

# Lecture Notes in Operations Research and Mathematical Systems

Economics, Computer Science, Information and Control

---

Edited by M. Beckmann, Providence and H. P. Künzi, Zürich

47

---

*H. A. Nour-Eldin*  
**H. A. Nour-Eldin**

Eidg. Technische Hochschule Zürich

## Optimierung linearer Regelsysteme mit quadratischer Zielfunktion

Habilitationsschrift an der Abteilung für Elektrotechnik  
der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 1971

---



Springer-Verlag

Berlin · Heidelberg · New York 1971

## Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
------------	---

### KAPITEL 1

1.	<u>Die Optimierungsaufgabe für lineare kontinuierliche Regelsysteme mit quadratischen Zielfunktionen</u>	15
1.1	Die Formulierung der Optimierungsaufgabe	15
1.2	Die Einschränkung der Form des Steuer- vektors $\underline{u}(t)$	19
1.3	Die Lösung der ZS-Optimierungsaufgabe	23
	a) Die Konvexität der Zielfunktion	26
	a.1. Die starken Bedingungen	26
	a.2. Die schwachen Bedingungen	29
	b) Die Lösung für die optimale Steuer- grösse	32
1.4	Die Lösung der ZR-Optimierungsaufgabe	38
1.5	Die optimale Zustandsregelung durch das konvexe Rückführungsprogramm	41
1.6	Das optimale "Tracking"-Problem	48
1.7	Eine spezielle Lösung des konvexen Pro- gramms für beschränkte Steuerenergie	57
1.8	Ein Beispiel für ein System zweiter Ordnung	63

## KAPITEL 2

2.	<u>Die Anwendung der konvexen Rückführungsmethode auf verschiedene lineare Regelprozesse</u>	70
2.1	Die Optimierung von Regelsystemen mit Totzeitgliedern	71
2.1.1	Die Formulierung der Optimierungsaufgabe	74
2.1.2	Die Lösung der Optimierungsaufgabe	75
2.1.3	Beispiele für die optimale Steuerung mit Totzeit	82
2.2	Die Optimierung von Regelsystemen mit verteilten Parametern	86
2.2.1	Die Beschreibung eines Regelsystems mit verteilten Parametern	86
2.2.2	Die bekannte Optimierungsmethode für quadratische Zielfunktion	88
2.2.3	Die neue Lösung der Optimierungsaufgabe	90
a)	Die Lösung der partiellen Differentialgleichung	91
b)	Die Formulierung des Optimierungsproblems	92
c)	Die Auswertung der Zielfunktion	93
d)	Die Konvexität der Zielfunktion	95
e)	Der optimale Steuervektor	97
2.2.4	Ein Beispiel mit der Wellengleichung	98

2.3	Die Optimierung von getasteten Regelsystemen	104
2.3.1	Die Formulierung der Optimierungsaufgabe	106
2.3.2	Die Lösung der ZS-Aufgabe	106
	a) Die Konvexität der Zielfunktion	108
	b) Die Lösung für die optimale Steuer- grösse	112
2.3.3	Die Lösung der ZR-Aufgabe	115

### KAPITEL 3

3.	<u>Die Optimierung unter dem Einfluss von Rauschen</u>	117
3.1	Die Optimierung mit Eingangsruschen	117
3.1.1	Die Lösung der Optimierungsaufgabe mit Eingangsruschen	119
3.2	Die optimale Zustandsregelung mit fehler- hafter Zustandsmessung	123
3.2.1	Die Eigenschaften des optimalen Vektors $\hat{\underline{U}}_0$	126
3.2.2	Eine quasi-optimale Lösung der Optimie- rungsaufgabe	131

KAPITEL 4

4.	<u>Anwendung des Rückführungsprogramms für die automatische Landung von Verkehrs- flugzeugen</u>	138
4.1	Die Landungsphasen für Verkehrsflugzeuge	138
4.2	Der Einfluss der Anfangsbedingungen	139
4.3	Das Flugzeug als Regelstrecke	141
4.4	Die Wahl der Zielfunktion	143
4.5	Die Optimierungsaufgabe	144
4.6	Die Landungskurven mit dem automatischen Landungssystem	148
	<u>Zusammenfassung</u>	154
	<u>Schrifttum</u>	158