

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM
VIỆN CƠ HỌC**

--o0o--

NGUYỄN NGỌC LINH

**PHÂN TÍCH DAO ĐỘNG NGẪU NHIÊN PHI TUYẾN
BẰNG PHƯƠNG PHÁP TUYẾN TÍNH HÓA
TƯƠNG ĐƯƠNG**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

HÀ NỘI – 2015

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM
VIỆN CƠ HỌC
--o0o--

NGUYỄN NGỌC LINH

PHÂN TÍCH DAO ĐỘNG NGẪU NHIÊN PHI TUYẾN
BẰNG PHƯƠNG PHÁP TUYẾN TÍNH HÓA
TƯƠNG ĐƯƠNG

Chuyên ngành: Cơ kỹ thuật

Mã số: 62 52 01 01

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

- 1. GS.TSKH Nguyễn Đông Anh**
- 2. TS Lưu Xuân Hùng**

HÀ NỘI – 2015

II

LỜI CẢM ƠN

Tôi xin chân thành cảm ơn các thầy hướng dẫn khoa học, đặc biệt là GS.TSKH. Nguyễn Đông Anh, đã tận tâm hướng dẫn khoa học, truyền niềm say mê nghiên cứu và giúp đỡ tôi hoàn thành luận án này.

Tôi xin bày tỏ sự cảm ơn tới Phòng Cơ học Công Trình, Khoa Đào tạo sau đại học và bạn bè, đồng nghiệp trong Viện Cơ học đã giúp đỡ tôi ngay từ những ngày đầu ở Viện Cơ học.

Tôi xin bày tỏ sự cảm ơn tới đơn vị công tác là Trường Cao đẳng Xây dựng số 1 đã ủng hộ, tạo điều kiện thuận lợi cho tôi trong quá trình làm nghiên cứu sinh.

Tôi cũng xin bày tỏ sự cảm ơn tới TS Lã Đức Việt, chủ nhiệm đề tài “Tối ưu hóa tham số các hệ tiêu tán hoặc tích trữ năng lượng trong điều khiển và giám sát kết cấu”, mã số 107.04-2011.14- Nafosted đã tạo điều kiện cho tôi được tham gia đề tài và có những hỗ trợ tài chính giúp ích cho quá trình làm nghiên cứu sinh.

Cuối cùng tôi xin bày tỏ sự biết ơn đến gia đình đã động viên ủng hộ tôi trong thời gian làm luận án.

III

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tác giả luận án

Nguyễn Ngọc Linh

MỤC LỤC

LỜI CẢM ƠN	II
LỜI CAM ĐOAN	III
MỤC LỤC	IV
DANH MỤC MỘT SỐ KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT	VI
DANH MỤC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ	VIII
DANH MỤC BẢNG VÀ SƠ ĐỒ KHỐI	IX
MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1. CƠ SỞ LÝ THUYẾT XÁC SUẤT VÀ MỘT SỐ PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH DAO ĐỘNG NGẪU NHIÊN PHI TUYẾN	4
1.1 Các khái niệm cơ bản về xác suất	4
1.1.1 Xác suất của sự kiện ngẫu nhiên	4
1.1.2. Biến ngẫu nhiên và các đặc trưng xác suất.....	5
1.2 Quá trình ngẫu nhiên	7
1.2.1 Các đặc trưng của quá trình ngẫu nhiên	8
1.2.2 Các quá trình ngẫu nhiên đặc biệt	12
1.3 Phương trình Fokker-Planck-Kolgomorov (FPK).....	16
1.4 Dao động ngẫu nhiên chịu kích động ồn trắng Gauss	17
1.4.1 Dao động ngẫu nhiên tuyến tính chịu kích động ồn trắng Gauss	19
1.4.2 Dao động ngẫu nhiên phi tuyến chịu kích động ồn trắng Gauss	20
1.5 Một số phương pháp xấp xỉ trong phân tích dao động ngẫu nhiên phi tuyến	22
1.5.1 Phương pháp nhiễu	22
1.5.2 Phương pháp trung bình hóa ngẫu nhiên	22
1.5.3 Phương pháp tuyến tính hóa tương đương ngẫu nhiên	23
1.5.4 Phương pháp phi tuyến hóa tương đương ngẫu nhiên	24
1.5.5 Phương pháp sử dụng hàm mật độ phổ	24
1.5.6 Phương pháp xấp xỉ cho phương trình FPK	25
1.5.7 Phương pháp mô phỏng số Monte Carlo	26
1.5.8 Nhận xét	26
Kết luận chương 1	28
CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP TUYẾN TÍNH HÓA TƯƠNG ĐƯƠNG NGẪU NHIÊN	29
2.1 Tiêu chuẩn kinh điển	33

