

LOCALIZAÇÃO DE FALHAS VIA OBSERVADORES DE ESTADO ROBUSTOS – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Gilberto Pechoto de Melo

Universidade Estadual Paulista – Ilha Solteira S.P.– Cx. Postal 31 – Cep 15385-000

Email: gilberto@dem.feis.unesp.br

Robson Pederiva

Universidade. Estadual de Campinas – Campinas S.P. – Cx. Postal 6051 – Cep 13081-970

Email: robson@dpm.fem.unicamp.br

***Resumo.** Um dos fatores do grande interesse no desenvolvimento de novas técnicas de detecção de falhas é devido ao aumento da demanda da indústria em relação à segurança de seus sistemas, havendo a necessidade de uma supervisão e monitoramento para que estas falhas sejam sanadas o mais rapidamente possível e que os distúrbios em operação normal não causem uma deterioração da performance dos mesmos. Neste trabalho, desenvolveu-se uma metodologia para detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos utilizando observadores de estado de ordem reduzida. O método pode reconstruir os estados não medidos ou os valores provenientes de pontos de difícil acesso no sistema. Os parâmetros de interesse sujeitos a falhas são escolhidos, projetando-se um observador global otimizado para análise de todo o sistema considerando possíveis perturbações aleatórias na excitação e na resposta. São apresentados resultados experimentais da metodologia desenvolvida.*

***Palavras-Chave:** Observadores de Estado, Falhas, Identificação, Observação Robusta*

1. INTRODUÇÃO

Embora as ferramentas atuais para análise teórica dos sistemas dinâmicos sejam sofisticadas ao ponto de modelos complexos poderem ser simulados nos modernos computadores, existem grandes dificuldades na predição do comportamento dinâmico de certos componentes estruturais e no diagnóstico de falhas, seja pela inexatidão do modelo teórico ou mesmo pela dificuldade de medição de algumas variáveis do sistema.

Após revisão bibliográfica sobre metodologias de detecção e localização de falhas, verificou-se em Bhattacharayya (1995) e Aldeen & Trinh (1994) que os observadores de estado poderiam reconstruir os estados não medidos ou os valores provenientes de pontos de difícil acesso no sistema. Neste caso, poder-se-ia detectar falhas nestes pontos, podendo monitorá-las através das reconstruções de seus estados. As metodologias utilizando observadores de estado existentes são na sua maioria destinadas a resolver problemas de controle e detecção de possíveis falhas em sensores e instrumentos (Clark & Setzer, 1980), (Frank, 1990) e (Hou & Muller, 1995).

Há aproximadamente duas décadas que o problema de detecção de falhas tem sido estudado extensivamente na literatura, basicamente utilizando técnicas através de observadores de estado em sistemas de controle, e/ou métodos de estimação de parâmetros verificados em Luenberger (1971 e 1979) e Isermann (1995). Quanto à utilização destas metodologias utilizando modelos em sistemas de controle ou para detecção de falhas

em sensores e instrumentos, pode-se mencionar algumas mais utilizadas: observadores de Luenberger, observadores dedicados, detecção através de filtros, consistência de espaço, observadores robustos para entradas desconhecidas (Minamide *et al*, 1997). Em Huh & Stein (1994 e 1995), verificou-se que o desempenho do transiente e do regime permanente do observador pode tornar-se muito sensível a fatores como aparecimento de ruídos, alterações de alguns parâmetros físicos devido a possíveis falhas na máquina monitorada, erros de medidas e falhas em sensores. Este desempenho inconsistente do observador pode tornar toda a metodologia de projeto inadequada, resultando em um observador que pode comprometer toda a performance do sistema de monitoramento. Um observador de estado mal condicionado trabalha bem quando as condições são exatamente como as assumidas inicialmente (sem ruídos, modelo adequado, entradas conhecidas, etc.), mas trabalha muito precariamente quando isso não ocorre.

2. MÉTODO DOS OBSERVADORES DE ESTADO

Descrevem-se as características do observador de estado identidade e do observador de ordem reduzida, utilizado neste trabalho.

