Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Roberta de Queiroz Lima

Modeling and simulation in nonlinear stochastic dynamics of coupled systems and impacts

TESE DE DOUTORADO

Thesis presented to the Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica of the Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio as partial fulfillment of the requirements for the degree of Doutor em Engenharia Mecânica.

Adviser: Prof. Rubens Sampaio
Co-Adviser: Prof. Christian Soize

Rio de Janeiro
May 2015

Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Roberta de Queiroz Lima

Modeling and simulation in nonlinear stochastic dynamics of coupled systems and impacts

Thesis presented to the Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica of the Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio, as partial fulfillment of the requirements for the degree of Doutor.

Prof. Rubens Sampaio
Adviser
Departamento de Engenharia Mecânica— PUC–Rio

Prof. Christian Soize
Co–Adviser
Laboratoire de Modélisation et Simulation Multi-Echelle
(MSME) — Université Paris-Est Marne-la-Vallée

Prof. Hans Ingo Weber
Departamento de Engenharia Mecânica — PUC–Rio

Prof. Fernando Alves Rochinha
Universidade Federal do Rio de Janeiro — UFRJ

Prof. Domingos Alves Rade
Universidade Federal de Uberlândia — UFU

Prof. Roger Ohayon
Conservatoire National des Arts et Métiers— CNAM

Prof. Thiago Gamboa Ritto
Universidade Federal do Rio de Janeiro — UFRJ

Prof. José Eugênio Leal
Coordinator of the Centro Técnico Científico da PUC–Rio

Rio de Janeiro, May 13th, 2015

Roberta de Queiroz Lima

Roberta Lima graduated as mechanical engineering in 2009 from PUC-Rio (Rio de Janeiro, RJ), and she got her master degree in 2011 from the same institution. This DSc. Thesis was a joint work between PUC-Rio and Université Paris-Est in a program of double diploma.

Bibliographic data

Lima, Roberta de Queiroz

Modeling and simulation in nonlinear stochastic dynamics of coupled systems and impacts / Roberta de Queiroz Lima; adviser: Rubens Sampaio; co–adviser: Christian Soize — 2015.

89 f. : il.; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Sistemas acoplados. 3. Sistema embarcado. 4. Vibro-impacto. 5. Análise estocástica. 6. Otimização robusta. 7. Dinâmica não linear. I. Sampaio, Rubens. II. Soize, Christian. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Acknowledgments

First I would like to thank my family for their incentive and support. Then, I would like to say thanks to my advisers Rubens Sampaio and Christian Soize for all dedication, attention and teaching. They were always available, full of ideas, and guided me throughout the period of the thesis. I learned a lot with them. I would also like to say thanks to the jury: Prof. Ohayon, Prof. Rade, Prof. Weber, Prof. Ritto and Prof. Rochinha. Also, I would like to say thanks to all the professors and friends of PUC-Rio and Paris-Est. Finally, I would like to thank the financial support of the Brazilian agencies FAPERJ, CNPq and CAPES (project CAPES-COFECUB 672/10) and of the universities PUC-Rio and Paris-Est.

Abstract

Lima, Roberta de Queiroz; Sampaio, Rubens and ; Soize, Christian. **Modeling and simulation in nonlinear stochastic dynamics of coupled systems and impacts**. Rio de Janeiro, 2015. 89p. PhD Thesis — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this Thesis, the robust design with an uncertain model of a vibro-impact electromechanical system is done. The electromechanical system is composed of a cart, whose motion is excited by a DC motor (motor with continuous current), and an embarked hammer into this cart. The hammer is connected to the cart by a nonlinear spring component and by a linear damper, so that a relative motion exists between them. A linear flexible barrier, placed outside of the cart, constrains the hammer movements. Due to the relative movement between the hammer and the barrier, impacts can occur between these two elements. The developed model of the system takes into account the influence of the DC motor in the dynamic behavior of the system. Some system parameters are uncertain, such as the stiffness and the damping coefficients of the flexible barrier. The objective of the Thesis is to perform an optimization of this electromechanical system with respect to design parameters in order to maximize the impact power under the constraint that the electric power consumed by the DC motor is lower than a maximum value. To chose the design parameters in the optimization problem, a sensitivity analysis was performed in order to define the most sensitive system parameters. The optimization is formulated in the framework of robust design due to the presence of uncertainties in the model. The probability distributions of random variables are constructed using the Maximum Entropy Principle and statistics of the stochastic response of the system are computed using the Monte Carlo method. The set of nonlinear equations are presented, and an adapted time domain solver is developed. The stochastic nonlinear constrained design optimization problem is solved for different levels of uncertainties, and also for the deterministic case. The results are different and this show the importance of the stochastic modeling.

