

DISKRETE REGELSYSTEME

VON

WERNER LEONHARD

O. PROFESSOR
AN DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG



BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT • MANNHEIM/WIEN/ZÜRICH

B•I•WISSENSCHAFTSVERLAG

Inhalt

| | |
|---|----|
| Vorwort | 5 |
| 1. Differenzgleichungen | 13 |
| 1.1 Zinsrechnung | 13 |
| 1.2 Iterationsrechnung | 15 |
| 1.3 PTj-Glied mit Stufenfunktion als Steuergröße | 17 |
| 1.4 Verzögerungsglied 2.Ordnung mit Stufenfunktion als Steuergröße | 20 |
| 1.5 Homogene Differenzgleichung zur Beschreibung der Einschwingvorgänge eines kontinuierlichen Systems n. Ordnung | 22 |
| 1.6 Lösung einer linearen, homogenen Differenzgleichung durch einen Potenzreihenansatz | 24 |
| 1.7 Andere Schreibweise einer linearen Differenzgleichung n-ter Ordnung | 25 |
| 2. Stabilität und Dämpfung einer diskontinuierlichen Übertragungsstrecke | 27 |
| 2.1 Stufen-Übertragungsfunktion, Stabilitätsbedingung | 27 |
| 2.2 Abbildung auf die $z = e^{Tp}$ -Ebene | 30 |
| 2.3 Die Abbildung $w = z^{-1}/z+1$ | 33 |
| 2.4 Beispiele für Stabilitätsgrenzen | 34 |
| 2.4.1 System 1.Ordnung ($n = 1$). | 34 |
| 2.4.2 System 2.Ordnung ($n = 2$). | 35 |
| 2.5 Graphische Stabilitätsprüfung anhand des charakteristischen Polynoms $N(z)$ | 38 |
| 2.5.1 Grenzkurve für vorgegebene Mindestdämpfung | 38 |
| 2.5.2. Ortskurvenkriterium | 41 |
| 3. Laplace-Transformation bei diskontinuierlichen Funktionen | 44 |
| 3.1 Stufenfunktion | 44 |
| 3.2 Impulsspeicher (Halteglied). | 45 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.3 | Modulierte Impulsreihe. | 47 |
| 3.4 | Lineare Übertragung einer modulierten Impulsreihe. | 50 |
| 4. | Die Impuls-Übertragungsfunktion. | 55 |
| 4.1 | Rationale Übertragungsfunktion $F(p)$ mit Einzelpolen. | 55 |
| 4.2 | Rationale Übertragungsfunktion mit Einzel- und Doppelpolen. | 58 |
| 4.3 | Übertragungsstrecke mit Laufzeit. | 60 |
| 4.4 | Zusammenhang zwischen $F(p)$ und $F^*(p)$ | 62 |
| 4.4.1 | Pole und Nullstellen. | 62 |
| 4.4.2 | Summenformel. | 64 |
| 4.4.3 | Abtasttheorem. | 67 |
| 4.5 | Einschwingvorgänge eines Abtastsystems. | 68 |
| 4.6 | Beispiele für Impuls-Übertragungsfunktionen | 70 |
| 4.6.1 | Verzögerungsglied 1.Ordnung. | 70 |
| 4.6.2 | Verzögerungsglied 2.Ordnung | 73 |
| 5. | Zusammengesetzte Übertragungsstrecken. | 76 |
| 5.1 | Kettenschaltung mehrerer Teilstrecken. | 76 |
| 5.1.1 | Ohne Zwischenabtastung | 76 |
| 5.1.2 | Mit Zwischenabtastung | 77 |
| 5.2 | Andere Kombinationen. | 79 |
| 5.2.1 | Parallelschaltung mehrerer Teilstrecken | 79 |
| 5.2.2 | Überlagerung von modulierten Impulsreihen und kontinuierlichen Zeitfunktionen | 80 |
| 5.3 | Berechnung von Zwischenwerten. | 81 |
| 5.4 | Übertragung von Stufenfunktionen. | 83 |
| 5.5 | Übertragung von amplitudenmodulierten Impulsen endlicher Höhe und Breite. | 87 |
| 5.6 | Lineare Interpolation. | 91 |
| 6. | Berechnung diskreter Einschwingvorgänge mit Hilfe der z -Transformation. | 94 |
| 6.1 | Rechenoperationen. | 94 |
| 6.1.1 | Addition und Verstärkung. | 95 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.1.2 | Verschiebung um ein ganzzahliges Vielfaches der Periode T | 95 |
| 6.1.3 | Differenz | 96 |
| 6.1.4 | Summation | 97 |
| 6.1.5 | Dämpfung | 98 |
| 6.1.6 | Faltung | 99 |
| 6.1.7 | Anfangs- und Endwertsatz | 99 |
| 6.2 | Häufig vorkommende Funktionen | 101 |
| 6.2.1 | Einzelimpuls bei $t = \nu T$ | 101 |
| 6.2.2 | Exponentialfunktion | 101 |
| 6.2.3 | Sprungfunktion | 102 |
| 6.2.4 | Anstiegsfunktion | 103 |
| 6.2.5 | Parabolischer Anstieg | 104 |
| 6.2.6 | Verzögerungsfunktion | 104 |
| 6.2.7 | Gedämpfte Schwingung | 105 |
| 6.3 | Berechnung von Einschwingvorgängen | 106 |
| 6.3.1 | Rücktransformation in den Zeitbereich | 106 |
| 6.3.2 | Beispiele | 109 |
| 7. | Kontinuierliches System mit Rückkopplung und einem Abtaster | 113 |
| 7.1 | Aufbau eines einfachen Abtast-Regelkreises | 113 |
| 7.2 | Berechnung der Impuls-Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises | 114 |
| 7.3 | Abtast-Regelkreis 2.Ordnung mit einem Integralregler | 116 |
| 7.3.1 | Wirkungsweise und Anwendungsbeispiel | 116 |
| 7.3.2 | Impuls-Übertragungsfunktion | 119 |
| 7.3.3 | Stabilität | 120 |
| 7.3.4 | Vorgegebene Dämpfung | 121 |
| 7.3.5 | Ersatz-Zeitkonstante | 124 |
| 7.4 | Abtastregelkreis mit Impulsspeicher | 126 |
| 7.4.1 | Impuls-Übertragungsfunktion | 126 |
| 7.4.2 | Stabilität und Dämpfung | 127 |
| 7.5 | Vertauschung der Reihenfolge von Regelkreisgliedern | 131 |