2.1. Observador Identidade

Para descrição do observador identidade, considera-se o seguinte sistema linear e invariante no tempo:

$$\{\dot{x}(t)\} = [A] \{x(t)\} + [B] \{u(t)\} \quad (2.1)$$

e

$$\{y(t)\} = [C_{me}] \{x(t)\} \quad (2.2)$$

Onde $[A] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ é a matriz dinâmica do sistema, $[B] \in \mathbb{R}^{n \times p}$ é a matriz de entradas e $[C_{me}] \in \mathbb{R}^{k \times n}$ a matriz de medidas, sendo n a ordem do sistema, p o número de entradas em $\{u(t)\}$, e k o número de saídas em $\{y(t)\}$. O sistema é assumido como totalmente observável. Um observador para este sistema é dado por:

$$\{\bar{\dot{x}}(t)\} = [A] \{\bar{x}(t)\} + [B] \{u(t)\} + [L] (\{y(t)\} - \{\bar{y}(t)\}) \quad (2.3)$$

$$\{\bar{y}(t)\} = [C_{me}] \{\bar{x}(t)\} \quad (2.4)$$

onde $[L]$ é a matriz do observador de estado. O erro de estimação de estado fica:

$$\{e(t)\} = \{\bar{x}(t)\} - \{x(t)\} \quad (2.5)$$

e o erro de estimação na saída (resíduo):

$$\{\varepsilon(t)\} = \{\bar{y}(t)\} - \{y(t)\} \quad (2.6)$$

2.2 Observador de Ordem Reduzida

Pode-se verificar que o observador identidade descrito anteriormente apresenta um certo grau de redundância. Ele reconstrói todas as n variáveis do sistema original, mesmo que

algumas delas já sejam conhecidas. O objetivo é construir um observador que tenha $(n - k)$ variáveis de estado, onde k é o número de medidas, (Ge & Fang, 1995).

Considera-se novamente o sistema totalmente observável apresentado pelas equações (2.1) e (2.2) assumindo-se que a matriz de medidas $[C_{me}]$ de ordem $(k \times n)$ tem posto k , correspondendo à condição de que k medidas sejam linearmente independentes.

Seja $[V]$ uma matriz de ordem $\{(n - k) \times (n)\}$, onde k é a dimensão de $\{y(t)\}$ e

$$\{\alpha(t)\} = \begin{bmatrix} [V] \\ [C_{me}] \end{bmatrix} \{x(t)\} \quad (2.7)$$

Este novo vetor de estado $\{\alpha(t)\}$ pode ser subdividido como:

$$\{\alpha(t)\} = \begin{bmatrix} \{w(t)\} \\ \{y(t)\} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Onde $\{w(t)\}$ é de dimensão $(n - k)$ e $\{y(t)\}$ é o vetor de saída com dimensão (k) . Após a transformação de variável, o sistema de matrizes pode ser reescrito como:

$$\begin{bmatrix} \{\dot{w}(t)\} \\ \{\dot{y}(t)\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{11}] & [A_{12}] \\ [A_{21}] & [A_{22}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{w(t)\} \\ \{y(t)\} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B]_1 \\ [B]_2 \end{bmatrix} \{u(t)\} \quad (2.9)$$

Pode-se extrair deste sistema, um subsistema de ordem $(n - k)$ que tem como entradas as quantidades conhecidas $\{u(t)\}$ e $\{y(t)\}$. Neste caso, um subsistema com características polinomiais arbitradas pode ser selecionado (Yao *et al*, 1996), multiplicando-se a parte inferior da equação (2.9) por uma matriz arbitrária $[E]$ de ordem $[(n - k) \times k]$ e subtraindo da parte superior:

$$\{\dot{w}(t)\} - [E] \{\dot{y}(t)\} = ([A_{11}] - [E] [A_{21}]) \{w(t)\} + ([A_{12}] - [E] [A_{22}]) \{y(t)\} + ([B]_1 - [E] [B]_2) \{u(t)\} \quad (2.10)$$

Chamando $\{g(t)\} = \{w(t)\} - [E] \{y(t)\}$, tem-se:

$$\{\dot{g}(t)\} = ([A_{11}] - [E] [A_{21}]) \{g(t)\} + ([A_{11}] [E] - [E] [A_{21}] [E] + [A_{12}] - [E] [A_{22}]) \{y(t)\} + ([B]_1 - [E] [B]_2) \{u(t)\} \quad (2.11)$$

