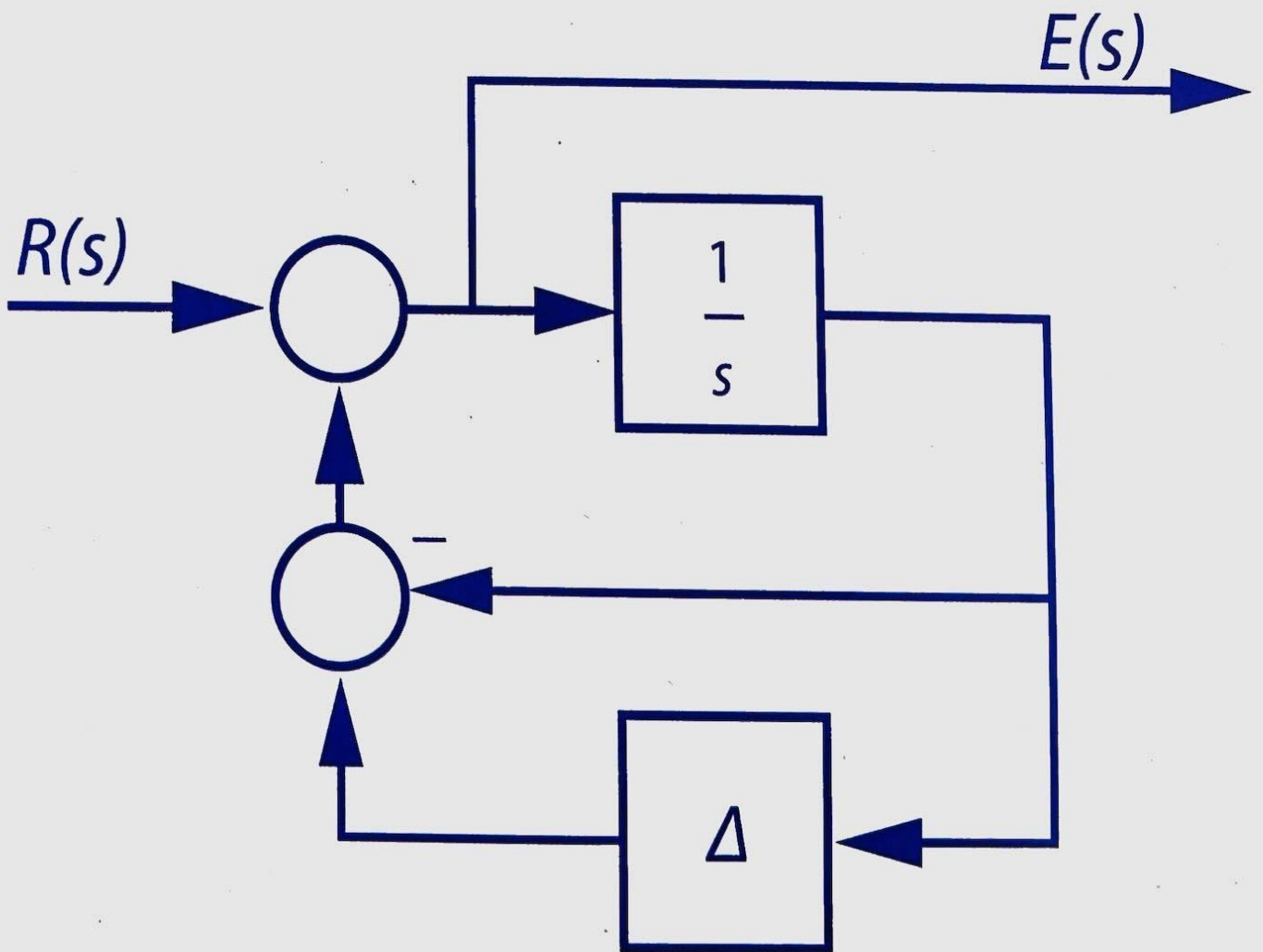


NGUYỄN DOÃN PHƯỚC

CƠ SỞ LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN TUYẾN TÍNH

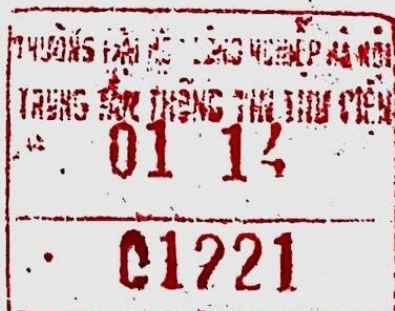


NHÀ XUẤT BẢN BÁCH KHOA HÀ NỘI

Nguyễn Doãn Phước



CƠ SỞ LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN TUYẾN TÍNH



NHÀ XUẤT BẢN BÁCH KHOA HÀ NỘI

Lời nói đầu

Lý thuyết điều khiển tuyến tính là phần nền tảng cơ bản và quan trọng nhất của Lý thuyết điều khiển nói chung. Rất nhiều các phát triển mới về khái niệm cũng như phương pháp của Điều khiển nâng cao như Ổn định đều, Ổn định theo hàm mũ, Ổn định ISS, Điều khiển tuyến tính hóa chính xác, Điều khiển thích nghi kháng nhiễu ... đều có được sự gợi ý về tư tưởng từ Lý thuyết điều khiển tuyến tính. Nắm vững và làm chủ lý thuyết điều khiển tuyến tính sẽ giúp ta có được một kiến thức cơ bản chắc chắn để tự tin tiến sâu hơn vào các lĩnh vực khác của Điều khiển.

Cuốn sách "Cơ sở lý thuyết Điều khiển tuyến tính" này được viết ra từ các bài giảng trong nhiều năm của tác giả tại trường Đại học Bách khoa Hà Nội về Lý thuyết điều khiển tự động I và II. Cuốn sách được bố cục theo đúng trình tự như đề cương môn học của Trường Đại học Bách khoa Hà Nội với việc phân chia các chương theo chủ đề từng dạng mô hình mô tả hệ thống được sử dụng. Cụ thể là:

- Chương 1 được dành cho phân nhập môn điều khiển tuyến tính, giới thiệu các bước cơ bản cần phải thực hiện khi phải giải quyết một bài toán điều khiển;
- Chương 2 trình bày các bước thực hiện bài toán điều khiển khi mô hình toán học của đối tượng là mô hình trong miền phức (miền tần số);
- Chương 3 là nội dung các bước thực hiện bài toán điều khiển ứng với mô hình trạng thái của đối tượng (điều khiển trong không gian trạng thái);
- Chương 4 là nội dung từng bước thực hiện bài toán điều khiển khi đối tượng có mô hình không liên tục, được xem như phân nhập môn của điều khiển số;

