

РАЗМИТО ТОЛЕРАНТНО КЪМ НЕИЗПРАВНОСТИ УПРАВЛЕНИЕ НА СЕРВОСИСТЕМА

Г. Йорданова, А. Ищев

gijordanova@gmail.com, ichtev@tu-sofia.bg

Абстракт: В този доклад се разглежда размито толерантно към неизправности управление на сервосистема. Предложеният метод е базиран на диагностика на неизправности чрез подход, използващ наблюдатели на състоянието. Алгоритъмът за управление реконфигурира управляващото устройство, като подбира незасегнати от неизправността измервания. Управлението на обекта се осъществява посредством размит ПД регулатор и специална система от ключове. Задачата е представена, както в общ вид, така и за конкретната сервосистема. Експериментите са проведени с лабораторен стенд. Получените експериментални резултати са анализирани.

Ключови думи: диагностика на неизправности чрез наблюдатели на състоянието, лабораторен стенд, размито, толерантно към неизправности управление, сервосистема, структурирани остатъци

FUZZY LOGIC FAULT TOLERANT CONTROL OF A SERVO SYSTEM

G. Jordanova, A. Ichev

gijordanova@gmail.com, ichtev@tu-sofia.bg

Abstract: In this paper fault tolerant control of a servo system, using fuzzy logic, is presented. The proposed method uses fault diagnosis investigation approach, based on observers for fault detection and isolation. Discussion over the residual generation and evaluation is carried out. The reconfiguration algorithm selects fault free measurements from the system. The plant's control is implemented through fuzzy PD controller and special set of keys. The problem is stated in its general formulation as well as implementation to a servo system. Experiments with laboratory setup are carried out. The obtained results are presented and discussed.

Keywords: observer fault diagnosis, laboratory setup, fuzzy fault tolerant control, servo system, structured residuals

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Всяка съвременна автоматична система е уязвима към настъпването на неизправности в нея. За да се постигне локализиране на неизправността в рамките на засегнатия компонент и да се предотврати разпространяването на негативния ефект върху цялата система, тя може да се изключи. Подобно изключване обаче може да се избегне чрез реализиране на т.н. „толерантно към неизправности управление“ [5, 6]. При него системата остава работоспособна, въпреки появата на неизправности. Ето защо и целта на този доклад е да се разгледа именно това управление. Предложен е вариант чрез размит ПД регулатор за управление на многомерни обекти. Настройките на регулатора се базират на предварително извършена диагностика на неизправности.

2. ДИАГНОСТИКА НА НЕИЗПРАВНОСТИ

Разглежданата схема за диагностика се състои от два етапа:

- (а) получаване на модели на системата – извършва се предварително;
- (б) получаване и обработване на т.н. остатъци в реално време.

В рамките на този доклад не се дискутира идентификацията на обекта, т.е. предполага се, че структурата и параметрите му са вече известни. Разискването е съсредоточено само върху втория етап. Остатъкът е разлика между измерена от обекта и аналитично изчислена стойности. Като първичен остатък се използва разликата между измерваните променливи и изходите на настройваемия модел.

При изправна система остатъкът следва да има нулева стойност, но това не се наблюдава при реалните системи поради присъствието на смущения и шумове. Поради тази причина, обикновено остатъците се сравняват

спрямо определени граници [5, 2]. Предполага се, че стойностите вътре в границите отговарят на изправна работа, както и че всяко надвишаване от тези граници е предизвикано от неизправност. Надвишаване на границите ще се нарича активиране на остатъка.

По този начин проверката на границите води до използването на бинарни остатъци.

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

където r_{th} дефинира прага. $r = 1$ означава, че един от праговете е надвишен. Границите се поставят от проектанта на системата за диагностика на неизправности и представляват компромис между откриването на малки неизправности и нечувствителност към грешки от моделиране и наличие на шум в системата [3].

