

Korn/Wilfert **Mehrgrößenregelungen**

Mehrgrößenregelungen

**Moderne Entwurfsprinzipien
im Zeit- und Frequenzbereich**

Prof. Dr. sc. techn. Ulrich Korn,
Magdeburg

Dr. sc. techn. Hans-Helmut Wilfert,
Dresden



VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Distributed by Springer-Verlag
Wien New York

ISBN-13: 978-3-7091-9490-4
DOI: 10.1007/978-3-7091-9489-8

e-ISBN-13: 978-3-7091-9489-8

1. Auflage

© VEB Verlag Technik, Berlin, 1982

Lizenz 201 · 370/19/82

DK 62-501,14:62-53 · LSV 3045 · VT 3/5424 -1

Lektor: Jürgen Reichenbach · Einbandgestaltung: Kurt Beckert

Schreibsatz: VEB Verlag Technik

Offsetdruck und buchbinderische Weiterverarbeitung:

Vorwort

Der Entwurf von Mehrgrößenregelungssystemen hat sich zu einem eigenständigen Teilgebiet der Regelungstechnik entwickelt. Während die systemtheoretischen Grundlagen und Methoden der Analyse von Mehrgrößenregelungen bereits in zusammengefaßter Form vorliegen, fehlt ein solcher Überblick auf dem Gebiet des Entwurfs.

Hier wird deshalb beabsichtigt, neuere, meist nur in der Originalliteratur zugängliche Entwurfsprinzipien und -verfahren für Mehrgrößenregelungen zusammenfassend und bewertend darzustellen. Die Realisierungsmöglichkeiten der vorgestellten Entwurfsprinzipien sind durch die Entwicklung der Automatisierungsgerätetechnik gegeben, und sie werden in wachsendem Maße in die Arbeit der Projektanten und Entwurfsingenieure Eingang finden. Dem wird auch in der Ausbildung an den Universitäten und Hochschulen Rechnung getragen.

Während die Grundlagen der Beschreibung von mehrvariablen Systemen im Zustandstheoretische Grundkonzept der modernen Frequenzbereichsmethoden nicht der Fall. In diesem Buch wird deshalb die Behandlungsmöglichkeit von Mehrgrößensystemen im Frequenzbereich besonders herausgestellt und die potentielle Leistungsfähigkeit entsprechender Entwurfsverfahren gezeigt.

Bei der Fülle der in der Originalliteratur vorgeschlagenen Entwurfsverfahren und ihrer Varianten mußte eine Beschränkung auf die wichtigsten Richtungen vorgenommen werden. Modifikationen und Vereinfachungen dieser Methoden konnten nur durch Literaturhinweise berücksichtigt werden. Dies gilt auch für Algorithmen und Programme.

Die Vorstellung der Entwurfsverfahren erfolgt auf der Grundlage einer zeitkontinuierlichen Systembeschreibung. Auf eine parallele Darstellung der zeitlich diskreten Systeme wird verzichtet. Zum einen sind die dargestellten Methoden auf diesen Fall übertragbar, zum anderen bietet die Entwicklung der Mikrorechentchnik die Möglichkeit einer quasi kontinuierlichen Signalverarbeitung. Die Behandlung als kontinuierliche Systeme bietet außerdem Vorzüge für eine Realisierung mit konventionellen Automatisierungsmitteln, wie sie sich besonders für im Frequenzbereich entworfene Strukturen anbietet.

Auf eine Darstellung der sich aus der Berücksichtigung stochastischer Eingangssignale ergebenden Entwurfsprobleme und dafür in Betracht kommenden Entwurfsverfahren mußte aus Umfangsgründen ebenfalls verzichtet werden.

