

Otimização de parâmetros aplicados no controle ativo de vibrações de sistemas mecânicos

Optimization of parameters applied in the active control of vibrations of mechanical systems

Atila de Carvalho Almeida
atila-almeida95@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Cássio Teruo Miyasaka
cassio_miyasaka@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Edson Hideki Koroishi
edsonh@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

RESUMO

O objetivo do presente trabalho baseou-se no estudo de controle ativo de vibrações de um sistema de 2 graus de liberdade utilizando atuadores eletromagnéticos, para encontrar uma boa relação entre a atenuação da resposta do sistema e a força de controle. A metodologia do trabalho se obteve com auxílio de programas computacionais, sendo possível caracterizar um sistema mecânico para analisar o seu comportamento vibracional e a sua estabilidade estrutural. Em seguida, realizou-se o estudo da otimização de parâmetros aplicados nesse controle ativo de vibrações, no qual visou-se uma relação ótima entre atenuação de vibrações e consumo de energia, sendo possível obter uma força de controle adequada com uma boa estabilização do sistema. Pode-se concluir que as ferramentas utilizadas e a metodologia proposta foram válidas.

PALAVRAS-CHAVE: Controle ativo de vibrações. Sistema mecânico. Atenuação de vibrações. Otimização de parâmetros.

ABSTRACT

The aim of the present work was based on the study of active vibration control of a system with 2 degrees of freedom by using electromagnetic actuators, for finding a good relation between the attenuation of the system response and the control force. The work methodology was obtained with the aid of computer programs, and it was possible to characterize a mechanical system to analyze its vibrational behavior and its structural stability, then the study of the optimization of the parameters applied in this active vibration control was carried out, which aimed at an optimum relation between vibration attenuation and energy consumption, being possible to obtain an adequate control force with a good stabilization of the system. It can be concluded that the tools used and methodology proposed were valid, since when the system response was privileged.

KEYWORDS: Active vibration control. Mechanical system. Vibration attenuation. Optimization of parameters.

Recebido: 13 nov. 2018.

Aprovado: 04 out. 2018.

Direito autorial:

Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a tecnologia está se desenvolvendo cada vez mais e, no mesmo ritmo, surge problemas cada vez mais complexos, tornando imprescindível a busca por soluções dos mesmos. As áreas de conhecimento da engenharia têm desenvolvido máquinas mais sofisticadas, componentes mecânicos, estruturas e, da mesma forma, metodologias mais refinadas às novas maneiras de reproduzir testes e análises. Porém, sistemas mecânicos estão expostos a efeitos de desgaste e fadiga causados pela vibração mecânica, que a curto prazo pode acarretar perdas das propriedades físicas e geométricas do sistema. Portanto, em muitos casos, é necessário o auxílio de dispositivos para atuar com o sistema, a fim de manter o desempenho determinado no projeto (OGATA, 2003).

O controle ativo de vibrações (AVC – do inglês *Active Vibration Control*) é um dos conhecimentos que tem apresentado grandes avanços em seu estudo no meio industrial, visto que, com essa técnica é possível aperfeiçoar sistemas dinâmicos, com intuito de minimizar os efeitos negativos (LIU e ZHANG, 2000).

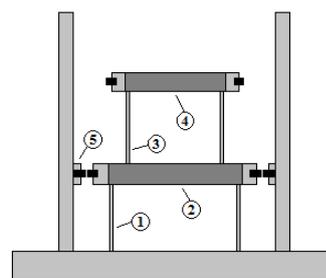
Este trabalho tem como propósito otimizar os parâmetros utilizado no controle ativo de vibrações visando obter uma configuração ótima que permita atenuar a resposta do sistema, de forma rápida e que consuma menos energia, a sua vibração mecânica através de um sistema de controle moderno. Este trabalho tem como desafio o aprofundamento no conhecimento de modelagem matemáticas e métodos de otimização de um sistema através do software de simulação Matlab®.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. SISTEMA MECÂNICO DE 2 GRAUS DE LIBERDADE

A Figura (1) apresenta o modelo esquemático do sistema mecânico de 2 gdl, sendo (1) os parâmetros k_1 e c_1 , (2) a massa m_1 , (3) os parâmetros de rigidez e amortecimento k_2 e c_2 , (4) a massa m_2 e (5) os atuadores eletromagnéticos.

Figura 1 – Modelo esquemático do sistema massa-mola-amortecedor com 2 gdl



Fonte: Autoria Própria.

A estrutura da bancada, a qual possui duas chapas de alumínio representando as massas, sustentada por hastes flexíveis (régua de aço inoxidável) correspondentes aos elementos de rigidez e amortecimento do sistema. As características dos corpos da bancada são mostradas no Quadro 1:

Quadro 1 – Características dos corpos da bancada

Parâmetros	Massa [kg]	Rigidez [N/m]	Amortecimento [N.s/m]
Mesa 1	4,38262	2,1506e+04	14,4314
Mesa 2	1,93959	1,4740e+04	3,1817e-08

Fonte: Adaptado de Repinaldo *et al.* (2018).

