



FAULTS DIAGNOSIS OF TRANSPORT MACHINERIES USING THE OBSERVER

DIAGNOSTIKA DOPRAVNÝCH STROJOV POMOCOU POZOROVATEĽA

Liberios VOKOROKOS

*Department of Computers and Informatics
Faculty of Electrical Engineering and Informatics
Letná 9, 042 00 Košice, Slovakia
vokoroko@tuke.sk*

1. INTRODUCTION

This article aims at fault detection relevant to operation security. In spite of many researches done there are still key problems open concerning the quick fault diagnosis its location and intensity. Firstly it is necessary to diagnose the fault to be able to make the fault correction soon.

We detect the faults in rotating turbo rotor using observer for controlling faults and instability with application to transport machineries [7]. There are different observers that can be used. To be able to choose a suitable one the knowledge of systemic dynamics is required. The corresponding observers are selected in dependence of system characteristics [2]. We analyse the non-linear observer application based on fictitious model with integrator [5].

When dealing with fault and instability we exploit the same methods as applied in fault diagnosis. The general methods are classified into methods of analytical and hardware redundancy [7]. A method based on observer's estimates the state vector and enables to detect the fault or instability due to the state changes. Methods using observers are divided into linear and non-linear ones. The linear observer has either the known or unknown inputs according to the general fault diagnosis and systemic observer entry [6].

1. ÚVOD

Práca je zameraná na detekciu poruchy, ktorá je z pohľadu prevádzkovej bezpečnosti veľmi relevantná. Aj napriek všetkým snahám mnohých vedcov ostávajú kľúčové problémy, ako čo najrýchlejšie zistiť poruchu v čase prevádzky a ďalej keď sa porucha vyskytla, kde a v akom rozsahu sa nachádza ešte stále otvorené. Je dôležité zistiť poruchu zložitého systému, aby sa mohlo pristúpiť k včasnej výstrahе v oblasti bezpečnosti.

Prínosom článku je diagnostika porúch v rotujúcom turborotore pomocou pozorovateľa pre sledovanie poruchy a nestability s aplikovaním na dopravné stroje [7]. Problematika poruchy má k dispozícii rôzne pozorovatele. Volba vhodného pozorovateľa vyžaduje potrebné znalosti systémovej dynamiky, pretože v závislosti od charakteru systému sa volia príslušné pozorovatele [2]. V práci analyzujeme aplikáciu nelineárneho pozorovateľa v prípade výskytu poruchy, ktorý sa opiera o fiktívny model na báze integrátora [5].

Pri skúmaní problematiky porúch a nestability sa opierame o rovnaké metódy ako v prípade diagnostikovania poruchy. Tieto všeobecné metódy sa členia na metódy analytickej redundancie a na metódy hardwarovej redundancie [7]. Metóda založená na pozorovateľoch umožňuje odhadnúť stavový vektor tak, že je možné spoznať vznik poruchy, resp. nestability pomocou stavových zmien. Metódy založené na pozorovateľoch sa členia na lineárne a nelineárne metódy. V závislosti od všeobecnej diagnostiky poruchy a podľa charakteru systémového vstupu do pozorovateľa možno lineárny pozorovateľ rozdeliť na pozorovateľ so známymi a neznámymi vstupmi [6].

2. OBSERVER

As mentioned above there are various observers for dealing with faults and instability. In general there are detailed information concerning the complex technical system inevitable to estimate the state or to diagnose a linear time invariant system.

We usually obtain the required information about the monitoring system from measuring [8],[9]:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2)$$

Faults arising can result in non-linear effects $n_{ri}(x(t), t)$, being either hardly or with some difficulties estimated with linear observer. Non-linear observer is to be applied than. It is not easy to establish condition for such an observer. It is due to the unknown effects $n(x(t), t)$. It applies to observers for fault diagnostics and isolation as well. Concerning the observer with unknown inputs the system is by regular transformation transposed to a systemic transformation separating the known inputs from the unknown ones.

