

Reguleringsteknikk

**Jens G. Balchen
Trond Andresen
Bjarne A. Foss**

1. utgave

TAPIR

1999

© TAPIR FORLAG, TRONDHEIM 1999

ISBN 82-519-1338-1

Det må ikke kopieres fra denne boka ut over det som er tillatt etter bestemmelser i "Lov om opphavsrett til åndsverk", og avtaler om kopiering inngått med Kopinor.

Trykk: Wennbergs Trykkeri A.s

Bind: Sandnes Bokbinderi A/S

Omslag ved Kari Fagerberg

*Tapir forlag
7005 TRONDHEIM*

Tlf.: 73 59 32 10

Faks: 73 59 32 04

E-post: tapir.forlag@tapir.ntnu.no

<http://www.tapir.ntnu.no>

Innhold

Forord	1
KAPITTEL 1	
Introduksjon til reguleringsteknikk	7
1.1 Innledning	7
1.2 Reguleringsteknikkens historie	9
1.3 Vesentlige begreper og definisjoner	11
1.4 To metoder til regulering av en teknisk prosess	15
1.5 Reguleringstekniske anvendelser	18
1.5.1 Styring og regulering av maskiner	18
1.5.2 Styring av fartøyer	19
1.5.3 Industriell prosessregulering	20
1.5.4 Regulering i energisystemer	22
1.5.5 Styring og regulering i fiskeriteknologi	23
1.5.6 Regulering i ikke-tekniske systemer	24
1.5.7 Oppsummering av reguleringstekniske anvendelser	24
1.6 Drivkrefter i industriell automatisering.....	26
KAPITTEL 2	
Matematiske modeller av dynamiske systemer	29
2.1 Innledning og motivering.....	29
2.1.1 Motiverende eksempel	30
2.2 Systemteknisk beskrivelse	35
2.2.1 Statisk prosess	36
2.2.2 Dynamisk prosess	38
2.3 Differensiallikninger	40
2.3.1 Første-ordens differensiallikninger	40
2.4 Lineære systemer, linearitet	46

2.5 Impulsrespons og foldningsintegral	48
2.6 Fysiske balanser; sett av differensiallikninger	50
2.6.1 Massebalanse (stoffbalanse)	51
2.6.2 Energibalanse	54
2.6.3 Kraftbalanse	54
2.6.4 Elektrisk balanse	58
2.7 Tidsvariante differensiallikninger	60
2.8 Høyere-ordens differensiallikninger	62
2.9 Blokkdiagrammer.....	64

KAPITTEL 3

Tilstandsromanalyse	69
3.1 Innledning og motivering.....	69
3.2 Vektordifferensiallikninger	70
3.2.1 Tilstandsvektor og tilstandsrom.....	70
3.2.2 Et “rektangulært skjema” for matrise- og vektormultiplikasjon.....	71
3.3 Løsning av lineære vektordifferensiallikninger	72
3.3.1 Transisjonsmatrisen ved egenverdiutvikling	72
3.3.2 Transisjonsmatrisen ved rekkeutvikling	75
3.3.3 Transisjonsmatrisen og Cayley-Hamiltons teorem.....	82
3.4 Monovariabel og multivariabel systemer. Blokkdiagrammer.....	84
3.5 Valg av tilstandsvariable	86
3.6 Ulineære vektordifferensiallikninger. Linearisering.....	92

KAPITTEL 4

Laplace-transformasjon.....	99
4.1 Innledning og motivering.....	99
4.2 Definisjoner.....	100
4.2.1 Vanlig forekommende Laplace-transformer. Regler og teoremer	102
4.3 Laplace-transformasjon av differensiallikninger	105
4.3.1 Første-ordens lineære differensiallikninger med konstante koeffisienter.....	105

4.4 Invers Laplace-transformasjon ved residuegning	106
4.4.1 Residuegning	106
4.4.2 Invers Laplace-transformasjon	108
4.5 Høyere-ordens lineære differensiallikninger med konstante koeffisienter	110
4.6 Blokkdiagrammer.....	111
4.6.1 Blokkdiagram i tidsplan - s som derivasjonsoperator.....	117
4.7 Lineære vektordifferensiallikninger med konstante koeffisienter	118
4.8 Transfermatrise og transferfunksjon	122
4.9 Sammenhengen poler / nullpunkter og tidsrespons	127
4.9.1 Rasjonale transferfunksjoner	127
4.9.2 Irrasjonale transferfunksjoner	153