2.2 Tiêu chuẩn cực tiểu sai số thể năng	35
2.3 Tiêu chuẩn tuyến tính hóa tương đương có điều chỉnh.....	35
2.4 Tuyến tính hóa tương đương dựa trên phân bố khác Gauss.....	37
2.5 Tiêu chuẩn tuyến tính hóa từng phần.....	38
Kết luận chương 2	39
CHƯƠNG 3. TIÊU CHUẨN ĐỐI NGẪU CỦA PHƯƠNG PHÁP TUYẾN TÍNH HÓA TƯƠNG ĐƯƠNG NGẪU NHIÊN	40
3.1. Ý tưởng cơ bản của tiêu chuẩn đối ngẫu có trọng số tổng quát	40
3.2. Tiêu chuẩn đối ngẫu	42
3.2.1 Khái niệm về tiêu chuẩn đối ngẫu.....	42
3.2.2 Mức độ phụ thuộc tuyến tính trong tiêu chuẩn đối ngẫu	44
3.2.3 Ý nghĩa hình học của tiêu chuẩn đối ngẫu.....	46
3.2.4 Áp dụng tiêu chuẩn đối ngẫu để phân tích mô men bậc hai của dao động ngẫu nhiên phi tuyến.....	50
3.3 Các ví dụ áp dụng của phương pháp tuyến tính hóa tương đương theo tiêu chuẩn đối ngẫu	52
3.3.1. Dao động Van der pol.....	52
3.3.2 Dao động có cản phi tuyến bậc ba.....	54
3.3.3 Dao động Duffing.....	55
3.3.4 Dao động có cản và đàn hồi phi tuyến	58
3.3.5 Dao động Lutes Sarkani.....	60
CHƯƠNG 4. TIÊU CHUẨN ĐỐI NGẪU CÓ TRỌNG SỐ CỦA PHƯƠNG PHÁP TUYẾN TÍNH HÓA TƯƠNG ĐƯƠNG NGẪU NHIÊN	66
4.1 Tiêu chuẩn đối ngẫu có trọng số	66
4.1.1 Khái niệm về tiêu chuẩn đối ngẫu có trọng số.....	66
4.1.2 Xác định dạng giải tích của trọng số	68
4.1.3 Một số tính chất khác của tiêu chuẩn đối ngẫu có trọng số được đề xuất	74
4.1.4 Áp dụng tiêu chuẩn đối ngẫu có trọng số để phân tích mô men bậc hai của dao động ngẫu nhiên phi tuyến.....	76
4.2 Các ví dụ áp dụng của phương pháp tuyến tính hóa tương đương theo tiêu chuẩn đối ngẫu có trọng số	78
4.2.1 Dao động đàn hồi phi tuyến không cản.....	78
4.2.2 Dao động đàn hồi phi tuyến theo qui luật mũ.....	80
4.2.3 Dao động đàn hồi phi tuyến bậc 3 và bậc 5	83
4.2.4 Dao động có cản phi tuyến phụ thuộc năng lượng	85

4.2.5 Dao động tự do	88
Kết luận chương 4	91
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	93
DANH SÁCH CÔNG TRÌNH ĐÃ ĐƯỢC CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN.....	95
TÀI LIỆU THAM KHẢO	96
PHỤ LỤC	103