Nesta equação $\{g(t)\}$ é desconhecido, enquanto $\{y(t)\}$ e $\{u(t)\}$ caracterizam as entradas conhecidas. O observador de estado de dimensão $(n - k)$ para a equação (2.9) é formado através da equação (2.11). Tem-se, portanto:

$$\begin{aligned} \{\bar{\dot{x}}(t)\} &= ([A_{11}] - [E] [A_{21}]) \{\bar{x}(t)\} + ([A_{11}] [E] - [E] [A_{21}] [E] \\ &\quad + [A_{12}] - [E] [A_{22}]) \{y(t)\} + ([B]_1 - [E] [B]_2) \{u(t)\} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Subtraindo a equação (2.11) de (2.12), tem-se:

$$\{\bar{\dot{x}}(t)\} - \{\dot{g}(t)\} = ([A_{11}] - [E] [A_{21}]) (\{\bar{x}(t)\} - \{g(t)\}) \quad (2.13)$$

O estado $\{\bar{x}(t)\}$ do observador tende a $\{g(t)\}$ na taxa determinada pelos autovalores da matriz $[[A_{11}] - [E] [A_{21}]]$.

A partir do vetor de estado $\{\bar{x}(t)\}$ do observador, o estado original da equação (2.12) é estimado por $\{\bar{w}(t)\}$ e $\{\bar{y}(t)\}$, determinados por:

$$\{\bar{w}(t)\} = \{\bar{x}(t)\} + [E] \{y(t)\} \quad (2.14)$$

$$\{\bar{y}(t)\} = \{y(t)\} \quad (2.15)$$

O vetor de estado $\{\bar{x}(t)\}$, juntamente com as medidas originais de $\{y(t)\}$ fornecem informações suficientes para construção de uma aproximação para o estado do sistema original.

2.3 Observador Robusto a um Determinado Parâmetro

Será apresentada uma seqüência de etapas através de um exemplo, utilizando-se o sistema mecânico de 2 graus de liberdade apresentado na Figura 2.1, que apresenta matrizes de massa $[M]$, rigidez $[K]$ e amortecimento $[C]$ fornecendo a seguinte matriz dinâmica:

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -(k_1 + k_2)/m_1 & k_2/m_1 & -(c_1 + c_2)/m_1 & c_2/m_1 \\ k_2/m_2 & -(k_2 + k_3)/m_2 & c_2/m_2 & -(c_2 + c_3)/m_2 \end{bmatrix}$$

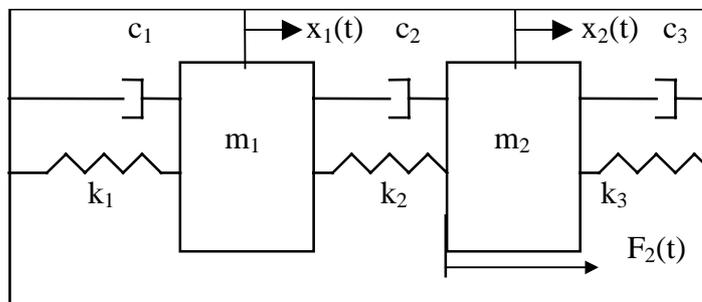


Figura 2.1 - Sistema de Dois Graus de Liberdade

Esta matriz dinâmica $[A]$ é utilizada no projeto do observador de estado global, que detecta possíveis falhas no sistema a ser analisado, sendo que no projeto dos observadores de estado robustos, exclui-se os parâmetros sujeitos a falhas da matriz dinâmica. Supondo-se que a rigidez k_1 possa falhar durante o processo, a matriz dinâmica $[A]$ utilizada para o projeto do observador robusto não conterá o parâmetro k_1 .

O observador de estado robusto a k_1 é projetado e otimizado através da matriz dinâmica $[A]$ sem o parâmetro k_1 . A matriz de medidas é $[C_{me}] = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$, medindo-se somente $x_1(t)$ e reconstruindo $x_2(t)$. Isto deve ser confirmado através do posto da matriz de observabilidade, que deve resultar em um valor igual a ordem do sistema. Se o observador de estado é de ordem reduzida, o posto deve resultar em um valor igual a ordem do sistema menos o número de medidas ($x_1(t)$ para o exemplo acima).

A seguir são calculados os autovalores da matriz dinâmica [A]. Os autovalores impostos no projeto dos observadores de estado devem estar à esquerda dos autovalores de [A], no plano complexo, para garantir estabilidade e rápida convergência. Pelas equações (2.3) e (2.4), verifica-se a necessidade do cálculo da matriz [L] do observador robusto ao parâmetro k_1 . O resultado final é um conjunto de equações diferenciais ordinárias.

Neste momento calcula-se o índice de performance, que analisa de forma quantitativa o condicionamento da matriz do observador $[[A] - [L][C_{me}]]$ para verificação da necessidade ou não da realização de um novo projeto.