KAPITTEL 5

Styrbarhet og observerbarhet	159
5.1 Innledning	159
5.2 Styrbarhet	160
5.3 Observerbarhet	162
5.4 Styrbarhet og observerbarhet i Laplace-transformerte systemer	165
5.5 Funksjonell styrbarhet (FS) av monovariabel lineære systemer	174

KAPITTEL 6

Frekvensanalyse	175
6.1 Innledning og motivering.....	175
6.2 Utledning av frekvensrespons	178
6.2.1 Frekvensrespons av multivariabel systemer	182
6.3 Grafisk representasjon av frekvensrespons for monovariabel systemer	183
6.4 Asymptotisk amplitude/fase/frekvens-diagram (Bodediagram)	191
6.4.1 Ikke-minimum-fase-systemer	202
6.5 Skissering av tidsrespons på basis av frekvensrespons.....	207
6.5.1 Effektivverdien av et lineært systems respons på et stasjonært "tilfeldig" pådrag	214

KAPITTEL 7

Tilbakekoplede systemer	219
7.1 Innledning og motivering.....	219
7.2 Tilbakekopling i monovariabel systemer.....	222
7.2.1 Følgeforhold. Avviksforhold. Reguleringsgrad. Relativ følsomhet	223
7.2.2 Frekvensanalyse av monovariabel tilbakekoplede systemer	225
7.2.3 Nicholsdiagram	230
7.2.4 Monovariabelt system med dynamisk tilbakekopling	234
7.3 Følsomhet.....	238

KAPITTEL 8

Stabilitet	241
8.1 Innledning og motivering.....	241
8.2 Impulsresponsen og stabilitet.....	245
8.3 Stabilitet i tilstandsrommet	246
8.4 Algebraiske kriterier for stabilitet	248
8.4.1 Rouths kriterium	248
8.4.2 Hurwitz's kriterium.....	252
8.4.3 Algebraiske kriterier for systemer karakterisert ved transferfunksjoner	254
8.5 Funksjonsteoretiske kriterier for stabilitet	262
8.5.1 Nyquists stabilitetskriterium for monovariabel systemer	262
8.5.2 Grafisk tolkning av Nyquists stabilitetskriterium	264
8.5.3 Bode-Nyquist-kriteriet	275
8.5.4 Fasemargin. Forsterkningsmargin.....	277

KAPITTEL 9

Syntesemetoder for lineære reguleringsystemer.....	287
9.1 Innledning og motivering.....	287
9.2 Systemspesifikasjoner	289
9.2.1 Spesifikasjon for prosessregulering	289
9.2.2 Spesifikasjon for følgesystem (servomekanismer)	292

9.3	Regulatorsyntese ved seriekompensasjon	301
9.3.1	Seriekompensasjon ved hjelp av standardregulatorer for prosessregulering	319
9.3.2	Eksperimentell innstilling av parametrene i standardregulatorer for prosessregulering	322
9.3.3	Standardregulatorer for et utvalg av prosesser. Parametervalg.	326
9.3.4	Seriekompensasjon av følgesystemer (servomekanismer)	332
9.4	Når trenger vi integrerende regulator i en reguleringsløyfe?	353
9.5	Kompensasjon med intern tilbakekopling.....	355
9.5.1	Kompensasjon av monovariabel systemer med intern tilbakekopling	355
9.6	Foroverkopling i monovariabel systemer	369
9.6.1	Foroverkopling (fra forstyrrelsen) i prosessreguleringssystemer	370
9.6.2	Forholdsregulering.....	378
9.6.3	Foroverkopling (fra referansen) i følgesystemer	380
9.6.4	Prediktiv foroverkopling.....	389
9.7	Estimatorbasert regulering	391
9.7.1	Forenklet “tilstandsestimator” ved regulering av prosess med stor forsinkelse	391
9.8	Parametrisk optimering av systemer med gitt struktur	398
9.8.1	Kvadratisk objektfunksjon.....	398
9.8.2	Objektfunksjon basert på systemets frekvensrespons.....	405
9.9	Robust regulering	411
9.10	Sluttverdiregulering	417

KAPITTEL 10

Multivariable systemer	425	
10.1	Innledning og motivering.....	425
10.2	Stabilitet og respons	429
10.2.1	Stabilitet og respons av et multivariabelt system med diagonalregulator	430
10.3	Seriekompensasjon av en multivariabel reguleringsløyfe.....	439
10.4	Foroverkopling i multivariable systemer	445
10.5	Optimalregulering og modellbasert regulering	446
10.6	Singulærverdianalyse av lineære multivariable dynamiske systemer.....	449
10.7	Funksjonell styrbarhet (FS) av multivariable systemer	455