3. DESIGN OF NON-LINEAR OBSERVER

Non-linear observer is actually a linear observer approximating non-linear effects $n(x(t), t)$ of a compound system using the model of faults in accordance with the following equation:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + N_v n(x(t), t) \quad (3)$$

Let:

$$\dot{v}(t) = Vv(t) \quad (4)$$

Approximation:

Nech:

Aproximácia:

$$n(x(t)) \approx H v(t) \quad (5)$$

Matrices V (fictitious model matrix) and H (fictitious weight matrix) are defined according to the technical setting [7],[8]. Vector $v(t)$ is the n_f dimension vector of basic functions representing the time course of events $n(x(t), t)$. Non-linear observer design is based upon fictitious fault model (4) describing non-linearity. In view of technical setting and convergence features the fictitious model shouldn't be arbitrarily chosen or modelled. Regarding the quick convergence features the model of integrator is considered the fault model where:

Ako sme už naznačili, problematika poruchy a nestability má k dispozícii rôzne pozorovatele. Vo všeobecnosti sú na odhad stavu alebo na diagnostiku lineárneho, časovo invariantného systému nevyhnutné detailné informácie o zložitom technickom systéme. Tieto potrebné informácie o sledovanom systéme sa získavajú obyčajne meraniami [8],[9]:

Vznik poruchy môže viest' k nelineárnym javom $n_{ri}(x(t), t)$, ktoré pomocou lineárneho pozorovateľa nie je možné alebo je možné iba ťažko odhadnúť. V takýchto prípadoch sa môže využiť nelineárny pozorovateľ. Je ťažké vytvoriť podmienky na jestvovanie takéhoto pozorovateľa. Ide predovšetkým o také prípady, keď javy $n(x(t), t)$ nie sú presne známe. Platí to rovnako aj pre pozorovatele, ktoré sa využívajú na diagnostiku a izoláciu poruchy. Ak sa jedná o pozorovateľ s neznámymi vstupmi, systém sa pravidelnou transformáciou prevedie na systémové zobrazenie, v ktorom sa oddelujú známe vstupy od neznámych.

Nelineárny pozorovateľ je lineárny pozorovateľ, ktorého úlohou je aproximovať nelineárne javy $n(x(t), t)$ zložitého systému pomocou modelu porúch, podľa rovnice:

Maticu V (fiktívna modelová matica) a H (fiktívna hmotnosťná matica) sú definované v závislosti od technického pozadia [7],[8]. Vektor $v(t)$ možno interpretovať ako n_f rozmerný vektor základných funkcií, ktoré približujú časový priebeh javov $n(x(t), t)$. Návrh nelineárneho pozorovateľa (obr. 1) sa opiera o fiktívny model poruchy (4), ktorý bližšie popisuje nelinearitu. Tento fiktívny model poruchy by nemal byť vzhl'adom na technické pozadia a vlastnosť konvergencie ľubovoľne zvolený, resp. modelovaný. Podľa rýchnej vlastnosti konvergencie sa za model poruchy považuje integrátorový model, pričom:

