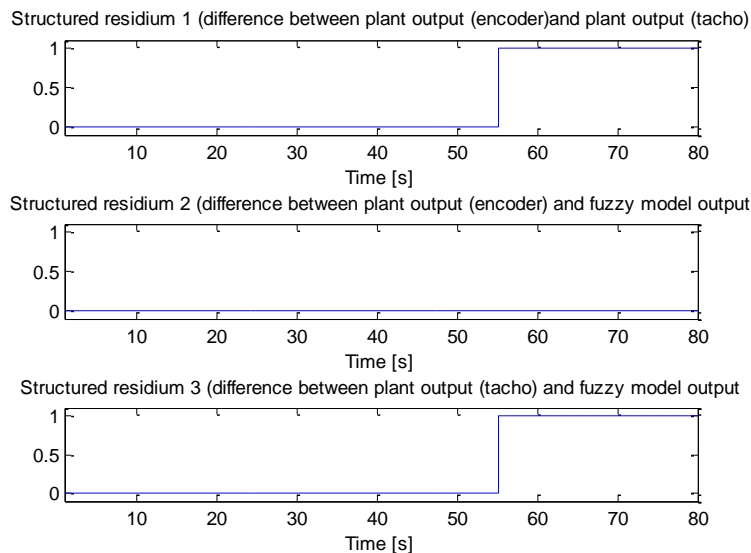
На Фиг. 5 са представени входният сигнал на обекта; изходният сигнал на обекта от тахогенератора и измереният изходен сигнал на обекта от енкодера.



Фигура 5. Вход и изходи на обекта

Получените бинарни остатъци от проведения експеримент са представени на Фиг. 6.





Фигура 6. Бинарни остатъци

Може да се види, че в момента на настъпването на неизправност се активират първият и третият остатъци. След това от Табл.1 посредством взаимовръзката остатъци-неизправност се вижда, че това е неизправност във втория датчик (на втория изход). Това показва, че системата за диагностика коректно открива и изолира неизправността. По този начин неизправностите в измервателни устройства могат да бъдат успешно открити и изолирани.

## 7. Заключение

В тази статия са съчетани два подхода за моделиране на нелинейни системи и за моделно базирана диагностика на неизправности- чрез уравнение на подобие. Формирани са остатъци, т.е. разликата между измерената стойност на изходния сигнал и изчислената на базата на размит модел. Синтезирани са и структурни остатъци, които позволяват конкретното откриване и изолиране на неизправности. Задачата е представена както в общ вид, така и за конкретна сервосистема. Проведена е реален експеримент със сервосистемата. Получените от експериментите резултати са анализирани.

## Благодарност

Изследванията в тази статия са извършени по проект 122ПД0082-08, финансиран от НИС на ТУ-София.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Isermann R., *Fault-Diagnosis Systems An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*, Springer, Germany, 2006
- [2] Patton R., *Fault-tolerant control: the 1997 situation*, In Prepr. IFAC SAFEPROCESS, volume 2, 1997, pp. 591-596

- [3] Ищев А., *Многомоделно управление с откриване и компенсиране на неизправности*, Автоматика и Информатика, 2010, бр.3 стр. 40-44
- [4] Gertler J., *Fault Detection and Diagnosis in engineering systems*, Marcel Dekker, Inc., USA, 1998
- [5] T. Takagi, M. Sugeno. *Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol.~15, 1985, pp.116-132.
- [6] Babuska R., *Fuzzy Modeling for Control*, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [7] Isermann R., *Balle P Trends in the application of model-based fault detection and diagnostics in technical processes. Control Engineering Practice*, 5 (5), 1997, pp. 638-652
- [8] Patton R., Frank P.M. and Clark Eds R.N., *Issues of diagnosis for Dynamic systems - Diagnosis Systems*, Springer, London, UK, 2000
- [9] Ichtev A., *Parity equations for fault diagnostic of a servo system. XVIII национален научен симпозиум с международно участие "Метрология и метрологично осигуряване 2009" Созопол*, pp. 498 – 504.
- [10] Kanev, S. and Verhaegen M. (2000), *Controller reconfiguration for non-linear system, Control Engineering Practice*, vol. 8 (11), pp. 1223-1235, November.
- [11] Inteco<sup>®</sup>, *Modular Servo System, User Manual*

**Автори:** Александър Ищев – доц. д-р от Технически университет – София, Факултет Автоматика, катедра „Системи и управление”, *email: [ichtev@tu-sofia.bg](mailto:ichtev@tu-sofia.bg)*;  
Гергана Йорданова, докторант от Технически университет – София, Факултет Автоматика, катедра „Системи и управление”