3. ПОДХОД ЧРЕЗ НАБЛЮДАТЕЛИ НА СЪСТОЯНИЕТО

За целите на диагностиката се предлага използването на наблюдатели на състоянието. Това е оправдано т.к. наблюдателите често присъстват и при управлението на системи от този клас, т.е. има необходимост от техния синтез. При управлението на такива обекти много често се използват техните състояния, поради което се налага те да бъдат оценени. Наблюдателите на състоянието използват измеримите входни и изходни променливи и реконструират неизмеримите състояния на обекта. В общия случай уравненията, описващи наблюдател на състоянието са:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + Le(t) \quad (2)$$

$$e(t) = y(t) - C\hat{x}(t) \quad (3)$$

където $e(t)$ е изходната грешка. Тя влияе на реконструираната производна и на променливата на състоянието $\dot{\hat{x}}(t)$ чрез матрицата на наблюдателя L [3, 9].

След като се замести $e(t)$ от (3) в (2) и се предположи, че системата е наблюдаема се получава приложимо уравнение на наблюдателя:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) = & [A - LC]\hat{x}(t) + Bu(t) \\ & + Ly(t) + Nn(t) + Pf_o(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Ако се предположи, че модела на обекта е идеално познат и че наблюдателят е проектиран да е устойчив, то грешката от оценката на наблюдателя намалява асимптотически [3, 9]. Тогава уравнението на изходната грешка (3) може да бъде записано чрез грешката на оценката на състоянието:

$$\begin{aligned} e(t) = & y(t) - C\hat{x}(t) = \\ & C\tilde{x}(t) + Nn(t) + Pf_o(t) \end{aligned} \quad (5)$$

След първоначално отклонение грешката при оценката на състоянието $\tilde{x}(t)$ изчезва. По този начин изходната грешка $e(t)$ зависи от шума и неизправностите в системата. Това означава, че тази грешка може да се използва като първичен остатък $e(t) = r(t)$. Важно е да се отбележи, че остатъка не зависи от големината на входният сигнал [3].

В този доклад се разглеждат специализирани наблюдатели, които използват различни входни и изходни сигнали. За адитивна изходна неизправност в пространство на състоянията може да се запише:

$$y(t) = Cx(t) - Pf_o(t) \quad (6)$$

Изходният вектор на неизправностите е съставен от различните неизправности:

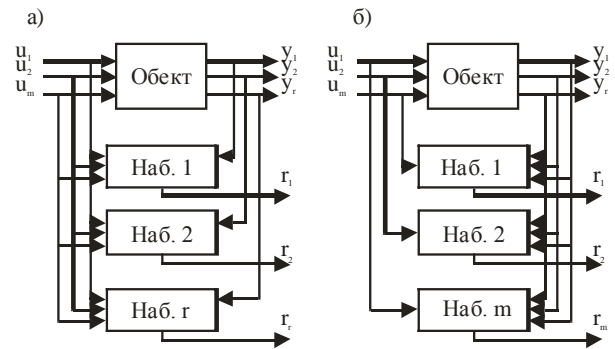
$$f_o^T(t) = [f_{o1}(t) \quad f_{o2}(t) \quad \dots \quad f_{or}(t)] \quad (7)$$

На следваща стъпка се създава набор от наблюдатели. Това е показано на Фиг.1а).

Взаимовръзката може да бъде представена като:

$$y_i(t) = c_i^T x(t) + f_{oi}(t) \quad (8)$$

Тогава съответното уравнение на наблюдателя е (9).



Фиг.1. Набор от наблюдатели

$$\dot{\hat{x}}(t) = [A - l_i c_i^T] \hat{x}(t) + Bu(t) + l_i y_i(t) \quad (9)$$

Окончателният запис на остатъците, получени на базата на изходната грешка е:

$$r_i(t) = y_i(t) - c_i^T x(t) \quad (10)$$

Това означава, че за конкретна изходна неизправност се активира само един остатък, а всички останали са неактивни, т.е. те би трябвало да имат нулева стойност.