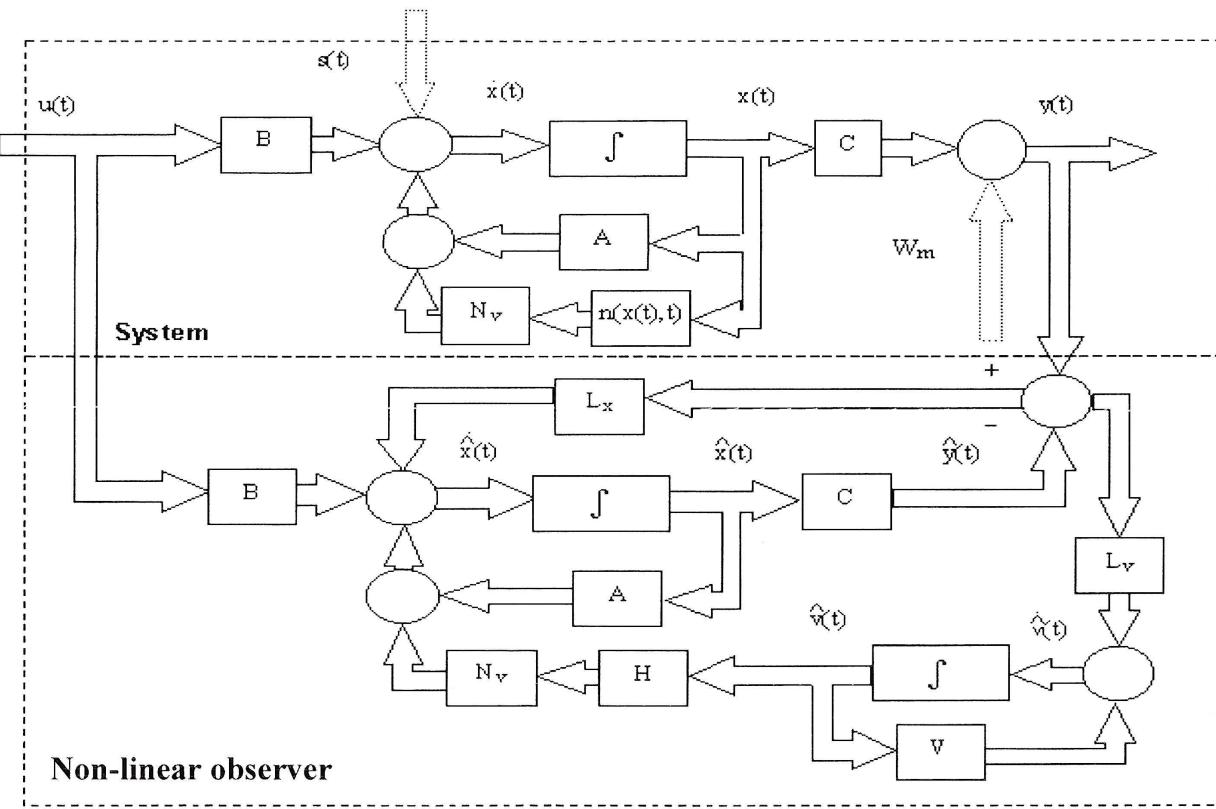


Figure 1 Non-linear observer: A : systemic matrix of a faulty controlling centre, B : input matrix; C : measuring matrix, L_x : matrix of amplifying a state, L_v : matrix of amplifying the extended, fictitious model, $u(t)$: input vector, $x(t)$: state vector, $\hat{x}(t)$: vector of an observer, $\hat{v}(t)$: fault vector of fictitious model; $y(t)$: system measuring vector, $\hat{y}(t)$: estimate measuring vector; N_v, H, V : model matrices, w_m : measuring noise, $s(t)$: process noise.

Obrázok 1: Nelineárny pozorovateľ; A : systémová matica poruchového riadiaceho centra; B : vstupná matica; C : meracia matica; L_x : matica zosilnenia stavu; L_v : matica zosilnenia pre rozšírený, fiktívny model; $u(t)$: vstupný vektor; $x(t)$: stavový vektor; $\hat{x}(t)$: vektor pozorovateľa; $\hat{v}(t)$: poruchový vektor fiktívneho modelu; $y(t)$: merací vektor systému; $\hat{y}(t)$: merací vektor estimátora; N_v, H, V : matice modelu; w_m : meracie šumy; $s(t)$: procesové šumy.

$$V = 0 \quad (6)$$

Model (4), (6) depicted as a system of differentiating equations of first rank represents the basic approximation function of $n(x(t), t)$ (3). Non-linear vector $n(x(t), t)$ comprises n_f components:

