

# СРАВНЕНИЕ МЕЖДУ НЕЛИНЕЕН И РАЗМИТ МОДЕЛ ПРИ ДИАГНОСТИКА НА НЕИЗПРАВНОСТИ С УРАВНЕНИЕ НА ПОДОБИЕ ЗА СЕРВОСИСТЕМА

## COMPARISON BETWEEN NONLINEAR MODEL AND A NONLINEAR FUZZY MODEL FOR FAULT DIAGNOSIS BASED ON PARITY RELATIONS FOR A SERVOSYSTEM

G. Jordanova, A. Ichtev

System and control group, Faculty of Automatics, Technical University of Sofia, Sofia 1000, 8 Kliment Ohridski Blvd, bl.2, tel. +35929652420, e-mail: [gijordanova@gmail.com](mailto:gijordanova@gmail.com), [ichtev@tu-sofia.bg](mailto:ichtev@tu-sofia.bg)

**Abstract:** In this paper a comparison of a nonlinear model and a fuzzy nonlinear model of the plant for one of the model based approaches for fault diagnosis is considered. The investigated approach uses parity equations for fault detection and isolation. The problem is stated in its general formulation as well as implementation to a servo system. From the system's model, structured residuals for fault detection are obtained and they are improved and used for fault isolation. Both output (sensor) faults as well as input (actuator) faults are considered. Experiments with laboratory setup are carried out. The obtained results are discussed.

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

### ВЪВЕДЕНИЕ

Интензивното развитие на техниката в съвременния свят е предпоставка за изграждането на все по-сложни обекти и системи за управление, които използват множество измервателни устройства, изпълнителни механизми и други компоненти. Така се увеличава вероятността за възникване на неизправност. Възникването на неизправност в автоматичните системи може да доведе влошаване на качествените показатели на системата, да причини нежелани последствия за околната среда и дори да застраши живота на хората. Това превръща диагностиката на неизправности в необходимост при проектирането на такива системи [1, 2]. Чрез прилагането на подходящо управление е възможно до голяма степен да се отстрани или компенсира негативният ефект от настъпилата неизправност [3]. Поради изложеното по-горе, този доклад е насочен именно към тематиката на диагностиката 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 заложили нелинейности, които се срещат при реалните системи. Това обуславя използването и на нелинеен модел за описание на обекта. В доклада се предлага за тази цел да бъдат използвани размит Такаги-Сугено модел на обекта и модел на обекта, предложен от компанията Inteco®.

### НЕЛИНЕЕН МОДЕЛ И НЕЛИНЕЕН РАЗМИТ МОДЕЛ ОТ ТИП ТАКАГИ-СУГЕНО

За описанието на голям клас от нелинейните системи могат да бъдат използвани размитите модели от тип Такаги-Сугено [5, 6], включително и за разглежданата в този доклад 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 използва 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 нелинейността. При подхода на черната кутия е вероятно да се намери описание от по-нисък ред. За целите на диагностиката на неизправности е възможно и използването на набор от модели, описващи системата, както в различни изправни режими, така и при отделни неизправности [1, 2, 4, 7].

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 текущо, така и предходно входно въздействие. Използвани са четири локални модела за нелинейността на системата.

Разглежда се описание, използващо един от изходите на системата. Предполага се, че тя е 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:

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

$R_i$  (3) са размити правила за модели от тип Такаги-Сугено [5, 6].

Изходът на модела се изчислява като претеглена сума от линейните следствени параметри на отделните правила (3) в (4) [7].

Нелинейният NARX модел е моделиран чрез специалния

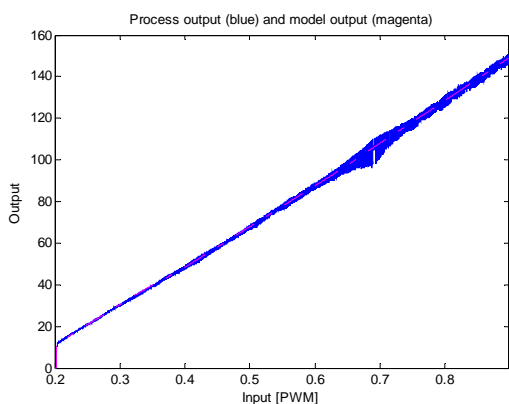
$R_i$  : If  $y(k-1)$  is  $A_{i1}$  and  $y(k-2)$  is  $A_{i2}$  and  $y(k)$  is  $A_{i3}$ ,  $u(k-1)$  is  $A_{i4}$ .