trong đó, từng chương 2, 3 và 4 được trình bày theo đúng thứ tự thực hiện các bước một bài toán điều khiển, như: 1. Công cụ toán học cần thiết; 2. Xây dựng mô hình mô tả đối tượng; 3. Phân tích đối tượng; 4. Thiết kế bộ điều khiển.

Bên cạnh đó, so với đề cương môn học, trong cuốn sách này tác giả còn đưa thêm một số nội dung được cho là cần thiết của điều khiển nâng cao, nhưng có liên quan đến mô hình tuyến tính của đối tượng, bao gồm:

- Phân tích tính bền vững của hệ tuyến tính có mô hình toán học của đối tượng là hàm truyền;
- Thuật toán thiết kế bộ điều khiển theo mô hình mẫu;
- Phương pháp tham số hóa Youla, phương pháp thiết kế bộ điều khiển ổn định mạnh và ổn định song hành để điều khiển ổn định bền vững đối tượng tuyến tính (nguyên lý điều khiển đa mô hình);

- Thiết kế bộ điều khiển tuyến tính theo nguyên lý bám tín hiệu mẫu (tracking control);
- Thiết kế bộ điều khiển tối ưu tuyến tính cho bài toán LQ;
- Thiết kế bộ điều khiển thích nghi bù bất định cho đối tượng tuyến tính;
- Thiết kế bộ lọc Kalman.

Các phần được bổ sung thêm này sẽ giúp ích cho sinh viên, học viên cao học và nghiên cứu sinh thuộc ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa có thể tự tìm hiểu và nâng cao thêm về Lý thuyết cơ bản của Điều khiển tuyến tính.

Cuối cùng, cuốn sách đã được viết với sự giúp đỡ, chia sẻ rất to lớn của những thành viên trong gia đình tác giả là vợ Ngô Kim Thư, con gái Nguyễn Phước My và hai cháu ngoại Bông, Bo. Không có họ chắc chắn cuốn sách không thể được hoàn thành. Cuốn sách còn được hoàn thành nhờ sự cố vũ, khuyến khích và tạo điều kiện thuận lợi của các đồng nghiệp trong Bộ môn Điều khiển Tự động, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, nơi tác giả đang công tác. Tác giả xin được gửi tới gia đình và các bạn lời cảm ơn chân thành.