Tento model (4),(6), ktorý je tu zobrazený ako systém diferenciálnych rovníc prvého radu, predstavuje základnú funkciu aproximácie priebehu javov $n(x(t), t)$ (3). Nelineárny vektor $n(x(t), t)$ pozostáva z n_f komponentov:

$$n(x(t), t) = \begin{bmatrix} n_1(x(t), t) \\ \dots \\ n_{n_f}(x(t), t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

In accordance with (5) each individual component can be approximated by:

Podľa (5) môžeme approximovať každý jednotlivý komponent pomocou:

$$n_i(x_i(t), t) \approx H_i v(t) \quad (8)$$

It is interpreted as an indicator of a fault. The arrangement of a fictitious model is not arbitrary. We suppose n_f arrangement with:

Interpretuje sa ako poruchový indikátor vzniknutej poruchy. Usporiadanie fiktívneho modelu nie je ľubovoľné. Predpokladáme usporiadanie n_f a zvolíme:

$$H = I_{(n_f \times n_f)} \quad (9)$$

The non-linear observer can be designed regarding the fictitious model mentioned above. Systemic descriptions (2), (3) are the output design equations [4],[9]. An extended systemic model can be obtained using fictitious model of faulty values (4), (6), (9) from:

$$\dot{x}_e(t) = A_e x_e(t) + B_e u(t) + L y(t) \quad (10)$$

where:

$$x_e(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ v(t) \end{bmatrix}; \quad A_e = \begin{bmatrix} A & N_v H \\ 0 & V \end{bmatrix}; \quad B_e = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

pričom:

Based upon this an observer is designed:

Na základe toho sa navrhuje (jednotkový) pozorovateľ:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}(t) \\ \dot{\hat{v}}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & N_v H \\ 0 & V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{v}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} L_x \\ L_v \end{bmatrix} (y(t) - \hat{y}(t)) = \\ &= \underbrace{\begin{bmatrix} A - L_x C & N_v H \\ -L_v C & V \end{bmatrix}}_{A_0} \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{v}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} L_x \\ L_v \end{bmatrix}}_{L_0} y(t) \end{aligned} \quad (12)$$

with estimated measurement:

s odhadnutým meraním:

$$\hat{y} = [C : 0] \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \dots \\ \hat{v}(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

If the extended system $[A_e, C_e]$ can be observed according to the condition:

Ked' je možné rozšírený systém kompletne pozorovať, t. zn. maticový pár $[A_e, C_e]$ je možné pozorovať:

$$Rang \begin{bmatrix} \lambda I_{N_n} - A & \vdots & -N_v H \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & \lambda I_s - V \\ C & \vdots & 0 \end{bmatrix} = \dim(x(t)) + \dim(v(t)) = N_n + n_f, \forall \lambda \in C^+ \quad (14)$$

than it is possible to define the matrices of amplifying L_x, L_v so that the observer (12) is asymptotically stable and the negative real parts take appropriate values. Fictitious model (6) of n_f dimension describes the unknown time $n(x(t), t)$ as follows:

potom je možné, aby matice zosilnenia L_x, L_v boli tak definované, že pozorovateľ (12) je asymptoticky stabilný a vlastné hodnoty nadobúdajú negatívne reálne časti. Fiktívny model (6) s rozmerom n_f približne popisuje neznáme časové reakcie $n(x(t), t)$ nasledovne:

$$n(x(t), t) \approx \hat{n}(t) = H \hat{v}(t) \quad (15)$$

Matrix model V of ($nf \times nt$) dimension and the matrix H of ($nf \times nf$) dimension are involved in (6) and (9). Matrix coefficient ($Nv \cdot H$) connects the fictitious model with the whole system. Number of measures must be equal or be higher than the number of non-linearities nf : $me \geq nf$. Observer dynamism is expressed in the matrix Ao ($Nn + nf \times Nn + nf$). For the asymptotically stable observer and corresponding values the own figures of the matrix observed Ao are to be on the left from the imaginary axis and own figures A.