Den Verfassern ist es eine angenehme Pflicht, insbesondere Herrn Prof. Dr. H. Kandler für wertvolle Hinweise und Diskussionen sowie Herrn Dipl.-Ing. G. Lauckner für eine teilweise Durchsicht des Manuskripts und die Durchrechnung der in den Abschnitten 6.3. und 6.4. enthaltenen Beispiele zu danken. Ferner sei Herrn Prof. Dr. H. Ehrlich für Hinweise gedankt.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis wichtiger Formelzeichen	11
1. Einführung	15
1.1. Zur Situation auf dem Gebiet der Prozeßregelung	16
1.2. Prozeßstabilisierung durch Mehrgrößenregelung als Teilaufgabe der Prozeßregelung	16
1.3. Spezifika einer Mehrgrößenregelung	17
1.3.1. Komplexität der Aufgabe	17
1.3.2. Prozeßmodelle als Voraussetzung eines Reglerentwurfs	17
1.3.3. Entwurfskriterien	18
1.4. Anforderungen an Entwurfsverfahren	18
1.5. Überblick über Entwurfsverfahren im Zeit- und im Frequenzbereich	19
1.6. Literatur	21
2. Einige Grundlagen zur Beschreibung und Analyse von Mehrgrößensystemen im Zeit- und Frequenzbereich	22
2.1. Zur Zustandsraumbeschreibung mehrvariabler Systeme	22
2.1.1. Zustandsgleichungen	22
2.1.2. Dyadische Zerlegung der Systemmatrix A	23
2.1.3. Integration der Zustandsgleichungen	23
2.1.4. Diskrete Systeme	25
2.2. Beschreibung mehrvariabler Systeme im Bildbereich	25
2.2.1. Übertragungsfunktionsmatrix	25
2.2.2. Frequenzabhängige Eigenwerte von Übertragungsfunktionsmatrizen ..	26
2.2.3. Pole und Nullstellen mehrvariabler Systeme	28
2.2.3.1. Smith-McMillan-Normalform der Übertragungsfunktionsmatrix	28
2.2.3.2. Pole	30
2.2.3.3. Nullstellen	30
2.2.3.4. Zusammenhang zwischen den Polen und Nullstellen von $G(p)$ und den Polen und Nullstellen der charakteristischen Übertragungsfunktionen $g(p)$	31
2.2.4. Steuer- und Beobachtbarkeit, Entkopplungsnulstellen	32
2.2.4.1. Steuerbarkeit der Zustände, Entkopplungsnulstellen des Eingangs ..	32
2.2.4.2. Beobachtbarkeit der Zustände, Entkopplungsnulstellen des Ausgangs	32
2.2.4.3. Steuerbarkeit der Ausgangsgrößen	33
2.2.4.4. Entkopplungsnulstellen des Ein- und Ausgangs	34
2.2.4.5. Relationen zwischen den Polen und Nullstellen mehrvariabler Systeme und Minimalrealisierung	34
2.3. Literatur	35
3. Mehrgrößenregelungssysteme als geschlossene Wirkungskreise	36
3.1. Grundstrukturen von Mehrgrößenregelungssystemen	36
3.2. Zusammenhang zwischen den charakteristischen Polynomen des offenen und denen des geschlossenen Systems: Hsu-Chen-Theorem	38
3.3. Zustandsrückführung	42
3.4. Ausgangsrückführung	46

3.5.	Zusammenhang zwischen charakteristischen Frequenzgängen des offenen und des geschlossenen Kreises	49
3.6.	Literatur	52
4.	Zur Strukturfrage: Entkopplung oder Nichtentkopplung	53
4.1.	Problematik und Auswirkung der Kopplungen vorzugsweise am Beispiel der Zweigrößenregelung	53
4.1.1.	Positive und negative Kopplung	55
4.1.2.	Zum Problem der Stellgrößen-Regelgrößen-Zuordnung	55
4.1.3.	P- und V-kanonische Streckenstruktur	55
4.1.4.	Qualitative Betrachtung über den Einfluß der Kopplungen, Koppel- faktor	58
4.1.5.	Kopplung und Stabilität, Kopplungsmaße und ihre Nutzung für heuristische Entwurfsverfahren	64
4.2.	Zum Entkopplungsgedanken und sich daraus ergebende Entwurfsmöglich- keiten	66
4.2.1.	Entkopplungssysteme mit P-Struktur an P-Strecke	69
4.2.2.	Entkopplungssystem in V-Struktur an P-Strecke	70
4.2.3.	Entkopplungssystem für Strecke in V-Struktur	73
4.2.4.	Näherungsweise Entkopplung, statische Entkopplung	74
4.2.5.	Entkopplung durch Zustandsrückführung	75
4.2.6.	Entkopplung durch Ausgangsrückführung	77
4.3.	Entkopplung der charakteristischen Frequenzgänge der Übertragungs- funktionsmatrix	79
4.4.	Schlußfolgerungen: allgemein strukturierte Regler	81
4.5.	Literatur	82
5.	Entwurfsverfahren im Zeitbereich	84
5.0.	Einleitende Bemerkungen und Problemstellungen	84
5.1.	Modale Regelung	88
5.1.1.	Erläuterung des Grundprinzips der modalen Regelung	88
5.1.2.	Modale Regelung: reelle Eigenwerte	92
5.1.3.	Modale Regelung: konjugiert-komplexe Eigenwerte	103
5.1.4.	Ablaufplan für den Entwurf einer modalen Regelung	107
5.1.5.	Beispiele	110
5.1.6.	Näherungsschritte: unvollständige Zustandsrückführung	120
5.1.7.	Modale Regelung mit einer Stellgröße zur Verschiebung mehrerer Eigenwerte	122
5.1.8.	Einschätzung der modalen Regelung	127
5.2.	Weitere Verfahren der Eigenwert- bzw. Polzuweisung für Mehrgrößenregel- strecken mit $m > 1$ Stellgrößen	132
5.2.1.	Verfahren, die von speziellen kanonischen Formen der System- gleichungen ausgehen	132
5.2.1.1.	Formulierung des Grundgedankens	132
5.2.1.2.	Regelungsnormform und Polzuweisung für ein System mit einer Stellgröße	133
5.2.1.3.	Polzuweisung unter Verwendung einer ausgewählten Regelungs- normform für Systeme mit $m > 1$ Stellgrößen	136
5.2.2.	Polzuweisung durch dyadische Zustandsrückführung	143
5.2.3.	Einschätzung	148
5.3.	Ausgangsrückführungen zur Polzuweisung	149
5.3.1.	Äquivalenter Ersatz einer proportionalen konstanten Zustandsrück- führung durch eine Ausgangsrückführung	150
5.3.2.	Restpolproblematik	152
5.3.3.	Dyadische Ausgangsrückführung zur Polvorgabe	154