По този начин, чрез директно сравнение с таблица на съответствието (Табл.1), може да се направи и изолация на изходната неизправност [3].

Табл.1. Взаимовръзка между остатъците за откриване на неизправност

Остатъци	без наличие на неизправности	f_u	f_{y1}	f_{y2}
r_1	0	1	0	0
r_2	0	0	1	0
r_3	0	0	0	1

За да се открият входни неизправности е възможно да се използва набор от подобни наблюдатели. Те събират информацията от всички измерими изходи, но само от един от входните сигнали. По този начин, при поява на входна неизправност, се активира само един остатък. Схема на използване на такъв набор от наблюдатели е показана на Фиг.1б).

От гледна точка на подобряване на свойствата управляемост и наблюдаемост може да се синтезират

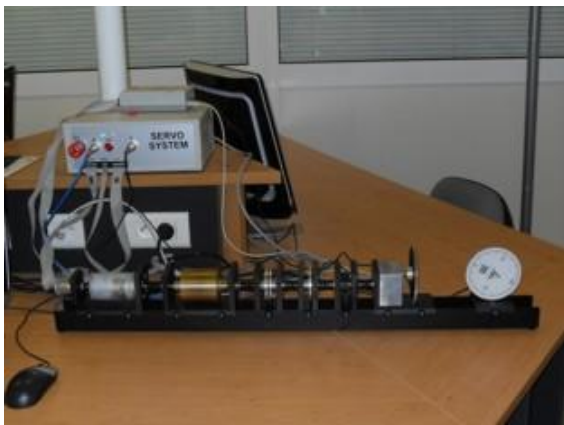
наблюдатели, които използват всички налични изходи и входове на системата с изключение на един. При тази постановка се активират всички остатъци с изключение на един, като отново чрез анализирането на таблицата на съответствието е възможно да се извърши коректно откриване и изолиране на съответната неизправност (Табл.2).

Табл.2. Взаимовръзка между остатъците за откриване на неизправност (модификация)

Остатъци	без наличие на неизправности	f_u	f_{y1}	f_{y2}
r_1	0	0	1	1
r_2	0	1	0	1
r_3	0	1	1	0

4. ЛАБОРАТОРЕН СТЕНД

За целите на настоящия доклад са проведените експерименти с лабораторен стенд „сервосистема”, произведен от Inteco[®]. Той е показан на Фиг.2.



Фиг.2. Лабораторният стенд „сервосистема”

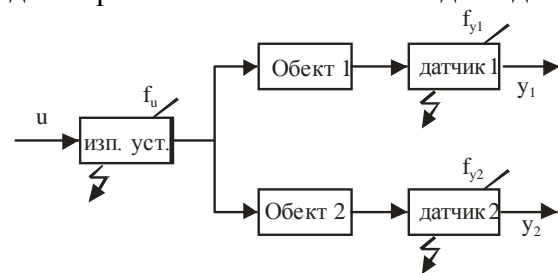
Принципът на действие на сервосистемата се състои в следното: управлението е подадено на постояннотоков двигател, който е свързан с тахогенератор. Двигателят задвижва инерционен модул, свързан със зона на нечувствителност, магнитна спирачка и предавателна кутия. Завъртането на вала на двигателят се измерва 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 [8, 4].

5. СИСТЕМА С ЕДИН ВХОД И ДВА ИЗХОДА

Тъй като разглежданата в този доклад система има един вход и два изхода (Фиг.3), тя може да бъде представена като две паралелни системи, които имат един и същи вход, но различни изходи.

Поради факта, че системата има само две измерими величини (уравнение (10)), за нея могат да бъдат получени два първични остатъка и могат да бъдат



Фиг.3. Система с един вход и два изхода

използвани само два наблюдателя. Всеки от тях използва информацията от входа на обекта, а разликата между тях се състои в използваният изходен сигнал.