Segundo Huh & Stein (1994 e 1995), o índice de performance mais adequado para esta análise é:

$$k_2[R] = \|R\|_2 \|R^{-1}\|_2 \quad (2.16)$$

onde [R] representa a matriz dos autovetores do observador $[[A] - [L][C_{me}]]$. Um observador de estado bem condicionado apresenta este índice próximo da unidade.

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi montado um sistema dinâmico de mesas vibratórias constituído de lâminas metálicas de aço inoxidável que fornecem a rigidez ao sistema; de placas de alumínio para construção das mesas e borracha (elastômero com características viscoelásticas) para simular amortecimento viscoso. Cada coluna de sustentação das mesas é composta por um conjunto de lâminas metálicas, para que se tenha condições de simular uma falha retirando do sistema uma ou mais lâminas. As borrachas são fixadas entre as lâminas.

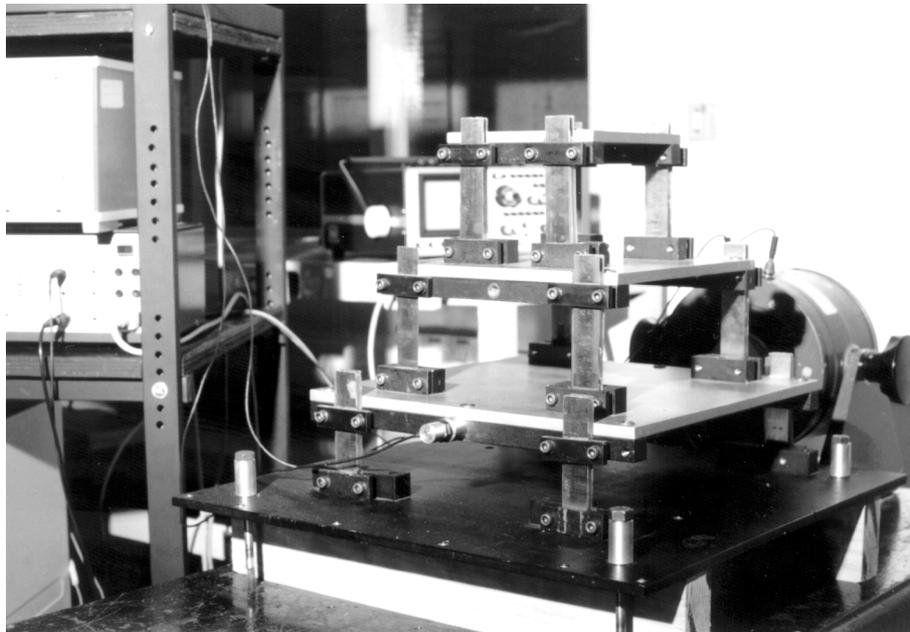


Figura 3.1 - Montagem Experimental: Mesa Vibratória

3.1 Modelo Matemático do Sistema com Mesas Vibratórias

Considera-se a montagem experimental da figura 3.1 como um sistema de 3 graus de liberdade, o primeiro bloco com massa m_1 representa a mesa vibratória inferior, o segundo bloco com massa m_2 representa a mesa intermediária e o terceiro bloco com massa m_3 a mesa superior. Na mesa inferior, k_1 representa a rigidez equivalente de 4 lâminas iguais. Na mesa intermediária a rigidez equivalente é composta por 4 lâminas distintas: k_2, k_3, k_4 e k_5 e na mesa superior: k_6, k_7, k_8 e k_9 . Na figura 3.2 é apresentado um esquema do modelo discretizado.

