

Inhaltsverzeichnis

Teil I Lineare Regelvorgänge

| | |
|---|----|
| 1. Aufgabenstellung der Regelungstechnik | |
| 1.1. Allgemeines | 1 |
| 1.2. Erläuterung der Aufgabenstellung anhand von Beispielen | 2 |
| 1.2.1. Regelung eines Nachrichtenkanals | 3 |
| 1.2.2. Raumheizung | 5 |
| 1.2.3. Kursregelung eines Schiffes | 7 |
| 1.3. Stabilitätsproblem | 10 |
| 2. Analytische Beschreibung des dynamischen Verhaltens einer Regelstrecke | |
| 2.1. Übertragungselement, Blockschaltbild | 13 |
| 2.2. Normierung und Linearisierung | 16 |
| 3. Dynamisches Verhalten einfacher Übertragungselemente | |
| 3.1. Proportionalglied und Verzögerung 1. Ordnung (PT_1) | 19 |
| 3.1.1. Fremderregter Gleichstromgenerator | 19 |
| 3.1.2. Weitere Beispiele | 22 |
| 3.1.3. Allgemeine Differentialgleichung 1. Ordnung | 23 |
| 3.2. Proportionalglied mit Verzögerung höherer Ordnung | 26 |
| 3.2.1. Übertragungselement 2. Ordnung (PT_2) | 26 |
| 3.2.2. Weitere Beispiele | 28 |
| 3.2.3. Proportionalglied mit Verzögerung höherer Ordnung (PT_nD_m) | 29 |
| 3.3. Integrierende Übertragungselemente | 29 |
| 3.3.1. Integrator (I) | 29 |
| 3.3.2. Verzögerter Integrator (IT_1) | 31 |
| 3.3.3. Doppelter Integrator (I_2) | 32 |
| 3.4. Laufzeitglied | 33 |
| 4. Berechnung der Systemantwort bei verschiedenen Anregungsfunktionen | |
| 4.1. Impulsfunktion und Impulsantwort | 35 |
| 4.2. Anstiegsfunktion (Rampe) und Anstiegsantwort | 37 |
| 4.3. Berechnung der Antwort einer linearen Übertragungsstrecke bei beliebigem Verlauf der Anregungsfunktion | 39 |
| 4.4. Anstiegsfehler und Steuerfläche | 41 |
| 4.4.1. Anstiegsfehler | 41 |
| 4.4.2. Steuerfläche (Regelfläche) | 43 |
| 5. Die Übertragungsfunktion | |
| 5.1. Eigenschaften und komplexe Darstellung rationaler Funktionen | 44 |
| 5.1.1. Pole und Nullstellen | 44 |
| 5.1.2. Abbildung durch ein Polynom | 46 |
| 5.1.3. Abbildung durch ein reziprokes Polynom | 50 |
| 5.1.4. Gebrochene rationale Funktion | 52 |

| | | |
|------------|--|-----|
| 5.2. | Logarithmische Frequenzkennlinien | 54 |
| 5.2.1. | Bode-Diagramm | 54 |
| 5.2.2. | Beispiel | 61 |
| 6. | Gegenkopplung und Regelung | |
| 6.1. | Rückkopplung | 64 |
| 6.2. | Beispiele | 66 |
| 6.2.1. | Magnetischer Gleichstromverstärker | 66 |
| 6.2.2. | Elektronischer Rechenverstärker mit frequenzabhängiger Gegenkopplung | 71 |
| 6.2.3. | Hydraulischer Stellmotor mit „Rückführung“ | 76 |
| 6.3. | Stabilität | 77 |
| 7. | Stabilität eines Regelkreises | |
| 7.1. | Stabilität und Dämpfung | 80 |
| 7.2. | Numerische Stabilitätskriterien | 83 |
| 7.3. | Graphische Stabilitätsprüfung anhand der charakteristischen Gleichung | 85 |
| 7.3.1. | Phasenintegral | 85 |
| 7.3.2. | $N_g(p)$ ist Polynom | 87 |
| 7.3.3. | $N_g(p)$ ist eine spezielle ganze Funktion | 90 |
| 7.4. | Stabilitätsprüfung anhand der Ortskurve des Kreisfrequenzganges (Nyquist) | 92 |
| 7.5. | Beispiele zum Nyquist-Kriterium, Sonderfälle | 94 |
| 7.5.1. | Proportional wirkender Kreis | 94 |
| 7.5.2. | Integrierender Kreis | 95 |
| 7.5.3. | Bedingt stabile Regelung | 96 |
| 7.5.4. | Instabilität im offenen Kreis | 97 |
| 8. | Anwendung des Nyquist-Kriteriums zur Festlegung freier Regler-Parameter | |
| 8.1. | Betrags- und Phasenabstand | 101 |
| 8.2. | Übertragung in das Bode-Diagramm | 106 |
| 8.3. | Allgemeine Gesichtspunkte für den Entwurf eines Regelkreises | 108 |
| 9. | Funktionsbausteine für Regler und Regelstrecken | |
| 9.1. | Minimalphasen-Funktionen | 113 |
| 9.1.1. | Pole | 113 |
| 9.1.2. | Nullstellen | 114 |
| 9.1.3. | Zusammenhang zwischen Betrag und Phase | 115 |
| 9.2. | Nicht-Minimalphasen-Funktionen | 117 |
| 9.2.1. | Allpaß-Funktion 1. Ordnung | 117 |
| 9.2.2. | Allpaß-Funktion 2. Ordnung | 120 |
| 9.2.3. | Allpaß-Funktion höherer Ordnung, Laufzeitglied | 122 |
| 10. | Regelung mit proportional wirkendem Regler (P) | |
| 10.1. | Definition | 123 |
| 10.2. | Verwirklichung | 124 |