5.3.4.	Polortskurven	159
5.3.5.	Einschätzung	161
5.4.	Optimalsteuerung bei quadratischen Gütekriterien	162
5.4.1.	Lineare Systeme und verallgemeinerte quadratische Kriterien: Standardproblem der linearen optimalen Zustandsrückführung	162
5.4.2.	Zur Lösung der Matrix-Riccati-Gleichung	165
5.4.3.	Ergebnisinterpretation und Einschätzung	166
5.5.	Beobachterentwurf	168
5.5.1.	Einführung	168
5.5.2.	Definition und Bedingungen eines Zustandsbeobachters	169
5.5.3.	Beobachter und Zustandsvektorrückführung, Separations- eigenschaft	173
5.5.4.	Entwurfsverfahren zur Erfüllung der Beobachterbedingungen	175
5.5.4.1.	Beobachterentwurf durch primäres Lösen der Gleichung $TA - WT = JC$	175
5.5.4.2.	Beobachterentwurf durch geeignete Vorgabe von T	178
5.5.5.	Einschätzung	183
5.6.	Kontrollbeobachter	184
5.6.1.	Einführung	184
5.6.2.	Definition und Bedingungen eines Kontrollbeobachters und Ausblick auf Syntheseverfahren	185
5.7.	Dynamische Kompensation	187
5.7.1.	Einleitung	187
5.7.2.	Strukturelle Realisierung eines dynamischen Kompensators	189
5.7.3.	Grundlagen des Kompensatorentwurfs	190
5.7.4.	Verringerung der Kompensatorordnung, Einschätzung	195
5.8.	Störungsausgleich und Sollwertfolge durch Hinzunahme von I-Anteilen zur modalen Regelung	196
5.8.1.	Problemstellung	196
5.8.2.	Geeignete Definition eines modifizierten Systems	198
5.8.3.	Modale Regelung des modifizierten Systems und ihre Interpretation ..	199
5.8.4.	Untersuchung des stationären Verhaltens des geregelten Systems ..	200
5.8.5.	Führungsregelung auf vorgegebene konstante Sollwerte der Systemausgänge	201
5.8.6.	Bemerkungen zur "Robustheit" der Regelung	202
5.8.7.	Zur praktischen Durchführung des Entwurfs der erweiterten modalen Regelung	203
5.9.	Zum Entwurf von Mehrgrößenregelungen mit externen Eingangssignalen: Nutzung des Inneren-Modell-Prinzips für Störungsausgleich und Sollwertfolge ..	205
5.9.1.	Einleitung und Problemstellung	205
5.9.2.	Entwurf von Mehrgrößenregelungen mit Sollwertfolge und Störungsausgleich	206
5.9.2.1.	Annahmen zur Mehrgrößenregelstrecke und zu den Führungs- und Störsignalen	206
5.9.2.2.	Entwicklung eines Entwurfskonzepts: Existenzbedingungen und Synthesevorschrift	207
5.9.2.3.	Sonderfall: konstante externe Eingangssignale	216
5.9.3.	Beispiel	216
5.10.	Literatur	225
6.	Entwurfsverfahren im Frequenzbereich	231
6.0.	Einführung	231
6.0.1.	Einleitende Bemerkungen	231
6.0.2.	Stabilität und Integrität	233
6.0.2.1.	Verallgemeinertes Nyquist-Kriterium	233
6.0.2.2.	Stabilitätsanalyse diagonaldominanter Systeme	239