Mặc dù tác giả đã rất nỗ lực, song không thể không có thiếu sót. Do đó tác giả rất mong nhận được những góp ý sửa đổi, bổ sung thêm của bạn đọc để nội dung cuốn sách được hoàn thiện hơn. Thư góp ý xin gửi về:

**Trường Đại học Bách khoa Hà Nội
Viện Điện, Bộ môn Điều khiển Tự động**

phuoc.nguyendoan@hust.edu.vn

Tác giả

Mục lục

1	Nhập môn	11
1.1	Nội dung bài toán điều khiển	11
1.1.1	Bài toán có tín hiệu tiên định (Điều khiển tiên định).....	14
	Khái niệm tín hiệu	14
	Phân loại tín hiệu tiên định	15
	Một số tín hiệu tiên định điển hình	17
	Chuẩn của tín hiệu (hay hàm số).....	19
1.1.2	Bài toán có tín hiệu ngẫu nhiên (Điều khiển ngẫu nhiên).....	21
	Khái niệm quá trình ngẫu nhiên.....	21
	Quá trình ngẫu nhiên dừng và ngẫu nhiên egodic.....	22
1.2	Những cấu trúc cơ bản của hệ thống điều khiển	23
1.2.1	Phân loại hệ thống	23
1.2.2	Xác định tín hiệu điều khiển thích hợp	24
1.2.3	Sử dụng bộ điều khiển	25
	Điều khiển hở.....	25
	Điều khiển phản hồi trạng thái.....	26
	Điều khiển phản hồi tín hiệu ra.....	26
	Câu hỏi ôn tập và bài tập	27
2	Điều khiển liên tục trong miền phức	29
2.1	Các công cụ toán học	29
2.1.1	Lý thuyết hàm biến phức.....	29
	Định nghĩa, khái niệm hàm liên tục, hàm giải tích	29
	Tích phân phức và nguyên lý cực đại modulus.....	30
	Hàm bảo giác (conform)	32
2.1.2	Chuỗi Fourier và phép biến đổi Fourier	34
	Chuỗi Fourier (cho tín hiệu tuần hoàn).....	34
	Phép biến đổi Fourier	38
2.1.3	Phép biến đổi Laplace.....	46
	Phép biến đổi Laplace cho tín hiệu liên tục.....	46
	Phép biến đổi Laplace cho tín hiệu không liên tục (biến đổi Z).....	48
2.1.4	Phép biến đổi Laplace ngược.....	49
	Biến đổi ngược hàm hữu tỷ	49
	Phương pháp residue.....	52
2.1.5	Một ứng dụng của phép biến đổi Laplace: Giải phương trình vi phân	55
2.2	Xây dựng mô hình toán học	57
2.2.1	Phương trình vi phân mô tả quan hệ vào – ra.....	60