| | | |
|------------|--|-----|
| 10.2.1. | Elektrische Regler | 124 |
| 10.2.2. | Elektromechanische Regler | 127 |
| 10.2.3. | Pneumatische Regler | 128 |
| 10.3. | Anwendung | 129 |
| 10.3.1. | Berechnung eines Regelkreises 2. Ordnung | 129 |
| 10.3.2. | Berechnung eines Regelkreises 3. Ordnung | 131 |
| 11. | Regelung durch einen Proportionalregler mit Vorhalt (PD) | |
| 11.1. | Definition | 135 |
| 11.2. | Verwirklichung | 136 |
| 11.3. | Anwendung | 138 |
| 11.3.1. | „Kompensation“ einer Verzögerung | 138 |
| 11.3.2. | Regelstrecke 2. Ordnung | 140 |
| 11.3.3. | Regelstrecke 3. Ordnung | 141 |
| 12. | Regelung mit einem Integralregler (I) | |
| 12.1. | Definition | 145 |
| 12.2. | Verwirklichung | 146 |
| 12.2.1. | Elektronischer Integrator | 146 |
| 12.2.2. | Andere Integratoren | 147 |
| 12.3. | Anwendung | 149 |
| 12.3.1. | Regelkreis 2. Ordnung | 149 |
| 12.3.2. | Regelkreis höherer Ordnung | 151 |
| 13. | Regelkreis mit Proportional-Integral-Regler (PI) | |
| 13.1. | Definition | 153 |
| 13.2. | Verwirklichung | 154 |
| 13.3. | Anwendung | 155 |
| 13.3.1. | Proportional wirkende Regelstrecke 2. Ordnung | 156 |
| 13.3.2. | Verzögerter Integrator als Regelstrecke | 157 |
| 13.3.3. | Regelstrecke 3. Ordnung | 161 |
| 14. | Regelung mit Proportional-Integral-Differential-Regler (PID) | |
| 14.1. | Definition | 164 |
| 14.2. | Verwirklichung | 166 |
| 14.3. | Anwendung | 167 |
| 14.3.1. | Regelstrecke 3. Ordnung | 167 |
| 14.3.2. | Regelung einer ungedämpften schwingungsfähigen Regelstrecke | 171 |
| 14.4. | Andere Regler und Entwurfsverfahren | 175 |
| 15. | Wahl des Reglers für eine Tiefpaß-Regelstrecke höherer Ordnung | |
| 15.1. | Tiefpaß und Ersatzzeitkonstante | 177 |
| 15.2. | Anwendung der Näherung | 179 |
| 15.2.1. | Die Regelstrecke enthält nur die Ersatzfunktion | 179 |
| 15.2.2. | Die Regelstrecke enthält außer der Ersatzfunktion definierte Verzögerungen | 181 |

| | |
|---|-----|
| 16. Regelkreis mit Rückführung | |
| 16.1. Wirkungsweise | 182 |
| 16.2. Ausführungsbeispiele | 184 |
| 16.3. Ergänzende Rückführung | 185 |
| 17. Kaskadenregelung | |
| 17.1. Umwandlung des Blockschaltbildes | 187 |
| 17.2. Eigenschaften einer Kaskadenregelung | 188 |
| 17.3. Näherungsweise Berechnung einer einfachen Kaskadenregelung | 190 |
| 17.4. Verallgemeinerung | 191 |
| 17.4.1. Unterteilung der Regelstrecke | 191 |
| 17.4.2. Integrierende Regelstrecke | 192 |
| 17.4.3. Andere Struktur der Regelstrecke | 193 |
| 17.5. Stabilität einer Kaskadenregelung | 196 |
| 17.5.1. Übertragungsfunktion | 196 |
| 17.5.2. Berechnung der Stabilitätsgrenze für einen Sonderfall | 197 |
| 17.6. Beispiel einer Kaskadenregelung | 198 |
| 18. Störgrößen-Aufschaltung | |
| 18.1. Steuerung mit Störgrößen-Aufschaltung | 201 |
| 18.2. Regelung mit Störgrößen-Aufschaltung | 203 |
| 18.3. Regelung mit Vorsteuerung | 205 |
| 18.3.1. Statische Vorsteuerung | 205 |
| 18.3.2. Dynamische Vorsteuerung | 206 |
| 19. Mehrgrößen-Regelung | |
| 19.1. Aufgabenstellung | 210 |
| 19.2. Übertragungsfunktionen und Blockschaltbild einer linearen Zweigrößen-Regelung | 212 |
| 19.3. Entkoppelte Zweigrößen-Regelung | 215 |
| 19.3.1. Entkopplung | 215 |
| 19.3.2. Beispiel einer Durchfluß- und Mischungsregelung | 217 |

