

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einführung und Übersicht | 1 |
| 1.1 | Linearisierungsmethoden in der Regelungstheorie | 2 |
| 1.1.1 | Linearisierung um einen einzigen Arbeitspunkt | 3 |
| 1.1.2 | Methode der exakten Linearisierung | 3 |
| 1.1.3 | Approximationen der exakten Linearisierung | 5 |
| 1.1.3.1 | Poincaré-Linearisierung | 5 |
| 1.1.3.2 | Pseudolinearisierung | 6 |
| 1.1.4 | Methode der „Equilinearization“ | 7 |
| 1.1.5 | „Gain-Scheduling“ | 7 |
| 1.2 | Adaptive und robuste Regelung | 7 |
| 1.2.1 | Adaptive Regelung | 7 |
| 1.2.2 | Robuste Regelung | 8 |
| 1.3 | Ziel und Gliederung der Arbeit | 8 |
| 2 | Systembeschreibung und Regelungsaufgabe | 11 |
| 2.1 | Systembeschreibung | 11 |
| 2.2 | Entwurfsziele des Reglers | 12 |
| 2.3 | Menge der Arbeitspunkte | 15 |
| 2.4 | Linearisierung um die Arbeitspunkte | 18 |
| 2.5 | Anforderungen an die Strecke | 20 |
| 2.6 | Anforderungen an den Regler | 21 |
| 3 | Die Methode der Betriebsanpassung | 23 |
| 3.1 | Ansatz der Reglerstruktur | 23 |
| 3.1.1 | Parametrierter Regler | 23 |
| 3.1.2 | Anpassungsmechanismus | 26 |
| 3.2 | Linearisierungsbedingung | 27 |
| 3.3 | Eine Schwierigkeit des Gain-Scheduling | 28 |
| 3.4 | Einhaltung der Linearisierungsbedingung | 32 |
| 3.5 | Entwurfsschritte für einen Betriebsanpassungsregler | 36 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4 | Entwurf von PI-Reglern für zeitkontinuierliche Systeme | 40 |
| 4.1 | Kollokationsentwurf linearer Regler | 40 |
| 4.1.1 | Grundlegende Idee | 41 |
| 4.1.2 | Kollokationsentwurf von Standard-Reglern | 42 |
| 4.1.2.1 | P-Regler mit Vorsteuerung | 42 |
| 4.1.2.2 | PI-Regler | 45 |
| 4.2 | Nichtlinearer Reglerentwurf | 49 |
| 4.2.1 | Berechnung der linearen Reglerfamilie | 49 |
| 4.2.1.1 | P-Regler mit Vorsteuerung | 50 |
| 4.2.1.2 | PI-Regler | 51 |
| 4.2.2 | Bestimmung des nichtlinearen Reglers | 51 |
| 4.2.2.1 | P-Regler mit Vorsteuerung | 52 |
| 4.2.2.2 | PI-Regler | 55 |
| 4.2.3 | Eigenschaften des Verfahrens | 60 |
| 4.3 | Anwendungsbeispiele | 62 |
| 4.3.1 | Regelung eines Einzonen-Durchlaufofens | 62 |
| 4.3.1.1 | Ortsdiskretisierung des mathematischen Modells | 63 |
| 4.3.1.2 | Bestimmung der stationären Arbeitspunkte der Strecke | 64 |
| 4.3.1.3 | Linearisierung der Strecke um die Arbeitspunkte | 65 |
| 4.3.1.4 | Berechnung der linearen Reglerfamilie | 66 |
| 4.3.1.5 | Bestimmung des Betriebsanpassungsreglers | 67 |
| 4.3.1.6 | Simulationsergebnisse | 69 |
| 4.3.1.7 | Überprüfung der lokalen Stabilität des Regelkreises | 70 |
| 4.3.2 | Regelung einer Gleichstrommaschine | 73 |
| 4.3.2.1 | Bestimmung der stationären Arbeitspunkte der Strecke | 75 |
| 4.3.2.2 | Linearisierung der Strecke um die Arbeitspunkte | 75 |