DANH MỤC MỘT SỐ KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

A	véc tơ, hàm phi tuyến
$\mathbf{a}(\mathbf{x}, t)$	véc tơ hệ số dịch chuyển
α, β, c	hệ số hằng số
B	véc tơ, hàm tuyến tính tương đương
b, k	hệ số tuyến tính hóa tương đương
b_i, k_j	hệ số tuyến tính hóa thành phần thứ i , thứ j
b_{tt}, h	hệ số cản tuyến tính
C	hệ số chuẩn hóa
c_1, k_{tt}	hệ số độ cứng tuyến tính
c_3, c_5	hệ số độ cứng phi tuyến
$D_{xx}(t_1, t_2), D_{12}$	hiệp phương sai
$d_k(\mu)$	ti số các hệ số tuyến tính hóa theo các tiêu chuẩn đổi ngẫu có trọng số và kinh điển
$d_{S_{ts}}(\mu), d_{S_{kd}}(\mu)$	ti số không thứ nguyên của minS
$\delta(x)$	hàm Delta Dirac
$E\{\cdot\}, \langle \cdot \rangle$	kỳ vọng toán
$e(x, \dot{x})$	sai số phương trình
$F(x)$	hàm phân phối xác suất
FPK	phương trình Fokker-Planck-Kolgomorov
$f(t), u(t)$	kích động ngoài
$g(x, \dot{x})$	hàm phi tuyến của dịch chuyển và vận tốc
$H(x, \dot{x})$	hàm tổng năng lượng
$\mathbf{K}(\mathbf{x}, t)$	ma trận hệ số khuếch tán
$R(t_1, t_2)$	hàm tương quan
λ	hệ số trở về
m	khối lượng
m_x	trung bình xác suất
minS	giá trị cực tiểu của tiêu chuẩn tuyến tính hóa

VIII

μ	mức độ phụ thuộc tuyến tính
μ_n	mô men trung tâm
μ_{nm}	mô men liên kết trung tâm
$P\{\cdot\}$	xác suất của một sự kiện
$p, p(\mu)$	trọng số, hàm trọng số
$p(x), p(x, \dot{x})$	hàm mật độ xác suất một chiều, hai chiều
$p(x, t x_0, t_0)$	mật độ xác suất chuyển tiếp
r	hệ số tương quan
r^2	hệ số tương quan bình phương
S	biểu thức của sai số phương trình
$S_x(\omega)$	hàm mật độ phổ
S_0	mật độ phổ hằng số
T	chu kỳ dao động
t, t_0, t_1, t_2	thời gian
τ	độ trễ
$U(x)$	hàm thế năng
u, v	véc tơ
$v(t), \dot{x}(t)$	vận tốc
X, Y	biến ngẫu nhiên
$x(t)$	dịch chuyển
$\ddot{x}(t)$	gia tốc
θ	góc giữa hai véc tơ
$\xi(t)$	quá trình Wiener
$\dot{\xi}(t)$	quá trình ồn trắng
σ	cường độ của ồn trắng
σ_x	độ lệch chuẩn
σ_x^2	phương sai
ω	tần số của kích động
ω_0	tần số dao động tự do

DANH MỤC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

Hình 1.1 Hàm mật độ của tải trọng tác dụng lên dầm	6
Hình 1.2. Một tổng thể các hàm ngẫu nhiên theo thời gian (các hàm mẫu)	7
Hình 1.3 Hàm mật độ xác suất	8
Hình 1.4 Tương quan dương và tương quan âm	11
Hình 1.5 Hàm mật độ phổ và hàm tự tương quan của quá trình ồn trắng	14
Hình 1.6 Mô hình hệ cơ học một bậc tự do	17
Hình 2.1 Các cách tiếp cận chủ yếu của các phương pháp tuyến tính hóa và phi tuyến hóa tương đương ngẫu nhiên	31
Hình 3.1 Phép chiếu véc tơ của tiêu chuẩn đối ngẫu	49
Hình 3.2 Hàm thế năng dạng giếng đơn và giếng đôi	56
Hình 3.3 Mô hình hệ một bậc tự do chuyển động có ma sát	60
Hình 4.1 Mức độ phụ thuộc tuyến tính mạnh nhất và yếu nhất	68
Hình 4.2 Hàm nội suy tuyến tính $p(\mu)$	72
Hình 4.3 Đồ thị hàm tuyến tính từng đoạn $p(\mu)$	73
Hình 4.4 Tỉ số $d_k(\mu)$	75
Hình 4.5 Các tỉ số $d_{s_{ts}}(\mu), d_{s_{kd}}(\mu)$	76