В този доклад се цели откриването на неизправности, както на входа, така и на изходите на обекта. От Фиг.1 може да се види, че при изходна неизправност се засяга едната от двете паралелни подсистеми. Това означава, че при

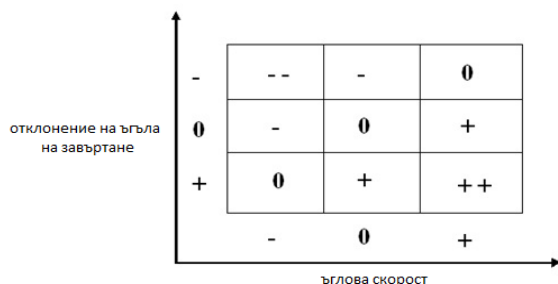
изходна неизправност, се активира само един остатък. Тя е показана на Табл.3.

Табл.3. Взаимовръзка между остатъците за откриване на неизправност

Остатъци	без наличие на неизправности	f_u	f_{y1}	f_{y2}
r_1	0	1	1	0
r_2	0	1	0	1

6. РАЗМИТ ПД РЕГУЛАТОР

Логиката на размития ПД регулатор е обяснена чрез Фиг.4, съставена от девет размити правила [1]. Правилата може да бъдат и повече (например в случай, че е необходимо по-прецизно избиране на коефициентите на регулатора или на правилата). Съответните лингвистични променливи за входните и изходните величини са дефинирани, както следва: 0 (нула); + (положително); ++ (много положително); - (отрицателно) и -- (много отрицателно).



Фиг.4. Правила, изграждащи логиката на размития ПД регулатор

Трите нули по главния диагонал на тази таблица формират т.н. линия на превключване. Тя е пряко свързана с управляващият сигнал u . За централния квадрат грешката e и нейната производната \dot{e} са равни на нула и поради това не е необходимо да се подава управление. В горния десен и долния ляв ъгъл има грешка, но от производната се вижда, че и без управление грешката намалява. В тези случаи е добре да се изчака системата да отиде до позиция без грешка със своята динамика. Под диагонала се подава управление, защото или има тенденция да се появи грешка, или

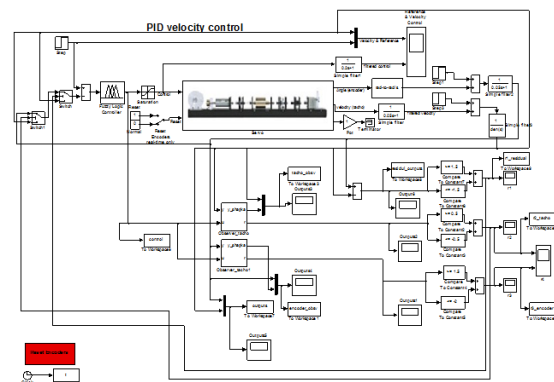
системата се е стабилизирала в ненулево положение. В долния десен ъгъл и позицията е неблагоприятна, а и производната показва, че системата ще придобие още по-голяма грешка, ако не се управлява. Поради това е необходимо да се подаде голямо положително управление, за да може системата да се установи в желаната позиция. За блоковете над диагонала важат същите разсъждения като за блоковете под диагонала, но знаците са различни.

7. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ЧАСТ

Експериментите са проведени в средата на Matlab/Simulink® с Real Time Workshop®. Блок схемата на системата е представена на Фиг.5.

Предложеният метод и направените изводи вследствие на проведените експерименти са приложими и за други подобни системи. В дясната част на Фиг.5 е показано преобразуването на измереният ъгъл от енкодера в ъглова скорост, т.е. е реконструирано измерването от техогенератора и сравняването на остатъците с гранични стойности, вследствие, на което са получени окончателните бинарни остатъци.