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

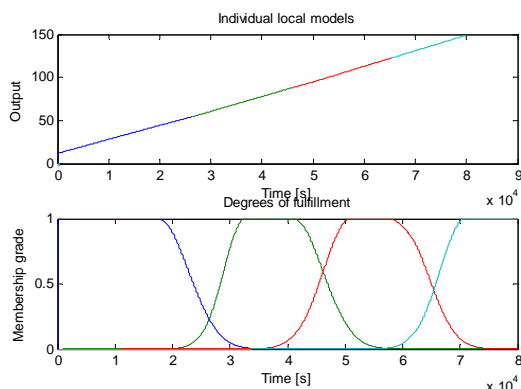
$$y(k) = \sum_{i=1}^4 \gamma_i(k)y_i(k) / \sum_{i=1}^4 \gamma_i(k) \quad (4)$$

Fuzzy Modeling and Identification Toolbox<sup>®</sup> [8]. Той е съставен за работа в целият диапазон на управление на сервосистемата (управления под 0.2 (2.4 V) не се отработват от двигателя). На базата на предварително проведен експеримент е извършено трениране на модела – Фиг. 1а) и изходът и функциите му на принадлежност за отделните правила са представени на Фиг. 1б). Съответствието на модела с обекта е 99.9102%.

а)



б)



Фигура 1. Размитият модел на обекта

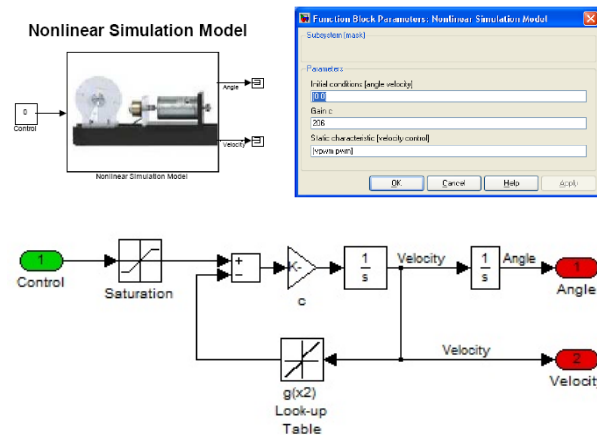
За целите на експериментите се използва и нелинеен симулационен модел на обекта, предложен от компанията Inteco<sup>®</sup> [9], изграден под формата на блок в Simulink<sup>®</sup> (Фиг. 2).

#### ДИАГНОСТИКА НА НЕИЗПРАВНОСТИ

Съгласно дефиницията на техническия комитет на IFAC [10]: „Неизправност е всяко незапозволено отклонение на поне едно характерно качество на системата от нейните допустими обикновени (стандартни) условия.”

Всяка система за диагностика решава три основни задачи, като първите две се изпълняват задължително [1, 11]:

- откриване на неизправността - оказва възникването на неизправността;



Фигура 2. Нелинейния симулационен модел, предложен от компанията Inteco<sup>®</sup>

- изолиране на неизправността - локализира нейното местоположение;
- идентифициране на неизправността - определя се нейната големина (в доклада тази задача не се дискутира).

Разглежданият метод за диагностика на неизправности в този доклад е на базата на аналитичен остатък и се състои от два етапа:

- предварително се получава нелинеен или размит Такаги-Сугено модел на обекта;
  - в реално време се получават и обработват остатъците.
- В конкретния случай за решаването на задачата за диагностика на неизправности се използват уравнения на подобие. При тях е възможно да се открият грешки вследствие на шумове и смущения в системата [7].

#### ПОДХОД ЧРЕЗ УРАВНЕНИЯ НА ПОДОБИЕ

При подхода за откриване на неизправности, базиран на уравнения на подобие, се прави сравнение между конкретен модел на системата и реалния обект (сравнението има ролята на проверка дали между тях има съответствие) [1, 10]. Разликата между модела на системата и на реалния обект се изразява чрез т.н. остатък, които е аналитична величина. Като първичен остатък в този доклад се използва разликата между измерваните променливи и изчислената стойност на базата на използвания модел. При изправна система остатъкът следва да има нулева стойност (без наличие на входна и изходна неизправности). Това се наблюдава при идеално съвпадение на модел с обект (няма шумове и смущения):

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

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

В реалните системи, обаче, остатъкът  $r(p)$  има вида:

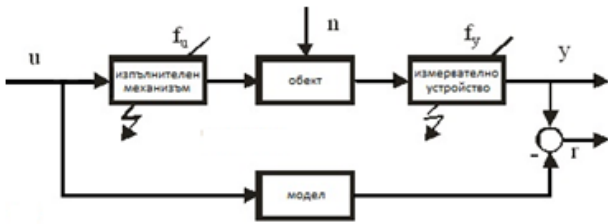
$$r(p) = \Delta G_m u(p) + G_o(p) f_u(p) + n(p) + f_y(p) \quad (6)$$

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

За реализацията на уравнения на подобие се използва схемата, показана на Фиг.4.