KAPITTEL 11

Diskret regulering av kontinuerlige systemer	459
11.1 Innledning og motivering.....	459
11.2 Analyse ved kontinuerlig tilnærming.....	462
11.2.1 Diskret PI-regulator	462
11.2.2 Frekvensanalyse, kontinuerlig tilnærming.....	463
11.3 Diskret analyse og syntese	468
11.3.1 Diskret signal og system	468
11.3.2 z-transformasjon	470
11.3.3 Invers z-transformasjon	472
11.3.4 Transferfunksjon i z	473
11.3.5 Stabilitet og poler for et diskret system	474
11.3.6 Frekvensanalyse av diskrete systemer	477
11.3.7 Tasteteoremet (“Samplingsteoremet”).....	481
11.4 Analyse av diskrete systemer ved w-transformasjon	483
11.5 Bruk av w-transformasjon ved syntese av diskret regulator	492
11.6 Tidsrespons av diskret system.....	496
11.7 Den multivariable w-transformasjonen.....	498

KAPITTEL 12

Begrensninger i lineære reguleringsystemer	501
12.1 Innledning og motivering.....	501
12.2 Metning. Amplitudebegrensning.....	503
12.2.1 Undersøkelse av metning i tidsplanet	504
12.2.2 Undersøkelse av metning i frekvensplanet	506
12.3 Effektbruk i reguleringsystemer	509
12.4 Bestemmelse av den realiserbare båndbredden av et reguleringsystem.....	512
12.5 Pådragsmetning i systemer med integrerende regulator	514

APPENDIX A

Matrisealgebra	517
-----------------------------	------------

A.1 Lineære transformasjoner. Matriser	518
A.1.1 Egenverdier og egenvektorer	518
A.1.2 Matriseoperasjoner	521
A.1.3 Similaritetstransformasjon. Diagonalisering	523
A.2 Derivasjon av matriser og vektorer	526
APPENDIX B	
Laplace-transformasjons-par	529
APPENDIX C	
Utleddning av styrbarhetskriteriet	535
APPENDIX D	
Korreksjonsskalaer	541
APPENDIX E	
Manuell skissering av stedkurver i Nicholsdiagram	545
APPENDIX F	
Nicholsdiagram i MATLAB	549
APPENDIX G	
Brønnmesteren	551
Referanser	559
Bibliografi	560
Tidsskrifter som omhandler reguleringstekniske emner	562
Stikkordsliste	563

Forord

De fleste tekniske universiteter i verden har i de siste ca. 20 år innført *et grunnkurs i regulerings-teknikk* for mange av sine studenter i løpet av de to første år av studiet. Dette skyldes at det moderne industrisamfunn med alle sine tekniske systemer ikke kan fungere uten bruk av virkemidler og løsninger som regulerings-teknikken tilbyr. Regulerings-teknikk er blitt et av basisfagene som mange ingeniører må beherske.

Dette er en fullstendig omarbeidet og utvidet utgave av tidligere bøker med samme navn, forfattet av Jens G. Balchen, som har kommet ut på samme forlag uten avbrudd, fra 1963. Disse bøkene har vært brukt i undervisningen ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) (tidligere NTH) og flere andre universiteter og høyskoler. I forhold til de gamle utgavene er det i denne boka gjort mange forbedringer både med hensyn til faglig innhold og grafisk presentasjon.

Boka forutsetter at leseren har grunnleggende matematikk-kunnskap i differensiallikninger, lineær algebra, kompleks funksjonsteori og Laplace-transformasjon. Videre forutsettes vanlig kunnskap i fysikk, herunder varmelære, mekanikk med dynamikk og grunnlaget for elektroteknikk.

Denne boka inneholder mer stoff enn det er naturlig å kreve som pensum i et grunnkurs i regulerings-teknikk, fordi det er mange som gjerne vil gå litt dypere i stoffet på egen hånd, og dessuten ha boka for hånden som en oppslagsbok. For de som skal bruke boka til grunnkurs, gir vi nedenfor en tabell med et *minimums*forslag til pensum, og i hvilken rekkefølge stoffet bør leses. Hver linje i tabellen antyder den stoffmengde som, sammen med trening i form av regneøvinger, skulle kunne absorberes i løpet av en studie-uke på et universitet. Boka inneholder et stort antall eksempler. Det finnes på markedet mange øvingssamlinger som kan brukes som støtte utover eksemplene som finnes i boka. Vi planlegger å legge ut på internett øvingsprogrammet for faget Regulerings-teknikk ved Institutt for teknisk kybernetikk.