| 4.3.2.3 | Berechnung der linearen Reglerfamilie | 76 |
| 4.3.2.4 | Bestimmung des Betriebsanpassungsreglers | 76 |
| 4.3.2.5 | Simulationsergebnisse | 77 |
| 4.3.2.6 | Überprüfung der lokalen Stabilität des Regelkreises | 80 |
| 5 | Verallgemeinerung auf komplexere Reglerstrukturen | 81 |
| 5.1 | Goldene Regel der Betriebsanpassung | 81 |
| 5.2 | Spezielle Reglerstrukturen | 85 |
| 5.2.1 | Modifizierter PID-Regler | 85 |
| 5.2.2 | Allgemeiner Regler | 87 |
| 5.2.3 | PI-Zustandsregler mit Beobachter | 91 |
| 5.3 | Anwendungsbeispiel | 94 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6 | Stabilität und Robustheit von Betriebsanpassungsregelungen | 98 |
| 6.1 | Lokale Eigenschaften von Betriebsanpassungsregelungen | 98 |
| 6.1.1 | Stabilität der Familie linearer geschlossener Regelkreise | 100 |
| 6.1.2 | Robustheit und andere Eigenschaften | 102 |
| 6.1.3 | Einige allgemeine Ergebnisse über Familien linearer Systeme | 103 |
| 6.2 | Stabilität des nichtlinearen geschlossenen Regelkreises | 105 |
| 7 | Ausblick | 110 |
| 7.1 | Entwurf nichtlinearer Abtastregler für nichtlineare Strecken | 110 |
| 7.1.1 | Kollokationsentwurf von zeitdiskreten, linearen PI-Reglern | 111 |
| 7.1.2 | Nichtlinearer Kollokationsentwurf von Abtastregelungen | 112 |
| 7.2 | Weitere Anwendungsmöglichkeiten der Betriebsanpassung | 114 |
| 8 | Zusammenfassung | 116 |
| | Anhang | 118 |
| A | Kroneckerprodukt und Matrizenkalkül | 118 |
| B | Einige Ergebnisse der klassischen Analysis | 120 |
| B.1 | Implizite Funktionen | 120 |
| B.2 | Der Umkehrsatz | 121 |
| C | Ableitung der Bedingungen des Kapitels 2 | 122 |
| C.1 | Menge der Arbeitspunkte | 122 |
| C.2 | Bedingungen für lineare, stationäre Führungsgenauigkeit und Unstörbarkeit | 126 |
| C.3 | Notwendigkeit der Rangbedingung der Familie linearisierter Strecken | 127 |
| C.4 | Nichtlineare exponentielle und lineare Stabilisierbarkeit | 129 |
| D | Untersuchung der Regularität der Matrix $F_w'(0)$ | 129 |
| E | Beweis des Satzes 4.1 | 130 |
| F | Bedingungen für die Erfüllung von $\text{Rang}(G(0, \alpha)) = q$ | 132 |
| G | Ableitung der Beziehung zwischen der nichtlinearen „Kennlinie“ der Strecke und der Verstärkungsmatrix der linearisierten Strecke | 133 |
| H | Algebraische Schleifen bei der Betriebsanpassung | 134 |
| I | Beweis, daß der allgemeine Regler des Abschnitts 5.2.2 die Linearisierungsbedingung erfüllt | 134 |
| J | Steuerbarkeit der Pole des I-Reglers bei der Reglerstruktur in Abschnitt 5.2.2 | 136 |
| K | Äquivalenz zweier linearer Reglerstrukturen | 136 |
| L | Beweis des Satzes 6.1 | 138 |
| M | Vertauschbarkeit der Operationen Abtastung und Linearisierung | 144 |
| | Literaturverzeichnis | 147 |