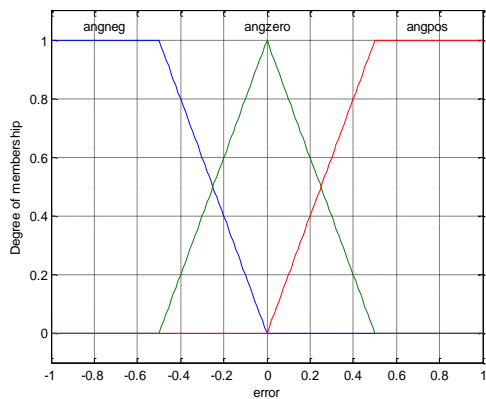
Управляващото устройство е размит ПД регулатор, който изчислява управляващия сигнал на базата на две входни величини – грешката на затворената система и нейната производ



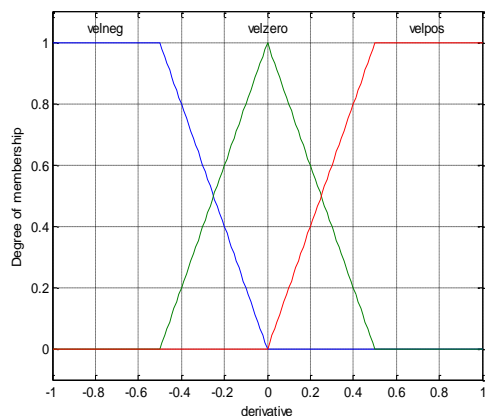
Фиг.5. Блок-схема на Simulink

на. В конкретния случай грешката се асоциира с отклонението на ъгъла на завъртане на вала на постояннотоковия двигател от зададения ъгъл т.е. това е грешката между зададения ъгъл и действителния ъгъл на завъртане на вала на двигателя. Тогава производната на грешката е ъгловата скорост на въртене на вала на двигателя.

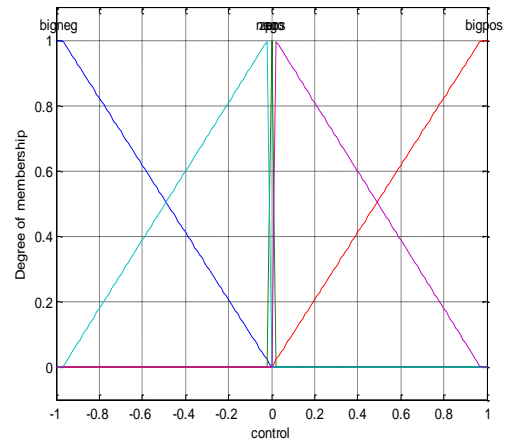
След като логиката на управлението е точно и ясно дефинирана, се избират функции на принадлежност на входните (Фиг.6 и Фиг.7) и изходната променливи (Фиг.8). Те са нормирани в интервала $[-1 1]$. Сумата от функциите на принадлежност за всяка стойност на входната променлива е 1. Този факт е важно предимство, ако се прилага програмно размито управление (например, при настройка на PLC).