Keywords

Coupled systems; Embarked system; Vibro-impact; Stochastic analysis; Robust design optimization; Nonlinear dynamics.

Résumé

Lima, Roberta de Queiroz; Sampaio, Rubens and ; Soize, Christian. **Modélisation et simulation en dynamique stochastique non linéaire des systèmes couplés avec phénomènes d'impact**. Rio de Janeiro, 2015. 89p. Thèse de Doctorat — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Dans cette Thèse, nous étudions l'optimisation robuste avec un modèle incertain d'un système électromécanique avec vibro-impact. Le système électromécanique est constitué d'un chariot dont le mouvement est généré par un moteur à courant continu, et d'un marteau embarqué dans ce chariot. Le marteau est relié au chariot par un ressort non linéaire et par un amortisseur linéaire, de façon qu'un mouvement relatif existe entre eux. Une barrière flexible linéaire, placée à l'extérieur du chariot limite les mouvements du marteau. En raison du mouvement relatif entre le marteau et la barrière, des impacts peuvent se produire entre ces deux éléments. Le modèle du système développé prend en compte l'influence du moteur à courant continu dans le comportement dynamique du système. Certains paramètres du système sont incertains, tels que les coefficients de rigidité et d'amortissement de la barrière flexible. L'objectif de la Thèse est de réaliser une optimisation de ce système électromécanique en jouant sur les paramètres de conception. Le but est de maximiser la puissance d'impact sous la contrainte que la puissance électrique consommée par le moteur à courant continu soit inférieure à une valeur maximale. Pour choisir les paramétres de conception dans le probléme d'optimisation, une analyse de sensibilité a été réalisée afin de définir les paramètres du système les plus sensibles. L'optimisation est formulée dans le cadre de la conception robuste en raison de la présence d'incertitudes dans le modèle. Les lois de probabilités des variables aléatoires du problème sont construites en utilisant le Principe du Maximum d'Entropie. Les statistiques de la réponse stochastique du système sont calculées en utilisant la méthode de Monte Carlo. L'ensemble des équations non linéaires est présenté, et un solveur temporel adapté est développé. Le problème d'optimisation non linéaire stochastique est résolu pour différents niveaux d'incertitudes, ainsi que pour le cas déterministe. Les résultats sont différents, ce qui montre l'importance de la modélisation stochastique.

Mots-clés

Systémes couplés; Système embarqué; Vibro-imapct; Analyse stochastique; Optimisation robuste; Dynamique non-linéaire.

Resumo

Lima, Roberta de Queiroz; Sampaio, Rubens and ; Soize, Christian. **Modelagem e simulação em dinâmica estocástica não-linear de sistemas acoplados e impactos**. Rio de Janeiro, 2015. 89p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nesta Tese, o design robusto, com um modelo incerto de um sistema de vibro-impacto eletromecânico é feito. O sistema é composto de um carrinho, cujo movimento é aciondo por um motor de corrente contínua e um martelo embarcado neste carrinho. O martelo é ligado ao carrinho por um mola não linear e por um amortecedor linear, de modo que existe um movimento relativo entre eles. Uma barreira linear flexível, colocada fora do carrinho, restringe aos movimentos do martelo. Devido ao movimento relativo entre o martelo e a barreira, impactos podem ocorrer entre estes dois elementos. O modelo metemático desenvolvido para sistema leva em conta a influência do motor no comportamento dinâmico do sistema. Alguns parâmetros do sistema são incertos, tais como a rigidez e os coeficientes de amortecimento da barreira flexível. O objectivo da Tese é realizar uma otimização deste sistema electromecânico com respeito a parâmetros de projeto, a fim de maximizar a potência de impacto sob a restrição de que a potência elétrica consumida pelo motor seja menor do que um valor máximo. Para escolher os parâmetros de projeto no problema de otimização, uma análise de sensibilidade foi realizada a fim de definir os parâmetros mais sensíveis do sistema. O problema de otimização é formulado no âmbito de otimização robusta, devido à presença de incertezas no modelo. As distribuições de probabilidades das variáveis aleatórias são construídas através do Princípio da Máxima Entropia e estatísticas da resposta estocástica do sistema são calculadas pelo método de Monte Carlo. O conjunto de equações não-lineares é apresentado, e um integrador temporal adaptado é desenvolvido. O problema de otimização não-linear estocástico com restrição é resolvido para diferentes níveis de incertezas e também para o caso determinístico. Os resultados são diferentes e isto mostra a importância da modelagem estocástica.

Palavras-chave

Sistemas acoplados; Sistema embarcado; Vibro-impacto; Análise estocástica; Otimização robusta; Dinâmica não linear.

Contents

List of Figures

List of Tables