A equação de movimento do sistema é representada pela Eq. (1), obtida por meio das leis de Newton aplicadas a cada uma das massas para a obtenção do modelo dinâmico da estrutura.

$$[M]\{\ddot{d}(t)\} + [C_a]\{\dot{d}(t)\} + [K]\{d(t)\} = \{F_w(t)\} \quad (1)$$

As matrizes $[M]$, $[C_a]$ e $[K]$ são, respectivamente, as matrizes de massa, amortecimento e rigidez e estão representadas nas equações (2), (3) e (4).

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[C_a] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

O deslocamento e a força são descritos pelas equações (5) e (6), respectivamente.

$$\{x(t)\} = \begin{Bmatrix} d_1(t) \\ d_2(t) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\{F(t)\} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

2.2. ESPAÇO DE ESTADOS

O projeto dos controladores modernos tem como grande importância a modelagem por espaço de estados, já que os ganhos do controlador são calculados a partir das matrizes que regem o comportamento do sistema a ser controlado.

A representação do sistema físico de dois graus de liberdade no espaço dos estados é dada pela equação (7).

$$\begin{aligned} \{\dot{x}(t)\} &= [A]\{x(t)\} + [B_w]\{w(t)\} + [B_u]\{F_u(t)\} \\ \{y(t)\} &= [C]\{x(t)\} \end{aligned} \quad (7)$$

Onde $[A]$ é a matriz de estado, $[B_u]$ a matriz de entrada da força de controle, $[B_w]$ a matriz de entrada da força de excitação, $[C]$ a matriz de saída, $x(t)$ o vetor de estados de ordem $2nx1$, $y(t)$ o vetor de saída de ordem n_sx1 , $\{w(t)\}$ o vetor da força de excitação de ordem n_wx1 e $\{F_u(t)\}$ o vetor da força de excitação de ordem n_ux1 . No qual n é o número de graus de liberdade, n_s o número de saídas, n_u o número de entradas da força de controle e n_w o número de entradas da força de excitação.

Os vetores e matrizes da equação (7) são dados pelas equações (8) a (12).

$$\{x(t)\}_{2nx1} = \begin{Bmatrix} \{d(t)\}_{2nx1} \\ \{\dot{d}(t)\}_{2nx1} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$[A]_{2nx2n} = \begin{bmatrix} [0]_{nxn} & [I]_{nxn} \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C_a] \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[B_u]_{2nxn_u} = \begin{bmatrix} [0]_{nxn} & [P_u]_{nxn_u} \\ [M]^{-1}_{nxn} & [P_u]_{nxn_u} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[B_w]_{2nxn_w} = \begin{bmatrix} [0]_{nxn} & [P_w]_{nxn_w} \\ [M]^{-1}_{nxn} & [P_w]_{nxn_w} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[C]_{n_sxn} = [[P_s]_{n_sxn} [I]_{nxn} \quad [P_s]_{n_sxn} [0]_{nxn}] \quad (12)$$

Sendo $[P_u]$ a matriz de posicionamento da força de controle, $[P_w]$ a matriz de posicionamento da força de excitação e $[P_s]$ a matriz de posicionamento da saída.

3. ALGORITMO GENÉTICO

A fundamentação da técnica do Algoritmo Genético é inspirada na teoria de evolução das espécies de Darwin e na genética de populações, o processo de seleção natural dos indivíduos mais aptos à sobrevivência. Esses códigos genéticos compõem a identidade de cada indivíduo e estão representados nos cromossomos, sendo comum o uso dos termos: indivíduos de uma população, cromossomos, genes e alelos. Nos Algoritmos Genéticos, a população de indivíduos é um conjunto de pontos do domínio da função a ser maximizada ou minimizada. A quantidade de pontos depende do número de variáveis de projeto do problema em questão. Algoritmos Genéticos são algoritmos iterativos, em que a cada iteração a população é modificada, usando as melhores características dos elementos da geração anterior e submetendo-as aos três tipos básicos de operadores genéticos - reprodução, cruzamento e mutação – para produzir melhores resultados (GOLDBERG, 1989), acompanhando o princípio Darwiniano da luta pela vida. De modo geral, considere que se deseja otimizar uma função f qualquer de n variáveis.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores das constantes da Função de Compromisso apresentada pela equação (13) foram obtidos a partir da simulação numérica computacional no software Matlab®, através da otimização pelo Algoritmo Genético realizada para uma população de 50 indivíduos e o fator de mutação utilizado foi de 0,8 onde para os melhores valores foi realizado uma minimização das funções objetivo e para os piores valores uma maximização dessas mesmas funções. Os resultados se encontram no Quadro 2.