Фиг.6. Функция на принадлежност на отклонението на ъгъла на завъртане

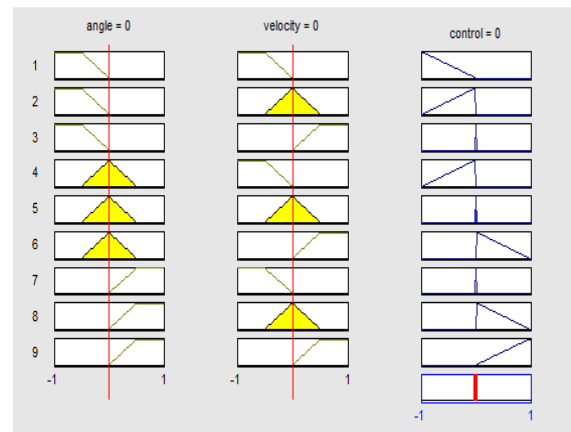


Фиг.7. Функция на принадлежност на ъгловата скорост

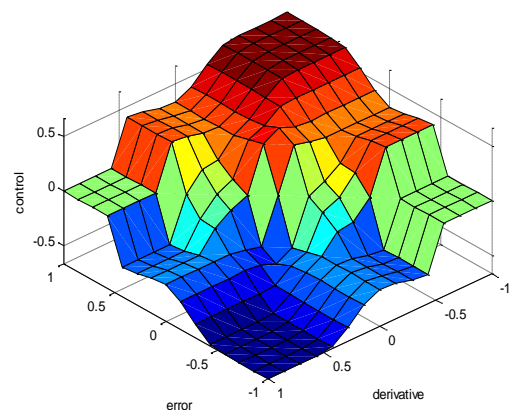


Фиг.8. Функция на принадлежност на управлението

Коректността на така зададените функции на принадлежност се проверява с помощта на визуализиране на правилата и триизмерната повърхнина на управлението (Фиг.9 и Фиг.10).



Фиг.9. Визуализация на правилата за управление



Фиг.10. Визуализация на повърхнината на управление

8. УПРАВЛЕНИЕ ПРИ НЕИЗПРАВНОСТИ

Поради голямото разнообразие на възможните неизправности, на тяхното местоположение и на тяхната степен, е трудно да се предложи единен подход за тяхното неутрализиране чрез използването само на аналитичен излишък. Тук се предлага едно възможно решение, свързано с методите за диагностика на неизправности [7, 3].

При разглежданата система се проверява за наличие на неизправности в основното измервателно устройство – тахогенератора. Предлага се, при поява на неизправност в него, да се използва реконструираната скорост, получена на базата на енкодера. При реализираната схема (Фиг.5) в лявата част се разглежда само изходна неизправност.

Както беше коментирано по-горе, използваните наблюдатели са два, които предоставят два остатъка. В схемата на от Фиг.5. е добавен и трети остатък.

В лявата част на схемата е реализирана система от ключове, която избира изправния изходен сигнал. Тя използва системата от бинарни остатъци. Първият ключ се превключва при активация на втория бинарен остатък. Този ключ превключва между основният измерван сигнал (от тахогенератора) и реконструираният на базата на енкодера. Изхода на ключа се подава на вторият ключ. Чрез него се прави отново избор между основният изходен сигнал и полученият от първият ключ. Активацията се извършва от първият бинарен остатък. По този начин се вижда, че за да се използва реконструираният сигнал е необходимо едновременно да са активирани първия и втория остатъци, което отговаря на неизправност във вторият изход (долният изход на схемата). След сравняване с Табл.2 се вижда, че е настъпила неизправност в тахогенератора. За целите на

управлението ще се използват измерванията на тахогенератора ако системата е изправна или има неизправности в енкодера или постоянно токовият двигател.

Проведен е и експеримент за компенсирание на входна неизправност, но поради ограниченият обем на тази публикация, схемата и получените резултати не са представени.

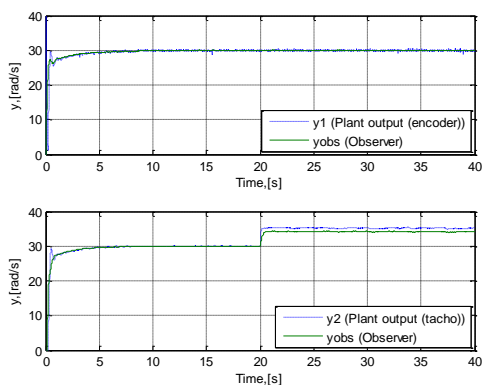
9. ПОЛУЧЕНИ РЕЗУЛТАТИ

Времето за протичане на експеримента е 40 [s]. В първите 20 [s] в системата няма неизправност. Двигателят се развърта и работи в номиналния си режим, следвайки задание от 30 [rad/s]. В 20 [s] се появява неизправност реализирана чрез стъпаловиден сигнал със стойност 5 [rad/s].