Teil II Nichtlineare Regelvorgänge

| | |
|---|------------|
| 20. Stellglied mit zweiwertiger unstetiger Kennlinie | 221 |
| 20.1. Verwendung eines Schaltelementes als Stellglied | 221 |
| 20.2. Linearisierung eines Schaltgliedes durch periodische Betätigung | 223 |
| 20.3. Zweipunktregler | 233 |
| 20.3.1. Beschreibung der Wirkungsweise des Zweipunktreglers anhand eines Beispiels | 233 |
| 20.3.2. Anwendung | 238 |
| 21. Stellglied mit dreiwertiger unstetiger Kennlinie | 245 |
| 21.1. Dreipunktschalter und Integrator | 245 |
| 21.2. Linearisierung durch periodisches Schalten | 246 |
| 21.3. Dreipunktregler mit minimaler Schalzhäufigkeit | 249 |
| 21.3.1. Dreipunktregler ohne Rückführung | 250 |
| 21.3.2. Dreipunktregler mit ergänzender Rückführung | 252 |
| 22. Darstellung von Regelvorgängen durch Zustandskurven | 257 |
| 22.1. Zustandsgrößen und Zustandsraum | 257 |
| 22.2. Ebene Zustandskurven | 266 |
| 22.2.1. System 1. Ordnung | 266 |
| 22.2.2. Zustandskurven eines zweifachen Integrators | 267 |
| 22.2.3. Zustandskurven eines verzögerten Integrators | 270 |
| 22.2.4. Periodisch gedämpftes Proportionalglied 2. Ordnung | 272 |
| 22.2.5. Aperiodisch gedämpftes Proportionalglied 2. Ordnung | 274 |
| 23. Beschreibung der Wirkungsweise unstetiger Regler anhand des Zustandsdiagrammes | 278 |
| 23.1. Beschleunigungsstrecke mit Zweipunktregler | 278 |
| 23.1.1. Idealer Zweipunktregler | 278 |
| 23.1.2. Idealer Zweipunktregler mit Rückführung | 280 |
| 23.1.3. Zweipunktregler mit Hysterese | 282 |
| 23.1.4. Zweipunktregler mit Hysterese und Rückführung | 284 |
| 23.2. Beschleunigungsstrecke mit Dreipunktregler | 285 |
| 23.2.1. Dreipunktregler mit Hysterese | 285 |
| 23.2.2. Dreipunktregler mit Hysterese und Rückführung | 286 |
| 23.3. Allgemeine Regelstrecke 2. Ordnung mit Zweipunktregler | 287 |
| 23.4. Verzögerter Integrator mit Dreipunktregler | 288 |
| 24. Zeitlich optimale Regelung | 292 |
| 24.1. Aufgabenstellung | 292 |
| 24.2. Kürzester Regelvorgang, optimale Schaltkurve | 293 |
| 24.2.1. Regelstrecke 1. Ordnung | 293 |
| 24.2.2. Regelstrecke 2. Ordnung | 294 |
| 24.2.3. Regelstrecke höherer Ordnung | 299 |
| 24.3. Integrierende Regelstrecke 2. Ordnung mit Begrenzung von Geschwindigkeit und Lage | 301 |

| | |
|--|------------|
| 25. Näherungsweise Stabilitätsprüfung eines nichtlinearen Systems mit Hilfe der Beschreibungsfunktion | 305 |
| 25.1. Die Beschreibungsfunktion | 305 |
| 25.2. Lineare Kennlinie mit begrenztem Aussteuerbereich | 308 |
| 25.3. Lineare Kennlinie mit Unempfindlichkeitszone und begrenztem Aussteuerbereich | 313 |
| 25.4. Zweipunktregler mit Hysterese | 315 |
| 25.5. Dreipunktregler mit Hysterese | 319 |
| 26. Weitere Stabilitätskriterien für nichtlineare Regelsysteme | 321 |
| 26.1. Allgemeine nichtlineare Kennlinie, Popow-Kriterium | 321 |
| 26.2. Stabilitätsuntersuchung mit Hilfe der Methode von Ljapunow | 327 |
| Anhang: Formeln zur Laplace Transformation | 333 |
| Literatur | 336 |
| Sachwortverzeichnis | 339 |