	6.0.2.3. Integrität	241
6.1.	Auf innerer Entkopplung der Regelkreise beruhende Entwurfsverfahren	242
	6.1.1. Kommutative Regelung	242
	6.1.1.1. Erläuterung des Verfahrens	242
	6.1.1.2. Einschätzung des Verfahrens	244
	6.1.2. Dyadische Regelung	244
	6.1.2.1. Erläuterung des Verfahrens	244
	6.1.2.2. Einschätzung des Verfahrens	247
	6.1.3. Frequenzabhängige dyadische Regelung	247
	6.1.3.1. Grundgedanke des Verfahrens	247
	6.1.3.2. Erläuterung des Verfahrens	249
	6.1.3.3. Einschätzung des Verfahrens	254
6.2.	Methode der charakteristischen Ortskurven	255
	6.2.1. Grundprinzip des Verfahrens	255
	6.2.1.1. Stabilität	256
	6.2.1.2. Integrität	256
	6.2.1.3. Entkopplung	256
	6.2.1.4. Genauigkeit	257
	6.2.2. Erläuterung des Entwurfs	258
	6.2.3. Einschätzung des Verfahrens	266
6.3.	Inverses Nyquist-Verfahren	266
	6.3.1. Grundgedanken des Verfahrens	266
	6.3.2. Voraussetzungen und Grundlagen	267
	6.3.2.1. Voraussetzungen	267
	6.3.2.2. Stabilitätsprüfung anhand der Gershgorin-Bänder zur inversen Übertragungsmatrix	267
	6.3.2.3. Ostrowski-Theorem	269
	6.3.3. Erläuterung des Entwurfs	271
	6.3.3.1. Verfahren zur Erreichung von Diagonaldominanz	271
	6.3.3.2. Entwurf auf der Basis diagonaldominanter Regelstrecken	276
	6.3.4. Beispiel	277
	6.3.5. Einschätzung des Verfahrens	287
6.4.	Direktes Nyquist-Verfahren	291
	6.4.1. Grundgedanken des Verfahrens	
	6.4.2. Voraussetzungen und Grundlagen	291
	6.4.2.1. Voraussetzungen	291
	6.4.2.2. Stabilitätsprüfung anhand der Gershgorin-Bänder	292
	6.4.2.3. Zur Anwendung des Ostrowski-Theorems	293
	6.4.3. Erläuterung des Entwurfs	293
	6.4.3.1. Verfahren zur Erreichung von Diagonaldominanz	293
	6.4.3.2. Entwurf auf der Basis der Gershgorin-Bänder	294
	6.4.4. Beispiel	295
	6.4.5. Einschätzung des Verfahrens	313
6.5.	Sequentielles Rückführdifferenzverfahren	314
	6.5.1. Grundgedanken des Verfahrens	314
	6.5.2. Voraussetzungen und Grundlagen	314
	6.5.2.1. Voraussetzungen	314
	6.5.2.2. Stabilitätsanalyse für Teilsysteme	315
	6.5.2.3. Approximation der Ersatzregelstrecken für hohe Verstärkung	317
	6.5.2.4. Aus den Entwurfszielen resultierende Grundforderungen an die Rückführdifferenzmatrix des Regelkreises	317
	6.5.2.5. Entwurf bei nichtminimalphasigen Teilregelstrecken	319
	6.5.3. Sequentieller Entwurf der Hauptregelkreise	321
	6.5.4. Beispiel	322
	6.5.5. Einschätzung des Verfahrens	325
6.6.	Literatur	327
	Sachwörterverzeichnis	