4. FAULT SIMULATION

This part deals with simulating instability and faults [3]. Firstly we analyse the instability and than the faults. Considering the decomposition of elementary model the intensity of instability of control system is a known figure. Based on the Finite Element Method (FEM) the control system is divided into individual systems – the subsystems ($N=4$) being joined with so called nodular points [1]. Simulation is based upon application the FEM supposing the locality and range of fault finding out the features of systemic dynamism [2],[5].

We apply the observer to diagnose the fault locality in the 4. and 3. subsystem. Subsystem 1 (picture on the right down) is stable. Fault intensity achieves in the 2 subsystem (figure on the left down) inappreciable values hardly to be picked up in the modular system. Figure 2 describes the insatiable faulty-free controlling centre up to $t = 1.5s$. With 1.5 excess the additional interference fault intensity arises. Figure on the left at the top represents the situation when fault location and observer share the same position. Figure on the right at the top describes the estimation in the 3 subsystem. The range of instability in the 3 subsystem is smaller than in the 4. one.

It must be pointed out that faults arising in different subsystems cannot be diagnosed with one observer. At the beginning we allow for using one observer and finally a bank consisting of two elementary observers in the subsystems of the control system. For faulty localisation it is suitable to exploit a bank with more than two elementary observers [7],[8]. According to the possibilities a bank of more elementary observers is always more advantageous when even the technique for designing such bank is of big importance.

Maticový model V s rozmermi $nf \times nt$ a matica H s rozmermi $nf \times nf$ - sú zobrazené v rovniciach (6) a (9). Maticový súčin ($Nv \cdot H$) spája fiktívny model s celkovým systémom. Počet meraní musí byť prinajmenšom väčší alebo rovný počtu nelinearít nf : $me \geq nf$. Dynamiku pozorovateľa charakterizuje matica Ao ($Nn + nf \times Nn + nf$). Vytvoriť asymptoticky stabilný pozorovateľ a získať priateľné hodnoty je možné za predpokladu, že vlastné hodnoty sledovanej matice Ao sa nachádzajú vľavo od imaginárnej osi v celkovej rovine a rovnako aj vľavo od vlastných hodnôt A.

4. SIMULÁCIA PORUCHY

Táto časť obsahuje príklad simulácie vztahujúce sa na problematiku nestability a poruchy [3]. Preto sa najprv venujeme problematike nestability a až následne problematike poruchy. Za predpokladu dekompozičného elementárneho modelu, považujeme intenzitu nestability v elementárnom rotujúcom systéme za známu veličinu. Pomocou metódy konečných prvkov sa rotujúci turborotor rozdeľuje na jednotlivé systémy [1]. Každý jednotlivý systém sa nazýva podsystém (na tejto práci počet je $N = 4$), pričom každý bod prechodu medzi podsystémami sa nazýva uzlový bod. Na základe modelu konečných prvkov sa prevádzka simulácia, predpokladá sa miesto a rozsah poruchy. Zisťuje sa tak charakter systémovej dynamiky [2],[5].

Pomocou pozorovateľa sa diagnostikuje lokalita výskytu poruchy v 4. a 3. podsystéme. Podsystém 1 (obrázok vpravo dole) je stabilný. Intenzita poruchy nadobúda v 2. podsystéme (obrázok vľavo dole) veľmi malé hodnoty a v uzlovom systéme sa vôbec nedá zachytiť. Obrázok 2 zobrazuje nestabilitu bezporuchového riadiaceho centra až po hodnotu $t = 1.5$ s. Pri prekročení $t = 1.5$ s nastáva dodatočná interferenčná intenzita poruchy. Obrázok vľavo hore zachytáva situáciu, keď miesto výskytu poruchy a pozorovateľ zaujímajú rovnakú pozíciu. Obrázok vpravo hore zobrazuje odhad v 3. podsystéme. Stanovená intenzita nestability v 3. podsystéme je menšia v porovnaní so štvrtým podsystémom.