$$F(x) = \left\{ \left[\frac{W_1\{F_1(x) - F_1^{best}(x)\}}{F_1^{worst}(x) - F_1^{best}(x)} \right]^2 + \left[\frac{W_2\{F_2(x) - F_2^{best}(x)\}}{F_2^{worst}(x) - F_2^{best}(x)} \right]^2 \right\}^{0,5} \quad (13)$$

Quadro 2 – Valores das piores e melhores funções

Resposta do Sistema (F1)	Força de Controle (F2)
$F1_{best} = 2,3708e-09$	$F2_{best} = 0,1281$
$F1_{worst} = 3,6262e-04$	$F2_{worst} = 25,6517$

Fonte: Autoria própria.

A fim de analisar diferentes situações, foram atribuídos 9 casos considerando diferentes pesos W_1 e W_2 . O presente trabalho analisou um dos 9 casos, baseado no valor da maior função objetivo.

Com a ponderação de 40% para a função 1 e de 60% para a função 2, foi obtida a maior função objetiva dentre os 9 casos. Os resultados obtidos para as variáveis de projeto, encontram-se no Quadro 3.

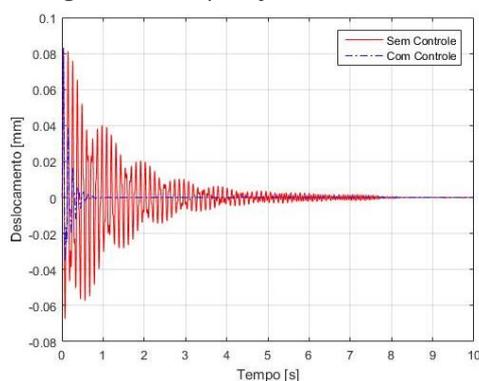
Quadro 3 – Valores das piores e melhores funções

Parâmetro	Valor
cc1	19,9649425
cc2	3,490763459
f1	0,00025505
f2	3,7341
FO	0,1023

Fonte: Autoria própria.

A comparação dos sistemas controlado e sem controle é apresentada na Figura 2.

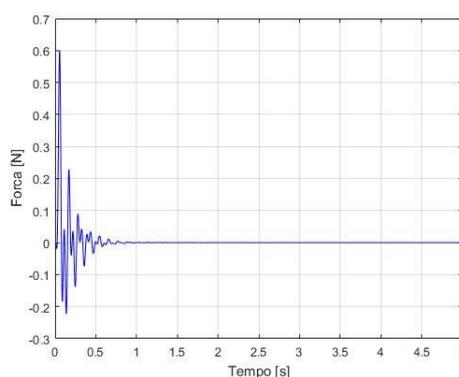
Figura 2 – Comparação do sistema



Fonte: Autoria própria (2018).

A força de controle resultante desta análise é apresentada pela Figura 3.

Figura 3 – Força de controle



Fonte: Autoria própria (2018).

Após a análise do caso, pode-se observar que o sistema foi controlado extremamente rápido, o qual foi representado pela linha azul nos gráficos.

No caso em questão, quando se privilegiava a segunda função, ou seja, se preocupava mais com a força necessária para o controle, pode-se observar que a atenuação foi mais lenta, porém a energia necessária neste caso também foi menor. Observou-se então que uma bancada de 2 graus de liberdade pode ser controlada por esses dois parâmetros aplicados no deslocamento e velocidade modal.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho, teve como objetivo otimizar parâmetros aplicados no controle ativo de vibrações em uma bancada de dois graus de liberdade. Esta otimização consistiu em encontrar uma configuração ótima do sistema de controle, resultando em um bom compromisso entre a força de controle e a atenuação no nível de vibração. Pode-se concluir que as ferramentas utilizadas e a metodologia proposta foram válidas visto que, mesmo considerando o caso que resultou na maior função objetivo, o controle foi eficiente.



REFERÊNCIAS

OGATA, K. Engenharia de controle moderno. 5. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2003.

LIU, F.; ZHANG, L. Modal-Space Control of Flexible Intelligent Truss Structures via Modal Filters. PROCEEDING OF IMAC - INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, p. 187-193, 2000.

REPINALDO, J. P.; SILVA, C. A. X.; SANTOS, W. F. ; KOROISHI, E. H. Identificação de Parâmetros e Controle de um Sistema de Dois Graus de Liberdade. In: X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador-BA, 2018.

GOLDBERG, D. E.. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison- Wesley., 1989.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus por nos sustentar e nos capacitar a elaborar este trabalho, e por nos enviar pessoas para nos ajudar na execução do mesmo, ao professor Edson Hideki Koroishi e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio pelo apoio para o desenvolvimento deste trabalho.