Det er utarbeidet en tabell som beskriver de anvendelsesorienterte eksemplene i boka. Denne skal gjøre det enklere for leseren å se sammenhengen mellom de mange gjennomgående eksemplene i boka.

Vi håper at leserne vil gi oss tilbakemeldinger om feil og uklar framstilling, og råd om forbedringer. Slik tilbakemelding kan sendes til regbok@itk.ntnu.no.

Vi takker vit.ass. Hilde Jagtøien og stipendiat Knut Rekev som har gjort det aller meste av arbeidet med tekstbehandling, grafikk og simuleringer. Videre takker vi studentene Erik Adli, Einar Skavland Idsø og Ronny Waage for gjennomlesning og kommentarer.

Institutt for teknisk kybernetikk
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Trondheim, januar 1999

Jens G. Balchen
professor emeritus

Trond Andresen
amanuensis

Bjarne A. Foss
professor

TABELL 1 Forslag til pensum i et "minimums-grunnkurs"*

Tema	Hvor i boka
Introduksjon til kybernetikk. Motivasjon. Tilbakekopling. Matematiske modell av fysisk system v.h.a. 1. ordens differensialligning. Linearitet og impulsrespons.	1, 2.1-2.5
Modeller med sett av differensialligninger. Blokkdiagram i tidsplan.	2.6, 2.7, 2.9
Tilstandsrombeskrivelse. Transisjonsmatrise. Hvordan finne tidsforløp. Valg av tilstandsvariable.	3.1, 3.2 (matrisealgebra, egenvektorer og -verdier ansees kjent), 3.3.1, 3.3.2, 3.5 (men bare "form" 1, 2 og 3)
Linearisering av ulineære systemer. Laplacetransformasjonen, hvordan finne tidsforløp ved residuregning.	3.6 4.1-4.4
Laplacetransformasjonen (forts.): Blokkdiagrammer i s-plan. Transfermatrise, sammenheng tilstandsrom/ Laplacetransformasjon. 1. og 2. ordens systemer.	4.6, 4.7, 4.8 (t.o.m. (4.65)), 4.9 inkl. X4.9
Systemegenskaper ut fra transferfunksjonen. Enkel regulering med tilbakekopling. Rotkurver. Irrasjonal transferfunksjon.	X4.9 (forts.) (unntatt F4.18 og F4.19 med tilh. tekst), X4.10, X4.11, 4.9.2 (t.o.m. F4.36)
Frekvensrespons, Bode-diagram, asymptotisk frekvensrespons	6.1-6.4
Frekvensrespons (forts). Tilbakekoplede systemer. Følge- og avviksforhold, reguleringsgrad. Nicholsdiagram	6.4 (forts.), 7.1, 7.2 (ikke X7.6)
Stabilitet, definisjoner og algebraiske kriterier	8.1, 8.2, 8.3, 8.4 (ikke 8.4.2) t.o.m. X8.10
Stabilitet, Nyquists kriterium og grafiske metoder. Stabilitet i Bode-diagram	8.5 (ikke X8.21)
Syntese av reguleringssystemer: Generelt. Prosessregulering. Seriekompensasjon. Standardregulatorer: P, PI, PID. Fasekorleksjon for bedre stabilitet. Andre spesifikasjoner.	9.1, 9.2.1, 9.3.1, X9.5, X9.3
Seriekompensasjon (forts.): Ziegler-Nichols' regler. Integralvirkning, fjerning av stasjonært avvik. Avvik ved følgerregulering (servosystemer).	9.3.2, 9.4, 9.2.2 (t.o.m. F9.7)
Seriekompensasjon - følgesystemer (forts.) Syntese av reguleringssystemer v/ intern tilbakekopling.	X9.10, 9.5 (t.o.m. X9.13)
Syntese av reguleringssystemer: Foroverkopling. Enkel diskret regulering (datamaskinen som regulator).	9.6 t.o.m. X9.17, 9.6.2, 9.6.3, 11.1, 11.2, 12.5

* Kode i tabellen: 2.1, 3.3.2 = avsnitt, (4.53) = formel, X4.5 = eksempel, F4.8 = figur