Входната и изходната неизправности се означават съответно с  $f_u$  и  $f_y$ , а шума – с  $n$ .

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАНОВКА



Фигура 4. Блок-схеми за реализиране на уравнения на подобие

Дори при изправна работа на системата, остатъците ще се отличават от нула. Поради тази причина обикновено остатъците се сравняват с някакъв праг [11]:

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

където  $r_n$  дефинира прага.  $r = 1$  означава, че един от праговете е преминал [9]. Големината на този праг представлява компромис между откриването на малки (по амплитуда неизправности) и нечувствителност към външни шумове и смущения.

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, което помага при изолирането на неизправностите.

От (5) може да се види, че броя на остатъците е равен на броя на изходите на системата. Броят на остатъците определя броя на неизправностите, т.е. броят на откриваемите неизправности при този подход е равен на броя на измеримите изходи на обекта. 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.

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. Например, може да се направи така, че остатъците да са чувствителни към някои, но нечувствителни към други неизправности или да са независими 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 [12]. В този доклад съответните взаимовръзки за остатъците са представен в Табл. 1

Таблица 1. Взаимовръзка между остатъците за откриване на неизправност

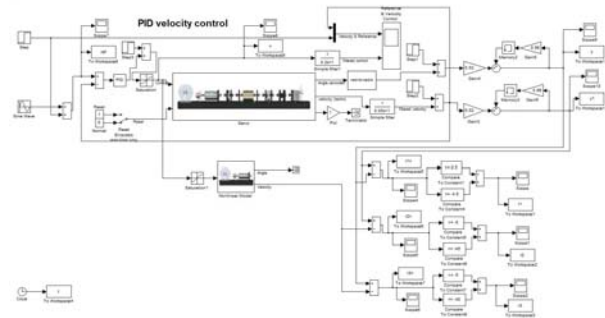
| Остатъци | без<br>неизправност | $f_u$ | $f_{y1}$ | $f_{y2}$ |
|----------|---------------------|-------|----------|----------|
| $r_1$    | 0                   | 0     | 1        | 1        |
| $r_2$    | 0                   | 1     | 0        | 1        |
| $r_3$    | 0                   | 1     | 1        | 0        |

За целите на настоящия доклад са проведените експерименти с лабораторен стенд „сервосистема“, произведен от Inteco®. 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 двигателят 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  $u(t) = v(t) / v_{\max}$ .

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 [9].

## ПРОВЕДЕНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ

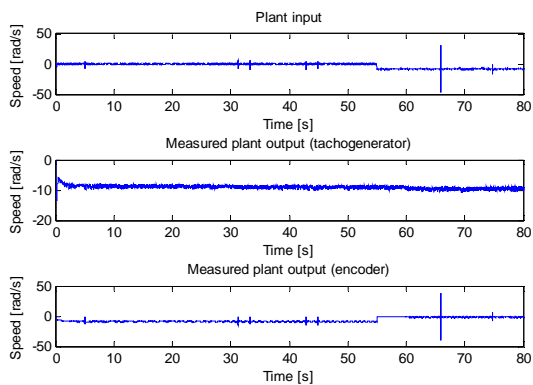
Експериментите са проведени посредством използване на предварително изградена блок-схема в средата на MATLAB/Simulink® с Real Time Workshop®. Блок-схемата на системата е представена на Фиг. 5.



Фигура 5. Блок-схема на Simulink

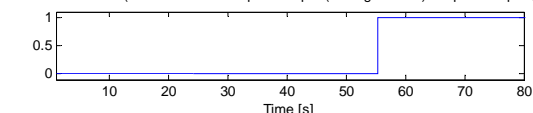
Времето за протичане на експеримента е 80 [s]. Заданието е под формата на стъпаловиден сигнал със стойност 35 [rad/s], комбиниран със синусоидален сигнал с амплитуда 15 и честота 0.01 [rad/s]. Целта е да се демонстрира работа на системата в различни работни точки. Неизправността е моделирана като стъпаловиден 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, като са изследвани случаите, в които неизправността се появява съответно в изпълнителен механизъм (на входа) и в измервателно устройство (на изхода) на системата.

Направени са по три експеримента със всеки един от моделите, като са показани резултатите при настъпването на неизправност в измервателно устройство (на изхода) на системата (тъй като системата има два изхода, в случая неизправността е настъпила на изхода на енкодера). На Фиг. 6 и 8 са представени сигналите от обекта при използването съответно на нелинейния симулационен модел и при размития модел, а на Фиг. 7 и 9 са представени получените бинарни остатъци.