| | | |
|--------|--|------|
| 8. | Anwendung einer Abtastregelung bei einer Regelstrecke mit Laufzeit | .134 |
| 8.1 | Näherung für eine Regelstrecke höherer Ordnung mit Tiefpaßverhalten | .134 |
| 8.2 | Impuls-Übertragungsfunktion eines Regelkreises mit Laufzeit | .136 |
| 8.3 | Stabilität und Dämpfung | .138 |
| 8.4 | Beispiel | .143 |
| 9. | Regelkreis mit schrittweise arbeitendem Regler | 145 |
| 9.1 | Blockschaltbild | .145 |
| 9.2 | Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises | 146 |
| 9.3 | Anwendung eines digitalen Prozeßrechners als Vielfach-Regler | .149 |
| 9.4 | Synthese der Regler-Übertragungsfunktion für ein vorgegebenes Einschwingverhalten des Regelkreises | .152 |
| 9.4.1 | Beispiel | .153 |
| 9.4.2 | Vorgabe von Zwischenwerten | .158 |
| 10. | Synthese eines Regelkreises mit Einschwingvorgang endlicher Dauer | .160 |
| 10.1 | Zustandsgrößen | .160 |
| 10.2 | Synthese der Reglerfunktion für eine Regelstrecke mit Tiefpaß-Eigenschaften | .163 |
| 10.3 | Beispiel | .167 |
| 10.4 | Realisierung eines diskreten Übertragungsgliedes mit dem Analogrechner | .170 |
| 11. | Näherungsweise Synthese eines Abtastreglers bei Vorgabe des Stellgrößenverlaufes | .174 |
| 11.1 | Vereinfachte Synthese | .174 |
| 11.2 | Beispiele | .178 |
| 12. | Lineare diskrete Filter | .181 |
| 12.1 | Siebung | .181 |
| 12.1.1 | Mittelwertbildung | .181 |
| 12.1.2 | Tiefpaß und Bandpaß | .184 |
| 12.2 | Extrapolation | .190 |

| | | |
|--|--|-----|
| 12.3 | lineare Entzerrung | 191 |
| 12.4 | Angepaßtes Filter | 194 |
| 13. | Regelkreis mit pulsbreiten-gesteuertem Stellglied . . . | 205 |
| 13.1 | Gleichstrom-Zerhacker mit Thyristoren | 205 |
| 13.2 | Beschreibung des Regelkreises mit Pulsbreitenmodulator. | 207 |
| 13.3 | Lösung durch Linearisierung im stationären Betriebspunkt | 213 |
| 13.3.1 | Regelkreis 2.Ordnung | 213 |
| 13.3.2 | Verallgemeinerung. | 219 |
| 14. | Schrittweise Integrationsverfahren. | 221 |
| 14.1 | Allgemeines. | 221 |
| 14.2 | Einfache Integrationsformeln. | 222 |
| 14.2.1 | Rechteck-Regel | 222 |
| 14.2.2 | Trapez-Regel (Lineare Interpolation) | 223 |
| 14.2.3 | Simpson-Regel (Parabolische Interpolation). | 224 |
| 14.2.4 | Einschrittige Simpson-Formel. | 226 |
| 14.3 | Anwendung der Integrationsformel auf die schrittweise Integration einer einfachen Differentialgleichung. | 227 |
| Anhang: Formeln zur z -Transformation. | | 232 |
| 1. | Transformationsgleichungen. | 232 |
| 2. | Rechenoperationen. | 232 |
| 3. | Häufig vorkommende Funktionen. | 234 |
| Schrifttum. | | 235 |