Možno konštatovať, že poruchy vyskytujúce sa v rôznych podsystémoch nie je možné stanoviť pomocou jedného pozorovateľa. Najprv sa však zvažuje možnosť využiť jeden pozorovateľ a až následne sa aplikuje skupina obsahujúca dva elementárne pozorovatele v podsystémoch rotujúceho turborotora. Vo všeobecnosti môžeme tvrdiť, že skupina pozostávajúca z viac než dvoch elementárnych pozorovateľov je vhodná na stanovenie miesta výskytu poruchy [7],[8]. To znamená, že ak je to možné, skupina s viacerými elementárnymi pozorovateľmi je vždy lepšia, pričom už technika navrhovania takejto skupiny zohráva dôležitú úlohu.

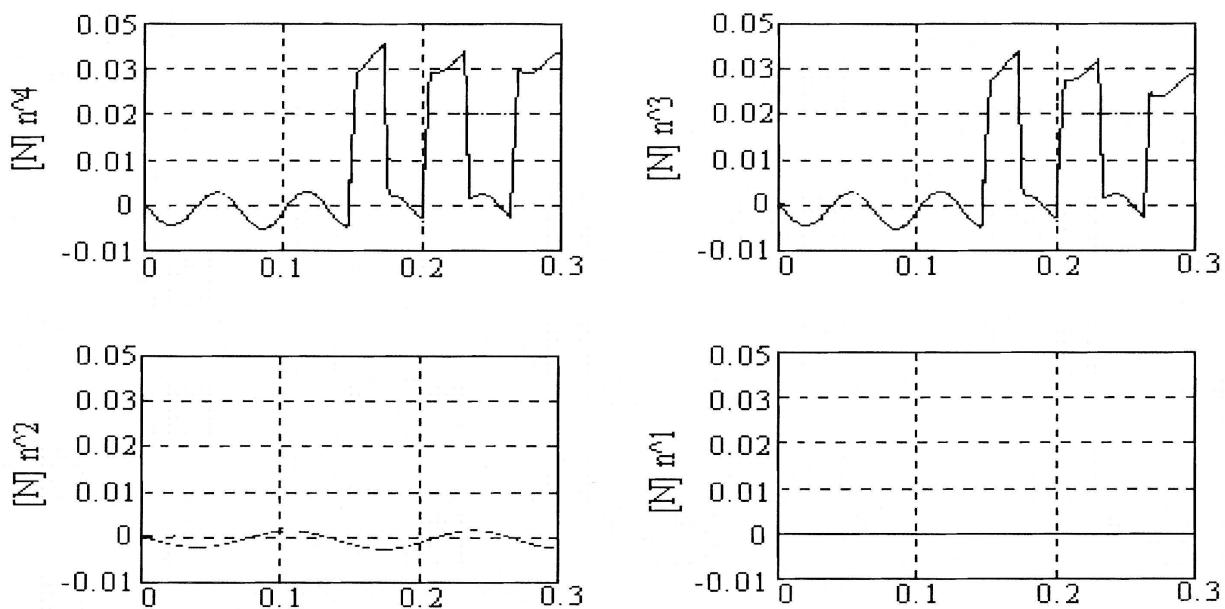


Figure 2 An estimated fault intensity of 1.,2.,3. and 4. subsystem with fault locations in the 4.subsystem. x axis: time in [s]; y axis: intensity in [N] ; range of fault: $t_f = 1 \text{ mm}$.

Obrázok 2 Stanovená intenzita poruchy 1.,2.,3. a 4. podsystému s miestom výskytu poruchy vo 4. podsystéme. x os: čas v [s]; y os: intenzita v [N] ; rozsah poruchy: $t_f = 1 \text{ mm}$.