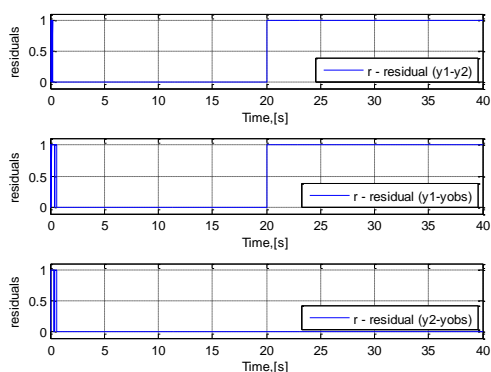
Направен е експеримент, при които неизправността е симулирана на втория изход – на тахогенератора. Получените резултати са представени на Фиг.11 и Фиг.12.

От Табл.2 може да се види, че при настъпване на неизправността в системата се активира първият и вторият остатъци, което съответства на неизправност на изхода на тахогенератора – системата коректно определя неизправността). След настъпването на неизправността, за целите на управлението, се използва реконструираният сигнал.

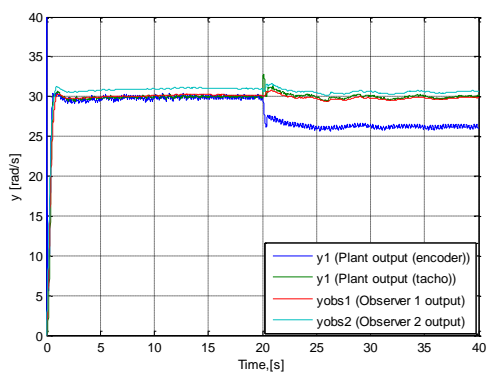
От Фиг.13, може да бъде видяно, че след настъпването на неизправност в системата, реалният изход на системата има малко отклонение, но в рамките на пет секунди започва правилно да следи заданието. Това показва, че благодарение на промяната на управлението, качеството на системата се запазва, макар и след кратък преходен процес.



Фиг.11. Поведение на изходните сигнали на реалната системата и наблюдателя



Фиг.12. Бинарни остатъци



Фиг.13. Изходни сигнали

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В този доклад е изследвано и демонтирано управление при неизправности чрез използване на диагностика на неизправности с наблюдател на състоянието. На базата на експерименти с реален лабораторен експеримент бе демонстрирано коректното откриване и изолиране на неизправности. Постигнато е

толерантно към неизправности управление.

БЛАГОДАРНОСТ

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Babuska R. (January 2000). *Fuzzy and Neutral Control*. Delft University of Tehnology, Delth, Netherlands.
- [2] Gertler J. (1998). *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel Dekker, Inc., USA.
- [3] Ichtev A., G. Jordanova (2011). *Fault tolerant control with observer based fault diagnosis*. Journal of the TU-Plovdiv, Vol. 16, book 1, pp. 49-54.
- [4] Inteco®. *Modular Servo System, User Manual*.
- [5] Isermann, R. (2006). *Fault-Diagnosis Systems An Introdustion from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer.
- [6] Patton, R. (1997). *Fault-tolerant control: the 1997 situation, volume 2*, pp. 591-596. In Prepr. IFAC SAFEPROCESS.
- [7] Ищев, А. (2010). *Многомоделно управление с откриване и компенсиране на неизправности*, бр.3, стр. 40-44. Автоматика и Информатика.
- [8] Ищев А., Г. Йорданова (2012). *Размит модел при диагностика на неизправности с уравнения на подобие – приложение за сервосистема*, Годишник на ТУ–София, том 62, книга 1, стр. 123-132 (изнесен на Международна конференция Автоматика ‘2012).
- [9] Маджаров Н., Е. Хараланова (2004). *Инженерни методи за изследване на линейни системи*, ТУ, София.