2.2.2	Hàm truyền, hàm trọng lượng và hàm quá độ.....	63
2.2.3	Phép biến đổi sơ đồ khối (đại số sơ đồ khối)	71
	Hai khối song song	71
	Hai khối nối tiếp	72
	Hệ có hai khối nối hồi tiếp.....	72
	Chuyển nút nối tín hiệu từ trước ra sau một khối	73
	Chuyển nút nối tín hiệu từ sau tới trước một khối	73
	Chuyển nút rẽ nhánh tín hiệu từ trước ra sau một khối.....	74
	Chuyển nút rẽ nhánh tín hiệu từ sau tới trước một khối	74
	Chuyển nút rẽ nhánh từ trước ra sau một nút nối	74
	Chuyển nút rẽ nhánh từ sau tới trước một nút nối	75
2.2.4	Sơ đồ tín hiệu và công thức Mason.....	77
2.2.5	Đồ thị đặc tính tần biên – pha	83
	Khái niệm hàm đặc tính tần	83
	Xây dựng hàm đặc tính tần bằng thực nghiệm	85
	Đồ thị đặc tính tần biên – pha	86
2.2.6	Đồ thị đặc tính tần logarith. Đồ thị Bode	90
2.2.7	Quan hệ giữa phần thực và ảo của hàm đặc tính tần. Toán tử Hilbert	96
	Bài toán thứ nhất: Xác định hàm truyền từ phần thực hàm đặc tính tần.....	97
	Bài toán thứ hai: Xác định hàm truyền từ phần ảo hàm đặc tính tần.....	99
	Toán tử Hilbert: Trường hợp tổng quát.....	100
2.2.8	Xây dựng mô hình toán học của các khâu động học cơ bản bằng thực nghiệm chủ động	102
	Khâu quán tính bậc nhất.....	103
	Khâu tích phân – quán tính bậc nhất	104
	Khâu tích phân – quán tính bậc n	105
	Khâu quán tính bậc hai	107
	Khâu quán tính bậc cao	109
	Khâu (bù) Lead/Lag	111
	Khâu dao động bậc hai.....	114
	Khâu chậm trễ (khâu trễ)	115
2.2.9	Ma trận hàm truyền cho hệ MIMO	117
2.3	Phân tích hệ thống	118
2.3.1	Những nhiệm vụ cơ bản của công việc phân tích	118
2.3.2	Xác định tính ổn định từ đa thức đặc tính	120
	Mối liên hệ giữa vị trí các điểm cực và tính ổn định của hệ thống	120
	Tiêu chuẩn đại số thứ nhất: Tiêu chuẩn Routh.....	122
	Tiêu chuẩn đại số thứ hai: Tiêu chuẩn Hurwitz	127
	Tiêu chuẩn đại số thứ ba: Tiêu chuẩn Lienard–Chipart.....	129
	Tiêu chuẩn hình học: Tiêu chuẩn Michailov	131
2.3.3	Phân tích chất lượng hệ kín từ hàm truyền của hệ hở.....	134
	Xét tính ổn định: Tiêu chuẩn Nyquist.....	134
	Kiểm tra tính ổn định hệ kín nhờ biểu đồ Bode.....	140
	Đánh giá sai lệch tĩnh	142
	Thông số đặc trưng của quá trình quá độ: Độ quá điều chỉnh và thời gian quá độ....	144
	Thông số đặc trưng của quá trình quá độ: Sai lệch bám.....	147

2.3.4	Quan hệ giữa chất lượng hệ thống với vị trí điểm cực và điểm không của hàm truyền	150
	Một số kết luận chung.....	150
	Điều kiện tồn tại độ quá điều chỉnh	151
	Khâu thông tần và hệ pha cực tiểu	154
	Phân tích bằng phương pháp quỹ đạo nghiệm số.....	156
2.3.5	Phân tích tính bền vững.....	161
	Đánh giá chất lượng bền vững nhờ hàm nhạy.....	162
	Đánh giá tính ổn định bền vững với sai lệch mô hình không có cấu trúc	163
	Hệ vừa có tính ổn định bền vững vừa có độ nhạy nhỏ	164
	Tính ổn định bền vững của hệ bất định có cấu trúc: Tiêu chuẩn Kharitonov	165
	Bài toán mở.....	169
2.4	Thiết kế bộ điều khiển	170
2.4.1	Chọn tham số cho bộ điều khiển PID	170
	Hai phương pháp xác định tham số PID của Ziegler–Nichols	172
	Phương pháp Chien–Hrones–Reswick.....	174
	Phương pháp tổng T của Kuhn.....	176
	Phương pháp tối ưu độ lớn.....	177
	Phương pháp tối ưu đối xứng.....	183
	Chọn tham số PID tối ưu theo sai lệch bám	191
2.4.2	Phương pháp điều khiển cân bằng mô hình	193
	Thiết kế bộ điều khiển cân bằng hàm truyền của hệ hở (loop shaping)	193
	Thiết kế bộ điều khiển cân bằng hàm truyền của hệ kín.....	196
	Điều khiển theo nguyên lý mô hình nội (IMC)	199
	Thiết kế bộ điều khiển dự báo Smith cho đối tượng có trễ	201
2.4.3	Thiết kế bộ điều khiển theo mô hình mẫu.....	202
	Thuật toán tìm nghiệm phương trình Euclid.....	204
	Thuật toán thiết kế hai bộ điều khiển theo mô hình mẫu	205
2.4.4	Tập các bộ điều khiển làm ổn định đối tượng và khái niệm ổn định mạnh, ổn định song hành.....	207
	Một số khái niệm cơ bản.....	207
	Nội dung phương pháp tham số hóa Youla	208
	Khả năng điều khiển ổn định mạnh (strongly stable)	212
	Bộ điều khiển ổn định song hành (simultane stable).....	213
2.4.5	Điều khiển tách kênh.....	216
	Tách kênh trong toàn bộ miền thời gian	216
	Tách kênh trong chế độ xác lập	217
	Câu hỏi ôn tập và bài tập	218
3	Điều khiển liên tục trong miền thời gian	229
3.1	Công cụ toán học	229
3.1.1	Những cấu trúc đại số cơ bản	229
	Nhóm	229
	Vành.....	230
	Trường.....	230
	Không gian vector.....	231
	Không gian vector con.....	232