5. CONCLUSION

This paper deals with the advanced method to diagnose a fault, a new method to estimate the fault location, the fault intensity. A damage of the rotating turborotor is considered a systemic fault. A fault arising in the control system is considered a systemic fault being a risky factor for human's security and reliability as to the function during the operation time. Not only owing to the humanity and economy, but even from the ecological point of view a very urgent diagnosis followed by a fault recovery is required. In rotating turborotors a special attention is to be paid to the system fault due to possible great damages.

Thanks to the computer capacity and thereby increased exploitation of computer monitoring it is possible to diagnose the fault simultaneously and visually at present. Non-linear observer formed by observer for estimating faults intensity enables to reconstruct the critical state values indirectly. We introduced a new method based upon observer exploitation used during on-line examination.

5. ZÁVER

Cieľom článku bolo na jednej strane diagnostikovať poruchu v zložitom systéme, na druhej strane určiť intenzitu nestability. Na poruchu v rotujúcom turborotore sa treba pozerať ako na systémovú poruchu. Táto porucha je rizikovým faktorom vzhľadom na bezpečnosť ľudí a spoločnosť pokial' ide o funkciu v prevádzke. Nielen z dôvodov humanity a ekonómie, ale aj z ekologických dôvodov je potrebné poruchu čo možno najskôr diagnostikovať a rýchlo odstrániť. V rotujúcich rotorov je potrebné venovať osobitnú pozornosť systémovej poruche vzhľadom na možné veľké škody.

Vďaka vyuvinutiu počítačovej kapacity a tým rastúceho využívania počítačového monitorovania je dnes možné systémovú poruchu vizuálne a nepretržite diagnostikovať. Predstavili sme novú metódu, ktorej podstata spočíva vo využívaní pozorovateľa. Táto metóda je základom nepretržitého pozorovania. Nelineárny pozorovateľ, ktorý je tvorený pozorovateľom na určenie rozsahu porúch, umožňuje nepriamo rekonštruovať kritické stavové veličiny.

REFERENCES / LITERATÚRA

- [1] Bathe, K.-J.: *Finite-Elemente-Methode*. Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [2] Imam I.; Scheibel, N., Azzaro, J.: *Development of an on-line Crack Detection and Monitoring System*. ASME, Design Technology Conference, Boston, 1987, p. 615-630.
- [3] Matlab, *Control System Toolbox, Simulink Toolbox*. The Math works Inc, 1996.
- [4] Modrák, V., Paško, J., Pavlenko, S.: *Alternative Solution for a Robotic Stereotactic System. Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2002. Kluwer Academic Publishers, Holand, Nr. 35 (2), p. 193-202, ISSN 0921-0296.
- [5] Paško, J., Seman, J.: *Design and Kinematic Ananlysis of the Robotic Stereotactic Device*. Transaction of the Universities of Košice. Research reports from the Universities of Košice. Košice. 3/2001, p. 53 – 57, ISSN 1335-2334.
- [6] Perduková, D - Fedor, P. – Timko, J.: *The multi-motor drive model for teaching in the motion and process control engineering*. Acta Electrotechnica et Informatica. Košice: Elfa 2/2002, pp. 19-25, ISSN 1335-8243
- [7] Perduková, D. – Fedor, P.: *Control of a Continuous Line with Incomplete Access to State Variables*. Journal of Electrical Engineering 48, 1996, No.1-2, pp.3-9, ISSN-0013-578X
- [8] Vokorokos L: *Diagnosis of mechanical machineries using the parallel computer system*. Monography. East-Slovak printers l.t.d. 2000. p. 152. ISBN 80-7099-619-6. (in Slovak)
- [9] Vokorokos, L: *Faults diagnosis of control system using the observer*, 4th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems 2000, Portorož Slovenia, September 17-19, 2000, pp. 189-192.

Supported by VEGA project No. 1/9027/02

Reviewal / Recenzia : prof. Ing. Ján Boroška, CSc.