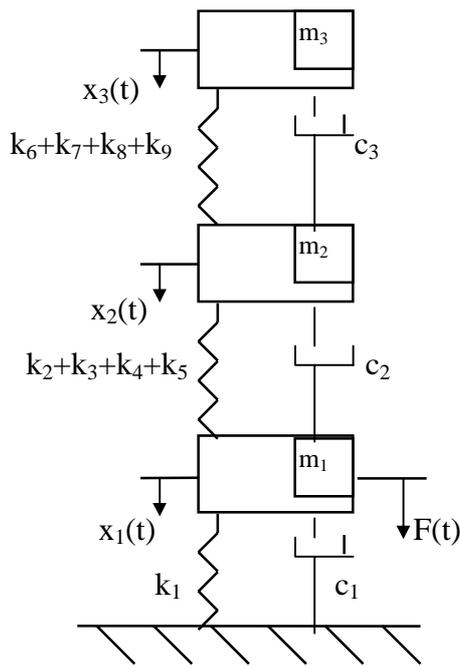


Figura 3.2 - Sistema com Mesas Vibratórias Discretizado

Na forma matricial tem-se a equação:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 & 0 \\ -c_2 & (c_2 + c_3) & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5) & -(k_2 + k_3 + k_4 + k_5) & 0 \\ -(k_2 + k_3 + k_4 + k_5) & k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7 + k_8 + k_9 & -(k_6 + k_7 + k_8 + k_9) \\ 0 & -(k_6 + k_7 + k_8 + k_9) & (k_6 + k_7 + k_8 + k_9) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F(t) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

3.2 Excitação Harmônica na Mesa Inferior

O sistema foi excitado harmonicamente na mesa inferior com um excitador eletrodinâmico na frequência de 40 Hz. Foram adquiridos 1024 pontos para o sinal do deslocamento (acelerômetro com integração) em um intervalo de tempo de 2 segundos. Os pontos adquiridos são provenientes da mesa inferior através da medida de deslocamento $x_1(t)$, pois os valores de $x_2(t)$ e $x_3(t)$ são reconstruídos através dos observadores de estado. A lâmina que continha a rigidez k_2 , conforme descrito no modelo, foi retirada do sistema para simular uma possível falha. Os valores obtidos estão na tabela 3.1 e são da diferença dos valores RMS das curvas do sistema real e dos observadores global e robustos aos parâmetros específicos.

Tabela 3.1 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Falha em k_2

	Real Sem Falhas	Real 0% de k_2
Observ.Global	.2910383E-09	.2190111E-03
Ob.Robusto a k_1	.3533785E-04	.6657710E-04
Ob.Robusto a k_2	.2809548E-03	.1746230E-09
Ob.Robusto a k_3	.2019266E-04	.6228294E-04
Ob.Robusto a k_4	.1285574E-03	.1183966E-03
Ob.Robusto a k_5	.6169471E-04	.1698421E-03
Ob.Robusto a k_6	.8342613E-04	.2345669E-03
Ob.Robusto a k_7	.9841548E-04	.2347751E-03
Ob.Robusto a c_1	.6083321E-03	.4502345E-03
Ob.Robusto a c_2	.7813076E-03	.9734002E-03

Na primeira linha com valores numéricos da tabela 3.1, verifica-se que a diferença dos valores RMS de $x_1(t)$ entre o observador global e o sistema real sem falhas é da ordem de 10^{-9} , caindo para 10^{-3} quando retirada a lâmina com rigidez k_2 (primeira região em negrito). Neste caso, consegue-se somente detectar que existe alguma falha no sistema, mas não se consegue localizar a mesma. Na segunda linha com valores numéricos, a diferença dos valores RMS de $x_1(t)$ entre o observador robusto a k_1 e o sistema real sem falhas é da ordem de 10^{-4} , permanecendo na mesma ordem de grandeza quando retirada a lâmina com rigidez k_2 (sistema real 0% k_2). A análise continua da mesma forma até a verificação de todos os parâmetros sujeitos a falhas. No caso específico, foi encontrado o parâmetro k_2 , onde a diferença dos valores RMS entre o observador robusto a k_2 e o sistema real sem falhas saiu da ordem de 10^{-3} para 10^{-9} , quando retirada a lâmina k_2 . Como não houve outro parâmetro com aproximação tão significativa das curvas, pode-se concluir que a possível falha do sistema está no parâmetro k_2 .

3.3 Excitação com Ruído Aleatório na Mesa Inferior

Neste caso, o sistema foi excitado somente com ruído aleatório na mesa inferior. Foram também adquiridos 1024 pontos para o sinal do deslocamento em um intervalo de tempo de 2 segundos. Os pontos adquiridos são novamente provenientes da mesa inferior $x_1(t)$. A lâmina que continha a rigidez k_3 , conforme descrito no modelo, foi retirada do sistema para simular uma possível falha. Através do programa automático de detecção e localização de falhas tem-se os valores da tabela 3.2, confirmando uma possível falha no parâmetro k_3 .