Đa tạp tuyến tính.....	233
Đại số.....	233
Ideale.....	233
3.1.2 Đại số ma trận.....	234
Các phép tính với ma trận.....	235
Định thức của ma trận.....	236
Hạng của ma trận.....	238
Ma trận nghịch đảo.....	238
Vết của ma trận.....	239
Ma trận là một ánh xạ tuyến tính.....	240
Phép biến đổi tương đương.....	240
Không gian nhân và không gian ảnh của ma trận.....	241
Giá trị riêng và vector riêng.....	242
Chuẩn của vector và ma trận.....	244
Ma trận có các phần tử phụ thuộc thời gian.....	245
3.2 Xây dựng mô hình toán học.....	245
3.2.1 Phương trình trạng thái.....	245
Cấu trúc chung.....	245
Quan hệ giữa mô hình trạng thái và hàm truyền.....	249
3.2.2 Quỹ đạo trạng thái.....	255
Ma trận hàm mũ và cách xác định.....	256
Nghiệm của phương trình trạng thái có tham số không phụ thuộc thời gian.....	262
Nghiệm của phương trình trạng thái phụ thuộc thời gian.....	264
Quá trình cưỡng bức và quá trình tự do.....	266
3.3 Phân tích hệ thống.....	267
3.3.1 Những nhiệm vụ cơ bản của công việc phân tích.....	267
3.3.2 Phân tích tính ổn định.....	268
Phân tích tính ổn định BIBO.....	268
Tiêu chuẩn ổn định Lyapunov– Hàm Lyapunov.....	271
3.3.3 Phân tích tính điều khiển được.....	276
Khái niệm điều khiển được và điều khiển được hoàn toàn.....	276
Các tiêu chuẩn xét tính điều khiển được cho hệ tham số hằng.....	280
Tiêu chuẩn xét tính điều khiển được cho hệ tham số phụ thuộc thời gian.....	284
3.3.4 Phân tích tính quan sát được.....	289
Khái niệm quan sát được và quan sát được hoàn toàn.....	289
Một số kết luận chung về tính quan sát được của hệ tuyến tính.....	290
Tính đối ngẫu và các tiêu chuẩn xét tính quan sát được của hệ tham số hằng.....	293
3.3.5 Phân tích tính động học không.....	295
3.4 Thiết kế bộ điều khiển.....	297
3.4.1 Bộ điều khiển phản hồi trạng thái gián tiếp.....	297
Đặt vấn đề và phát biểu bài toán.....	297
Phương pháp Ackermann.....	298
Phương pháp Roppenecker.....	304
Phương pháp modal phản hồi trạng thái.....	308