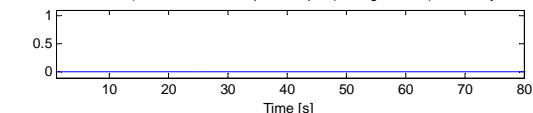


Фигура 6. Вход и изходи на обекта – нелинеен модел

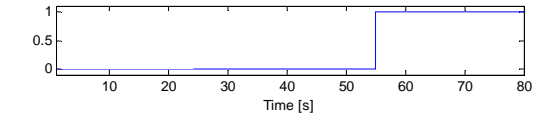
Structured residium 1 (difference between plant output (tachogenerator) and plant output (encoder))



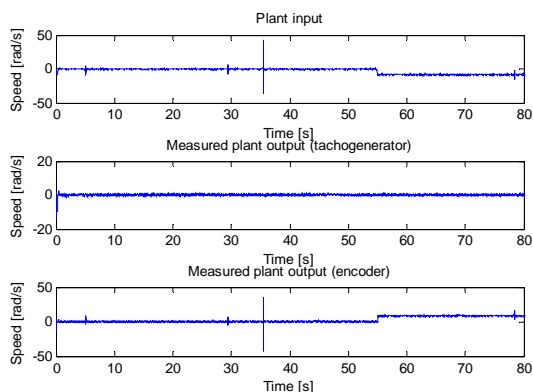
Structured residium 2 (difference between plant output (tachogenerator) and fuzzy model output)



Structured residium 3 (difference between plant output (encoder) and fuzzy model output)

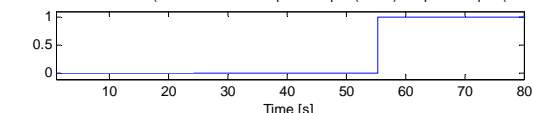


Фигура 7. Бинарни остатъци – нелинеен модел

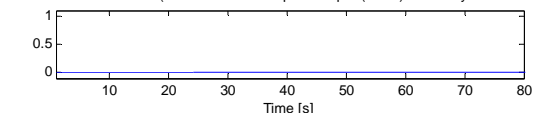


Фигура 8. Вход и изходи на обекта – размит модел

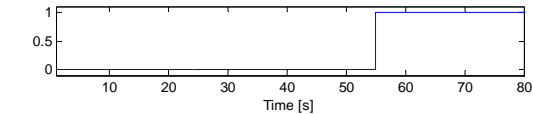
Structured residium 1 (difference between plant output (tacho) and plant output (encoder))



Structured residium 2 (difference between plant output (tacho) and fuzzy model output)



Structured residium 3 (difference between plant output (encoder) and fuzzy model output)



Фигура 9. Бинарни остатъци – размит модел

Може да се види, че в момента на настъпване на неизправността, се активират първият и третият остатък. Посредством взаимовръзката между остатъците в Табл. 1, се вижда, че това съответства на неизправност в

измервателно устройство (на изхода), което показва, че системата за диагностика на неизправността коректно открива и изолира дадената неизправност. От резултатите може да се заключи, че системата за диагностика на неизправности и в двата случая работи еднакво ефективно. В експериментите с размития модел се наблюдава доста голямо количество шум, което се дължи на факта, че експериментите са проведени с реална среда, но системата за диагностика на неизправности успява да се справи с поставената задача, което доказва, че тя е по-работоспособна, по-ефективна и може да се тества върху реални обекти.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В доклада 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

- Isermann R., Fault-Diagnosis Systems An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance, Germany, Springer, 2006
- Patton R., Fault-tolerant control: the 1997 situation, In Prepr. IFAC SAFEPROCESS, volume 2, 1997, pp. 591-596
- Ищев А., Многомоделно управление с откриване и компенсиране на неизправности, Автоматика и Информатика, бр.3, 2010, стр. 40-44
- Gertler J., Fault Detection and Diagnosis in engineering systems, USA, Marcel Dekker, Inc., 1998
- Takagi T., 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.
- Babuska R., Fuzzy Modeling for Control, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- Ищев А., Г. Йорданова. Размит модел при диагностика на неизправности с уравнения на подобие – приложение за сервосистема, Годишник на Технически университет – София, том 62, книга 1, 2012, стр. 123-132 (изнесен на Международна конференция Автоматика '2012)
- <http://www.dsc.tudelft.nl/~babuska/fmid/fmid-v40.zip>
- Inteco®, Modular Servo System, User Manual
- Patton R., M. P. Frank and R. N. Clark Eds, Issues of diagnosis for Dynamic systems - Diagnosis Systems, London, UK, Springer, 2000
- 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.
- Kanev, S. and M. Verhaegen M. (2000), Controller reconfiguration for non-linear system, Control Engineering Practice, vol. 8 (11), pp. 1223-1235, November