TABELL 2 Oversikt over eksempler som har basis i virkeligheten †

	Elektrisk krets	Økonomi	Blanding og blandetanker	Varmtvanns kjøler	Varmveksler	Svingende masse	Bitrafikk
Kap. 2 Matematiske modeller	2.3 ¹ 2.8 ²	2.4 ¹	2.5 ³ 2.12 ⁴	2.1 ²		2.6 ² 2.9 ⁵ 2.11 ⁴	
Kap. 3 Tilstandsrom-analyse				3.1 ⁶		3.1 ⁶ 3.2 ⁶ 3.3 ⁷	
Kap. 4 Laplace-transformasjon	4.3 ⁸			4.10 ⁹ 4.11 ⁹ 4.12 ⁹ 4.13 ⁹		4.6 ¹⁰ 4.9 ¹¹	
Kap. 5 Styrbarhet og observerbarhet	5.4 ¹³						
Kap. 6 Frekvensanalyse				6.1 ¹⁴			
Kap. 7 Tilbakekoplede systemer				7.2 ¹⁵ 7.3 ¹⁹ 7.4 ²⁰			
Kap. 8 Stabilitet				8.9 ¹⁷ 8.14 ¹⁸ 8.17 ¹⁹ 8.19 ²¹			
Kap. 9 Konstruksjon av regulator					9.3 ²⁴ 9.4 ²⁴ 9.12 ²⁵		9.11 ²⁴
Kap. 10 Multivariable systemer			10.2 ³¹				
Kap. 11 Diskret regulering av kontinuerlige systemer							
Kap. 12 Begrensninger i lineære reguleringsystemer							

TABELL 2 Oversikt over eksempler som har basis i virkeligheten (forts.)

Fjærsystem i bil	Fartøy-styring	Kjemisk reaktor	Motorstyring og antenne-styring	Turbiner og generatorer i kraft-produksjon	Papir-produksjon	Løpekatt	
2.7 ²							Kap. 2 Matematiske modeller
		3.5 ³					Kap. 3 Tilstandsrom-analyse
4.5 ¹²							Kap. 4 Laplace-transformasjon
							Kap. 5 Styrbarhet og observerbarhet
							Kap. 6 Frekvensanalyse
			7.6 ¹⁶				Kap. 7 Tilbakekoplede systemer
		8.15 ¹⁸ 8.21 ²³		8.20 ²			Kap. 8 Stabilitet
	9.9 ²⁴ 9.21 ²⁷	9.15 ²⁶ 9.19 ²⁸	9.8 ²⁴ 9.10 ²⁴ 9.13 ²⁵ 9.20 ²⁷	9.14 ²⁵ 9.15 ²⁶ 9.16 ²⁶	9.18 ²⁷ 9.22 ²⁹	9.26 ³⁰	Kap. 9 Konstruksjon av regulator
	10.3 ³²						Kap. 10 Multivariable systemer
			11.5 ³³				Kap. 11 Diskret regulering av kontinuerlige systemer
	12.2 ³³		12.3 ³⁴				Kap. 12 Begrensninger i lineære reguleringsystemer

†Tema for eksempler i tabell 2.

1. Tidsrespons beregnes
2. Utvikling av dynamisk modell
3. Utvikling av dynamisk modell og linearisering av denne
4. Blokkdiagram
5. Transformasjon av dynamisk modell
6. Tilstandsrommodell
7. Beregning av transisjonsmatrise
8. Laplace-transformasjon av tidsfunksjon og residueregning
9. Regulering, rotkurver og tidsrespons
10. Laplace-transformasjon av tilstandsrommodell
11. Laplace-transformasjon av modell og beregning av tidsrespons ved residueregning
12. Reduksjon av blokkdiagram
13. Styrbarhet og observerbarhet
14. Frekvensrespons ved ulike frekvenser
15. Følgeforhold og reguleringsgrad
16. Tilbakekopling
17. Rouths kriterium og sløyfetransferfunksjon
18. Nyquist stabilitetskriterium
19. Bruk av amplitude/fase-diagram (AFF-diagram)
20. Bruk av Nicholsdiagram
21. Bruk av Bode-Nyquist kriteriet
22. Fase og forsterkningsmargin
23. Stabilitet av åpent sløyfe ustabil system
24. Regulatorkonstruksjon
25. Regulering med intern tilbakekopling
26. Kaskaderegulering
27. Foroverkopling
28. Forholdsregulering
29. Bruk av estimator i regulering
30. Sluttverdi regulering
31. Enkelsløyferegulering av multivariabelt system
32. Multivariabel regulering
33. Bruk av w -transformasjon
34. Metning og dimensjonering av pådrag
35. Effektmessig dimensjonering