3.4.2	Điều khiển tách kênh.....	317
	Bộ điều khiển phản hồi trạng thái tách kênh Falb–Wolovich	317
	Bộ điều khiển tách kênh Smith–McMillan.....	321
3.4.3	Điều khiển phản hồi trạng thái tối ưu	324
	Điều kiện cần và các bước tổng hợp bộ điều khiển tối ưu	324
	Bàn về tính ổn định của hệ kín tối ưu và bài toán mở.....	330
	Phương pháp tìm nghiệm phương trình Riccati.....	332
3.4.4	Điều khiển bám (tracking control) bằng phản hồi trạng thái	334
3.4.5	Điều khiển phản hồi trạng thái thích nghi.....	337
	Trường hợp đối tượng đã có chất lượng mong muốn khi không có nhiễu	338
	Trường hợp tổng quát	340
3.4.6	Điều khiển phản hồi tín hiệu ra	341
	Đặt vấn đề.....	341
	Bộ quan sát Luenberger	344
	Giảm bậc bộ quan sát Luenberger	346
	Bộ quan sát Kalman	347
	Thiết kế bộ điều khiển tối ưu phản hồi đầu ra LQG.....	350
	Kết luận về chất lượng hệ kín: Nguyên lý tách	351
	Điều khiển kháng nhiễu bằng phản hồi đầu ra.....	355
3.4.7	Loại bỏ sai lệch tĩnh bằng bộ tiền xử lý	356
3.4.8	Hiện tượng tạo đỉnh (peak) và bài toán chọn điểm cực.....	359
	Câu hỏi ôn tập và bài tập	364
4	Điều khiển hệ không liên tục	371
4.1	Tín hiệu và công cụ toán học	371
4.1.1	Tín hiệu không liên tục đều	371
	Mô tả quá trình trích mẫu.....	371
	Dãy số, tính hội tụ và giá trị giới hạn.....	372
4.1.2	Công cụ toán học.....	374
	Phép biến đổi Fourier rời rạc (DFT).....	374
	Phép biến đổi Z thuận.....	377
	Phép biến đổi Z ngược.....	380
	Chuỗi và tính hội tụ của chuỗi	383
4.1.3	Phép biến đổi \mathcal{Z}	384
4.2	Xây dựng mô hình toán học	386
4.2.1	Khái niệm hệ không liên tục.....	386
4.2.2	Phương trình sai phân, hàm trọng lượng và hàm truyền	387
	Phương trình sai phân.....	387
	Dãy giá trị hàm trọng lượng (hàm trọng lượng).....	390
	Hàm truyền	390
	Một số kết luận chung.....	393
4.2.3	Mô hình trạng thái	394
	Xác định mô hình trạng thái từ phương trình sai phân.....	394
	Xác định mô hình trạng thái từ hàm truyền.....	396
	Xác định mô hình trạng thái hệ không liên tục từ mô hình trạng thái hệ liên tục.....	396

Xác định hàm truyền từ mô hình trạng thái.....	398
Xác định hàm trọng lượng từ mô hình trạng thái.....	399
4.2.4 Đại số sơ đồ khối hệ không liên tục	399
Hai khối nối tiếp	400
Hai khối song song	400
Hệ hồi tiếp.....	400
4.3 Phân tích hệ không liên tục	404
4.3.1 Phân tích tính ổn định.....	404
Quá trình tự do, điều kiện cần và đủ để hệ ổn định.....	404
Tiêu chuẩn Schur–Cohn–Jury	407
Sử dụng các tiêu chuẩn xét tính ổn định hệ liên tục.....	410
Tiêu chuẩn Nyquist.....	413
4.3.2 Tính điều khiển được và quan sát được	415
Phân tích tính điều khiển được.....	415
Phân tích tính quan sát được	417
4.3.3 Chu kỳ trích mẫu và chất lượng hệ thống.....	421
Hiện tượng trùng phổ	421
Chọn chu kỳ trích mẫu để đồng nhất điểm cực	422
Quan hệ giữa chu kỳ trích mẫu và tính điều khiển được, quan sát được.....	422
Quan hệ giữa chu kỳ trích mẫu và tính ổn định	423
4.4 Thiết kế bộ điều khiển	424
4.4.1 Chọn tham số cho bộ điều khiển PID số.....	424
Cấu trúc bộ điều khiển PID số	424
Xác định tham số cho PID số bằng thực nghiệm	425
4.4.2 Các phương pháp thiết kế trong miền tần số	427
Sử dụng ánh xạ lưỡng tuyến tính để thiết kế bộ điều khiển.....	427
Thiết kế bộ điều khiển không liên tục theo mô hình mẫu	430
Thiết kế bộ điều khiển dead–beat.....	431
4.4.3 Các phương pháp thiết kế trong miền thời gian	435
Điều khiển phản hồi trạng thái gán điểm cực	435
Bộ quan sát trạng thái tiệm cận và kỹ thuật giảm bậc bộ quan sát.....	435
Thiết kế bộ lọc Kalman (quan sát trạng thái Kalman)	437
Điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách	440
Thiết kế bộ điều khiển dead–beat.....	441
4.4.4 Nhập môn điều khiển dự báo	443
Nguyên tắc chung của điều khiển dự báo (MPC–model predictive control).....	443
Điều khiển dự báo hệ SISO trong miền phức	443
Điều khiển dự báo hệ MIMO trong không gian trạng thái.....	446
Câu hỏi ôn tập và bài tập	447
Phụ lục: Ảnh Laplace và ảnh Z của một số tín hiệu cơ bản	451
Tài liệu tham khảo	452
Chỉ mục	453