Tabela 3.2 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Falha em k_3

DIFERENÇA DOS VALORES RMS DE $x_1(t)$

	Real com falhas	Real 0% de k_3
Observ.Global	.4047251E-10	.2236477E-05
Ob.Robusto k_1	.5490023E-04	.4298223E-04
Ob.Robusto k_2	.2570034E-05	.6922164E-05
Ob.Robusto k_3	.2686380E-05	.4092726E-11
Ob.Robusto k_4	.1927166E-05	.6158930E-05
Ob.Robusto k_5	.2077245E-06	.1852046E-05
Ob.Robusto k_6	.1956719E-06	.2143865E-05
Ob.Robusto k_7	.3957630E-06	.2020251E-05
Ob.Robusto c_1	.7482971E-05	.7893141E-05
Ob.Robusto c_2	.8411296E-06	.7128020E-06

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, desenvolveu-se uma metodologia para detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos utilizando observadores de estado de ordem reduzida. O método pode reconstruir os estados não medidos ou os valores provenientes de pontos de difícil acesso no sistema. Escolhem-se os parâmetros de interesse sujeitos a falhas, projetando-se um observador global para análise de todo o sistema considerando possíveis ruídos aleatórios na excitação e na resposta. Projetam-se também observadores robustos a estes parâmetros de interesse, que localizam possíveis falhas ou irregularidades no sistema. Para os componentes que necessitem de um acompanhamento constante devido suas grandes solicitações ou falhas constantes, montam-se observadores com um sistema de alarmes que gera uma curva de tendências em um sistema automático para detecção e localização de falhas desenvolvido neste trabalho. Na análise experimental obteve-se bons resultados, podendo comprovar a metodologia desenvolvida.

REFERÊNCIAS

- Aldeen, M. & Trinh, H., 1994, Observing a subset of the states of linear systems, IEE Proc. control theory appl., vol.141, n.3, pp. 137-144.
- Bhattacharayya S. P., 1995, The structure of robust observers, IEEE Transactions of Automatic Control, vol.AC-21, pp. 581-588.
- Clark, R. N. & Setzer, W., 1980, Sensor fault detection in a system with random disturbances, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol.16, n^o.4, pp.468-473.
- Frank, P. M., 1990, Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey and some new results, Automatica, vol 26, n.3, pp. 459-474.
- Ge, W. & Fang, C. Z., 1988, Detection of faulty components via robust observation, International Journal of Control, vol.47, n.2, pp. 581-599.
- Hou, M. & Muller, P. C., 1995, Design of a class of Luenberger observers for descriptor systems, IEEE Transactions on Automatic Control, vol.40, n^o.1, pp 133-135.
- Huh, K. & Stein, J. L., 1995, Well-conditioned observer design for observer-based monitoring systems, Transactions of the Asme, vol. 117, pp 592-599.
- Huh, K. & Stein, J. L., 1994, A quantitative performance index for observer-based monitoring systems, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 116, pp 487-497.
- Isermann, R., 1995, Fault detection and diagnosis - Methods and applications, Proceedings of 2nd International Symposium of Acustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, Senlis (France), vol. 2, pp 777-792/5.
- Luenberger, d. G., 1971, An introduction to observers, IEEE Transactions on Automatic Control, vol ac16, n^o.6, pp. 596-602, 1971.
- Luenberger, d. G., 1979, Introduction to dynamic systems. Theory, Models, & Applications, New York, Chichester, Toronto, John Wiley & Sons, 445p.
- Minamide, N.; Fujisaki, Y. & Shimizu, A., 1997, A parametrization of all observers for descriptor systems, International Journal of Control, vol. 66, n.5, pp 767-777.
- Yao, Y. X.; Zhang, Y. M. & Kovacevic, R., 1996, Parameterisation of observers for time delay systems and its application in observer design, IEE Proc. Control Theory Appl., Vol. 143, n.3, pp 225-232.

FAULTS DETECTION USING ROBUST STATE OBSERVERS – EXPERIMENTAL RESULTS

Abstract. The development of new fault detection techniques is necessary because of increasing demands from industries on reliability and safety in mechanical systems. They must be supervised such that occurrence of failures can be accommodated as quickly as possible because they can cause an unacceptable deterioration of the systems performance. In this work, we have developed a methodology to detect and isolate faults in mechanical systems using reduced order state observers. We can monitor unmeasurable variables and the method selects the parameters from components that may fail during the process and constructs an optimized global observer to analyze all the system considering random noises in the excitation, in the response and sensor failure. To isolate component failures via robust observation, an automatic system with a set of detection observers is constructed, where each observer is only sensitive to one specified component failure while being robust to all other component failures.

Key Words

State Observers, Faults, Robust Observation