Verzeichnis wichtiger Formelzeichen

$A = (a_{ij})$	Systemmatrix	K_y	Ausgangsrückführmatrix
$A(p)$	Polpolynom	K_z	Zyklisierungsmatrix
A_i	Parametermatrizen	$K(p)$	Kompensatormatrix (Eingangskompensator)
$B = (b_{ij})$	Eingangsmatrix	L	Eingangsmatrix eines Beobachters
$B(p)$	Nullstellenpolynom	$L(p)$	Kompensatormatrix (Ausgangskompensator); Zählermatrix von $G(p)$; unimodulare Transformationsmatrix
B_i	Parametermatrizen	M	Meßmatrix; quadratische Matrix; Matrix allgemein
$C = (c_{ij})$	Ausgangsmatrix; Kompensatormatrix	$M(p)$	Smith-McMillan-Form
D	Systemmatrix eines Systems mit Rückführung; Durchgangsmatrix; Systemmatrix eines speziellen Kompensators	N	Rechenglied; Teil der Regeleinrichtung; Matrix allgemein
$D, D(p)$	diagonale Gewichtsmatrix; diagonale Skalierungsmatrix	$N(p)$	Übertragungsmatrix eines Entkopplungssystems
E	Eingangsmatrix eines Kompensators	$N_i(p)$	Nenner der Diagonalelemente der Smith-McMillan-Form
F	Zustandsreglermatrix	Q	Wichtungsmatrix im Gütekriterium; Beobachtbarkeitsmatrix
$F(p)$	Rückführdifferenzmatrix	$Q(p)$	Polynommatrix
$F_g(p)$	Übertragungsmatrix des geschlossenen Systems	R	Zustandsrückführmatrix; Wichtungsmatrix im Gütekriterium; Beobachtermatrix; Modalmatrix des Zustandsraummodells
$F_o(p)$	Übertragungsmatrix des offenen Regelkreises	$R(p) = (r_{ij}(p))$	Reglerübertragungsmatrix; unimodulare Transformationsmatrix
$F_r(p)$	Rückführdifferenzmatrix bei teilweise geöffneten Kreisen	S	Steuerbarkeitsmatrix; Matrix fiktiver Steuervektoren; Beobachtermatrix
F_i	Reglermatrizen	$S(p)$	Smith-Form
$F_w(p)$	Führungsübertragungsmatrix	$S_{res}(p)$	resultierende Strecke
$G(p) = (g_{ij}(p))$	Übertragungsmatrix		
$G_K(p)$	resultierende Regelstrecke mit Kompensator		
$G(j\omega)$	Frequenzgangmatrix		
$H(p)$	Übertragungsmatrix einer Rückkopplung		
I	Einheitsmatrix		
J	Eingangsmatrix eines Beobachters		
K	Zustandsrückführmatrix; Diagonalmatrix von P-Reglern; Verstärkungsmatrix		

T	reguläre Transformationsmatrix; Matrix in der Beobachtergleichung; Tasterperiode; Zeitintervall	$g_{ij}(p)$ $g_i(p)$	Elemente von $G(p)$ charakteristische Übertragungsfunktionen zu $G(p)$
T(d)	Systemmatrix des verallgemeinerten Zustandsmodells	$h_i(p)$	Übertragungsfunktionen skalarer Rückführungen
U	Eigenvektormatrix zu einer Übertragungsmatrix; reguläre Matrix	j k	imaginäre Einheit $j = \sqrt{-1}$ Verstärkungsfaktor; Konstante; Laufvariable; $\dim \xi$
U(d)	Steuermatrix des verallgemeinerten Zustandsmodells	\underline{k}^T	Zeilenvektor; Regelvektor
V	Vorfiltermatrix; Systemmatrix von Störsignalmodellen; duale Eigenvektormatrix zu einer Übertragungsmatrix	l	Ordnung eines Kompensators
V(d)	Beobachtungsmatrix des verallgemeinerten Zustandsmodells	m	Zahl der Eingänge, $\dim \underline{u}$; Zahl der Regelgrößen, $\dim G(p)$
V(p)	Modalmatrix $W^{-1}(p)$	n	Systemordnung, $\dim \underline{x}$
W	Systemmatrix eines Beobachters; Systemmatrix von Führungssignalmodellen	n_F	Zahl der Umschlingungen des kritischen Punktes oder des Ursprungs durch $F(p)$
W(p)	Modalmatrix zu $G(p)$	n_g	Zahl der Pole des geschlossenen Kreises
W(d)	Durchgangsmatrix des verallgemeinerten Zustandsmodells	n_o	Zahl der Pole des offenen Kreises
Z(p)	Übertragungsmatrix	p	komplexe Variable
$Z_i(p)$	Zähler der Diagonalelemente der Smith-McMillan-Form	P_i	Pol
a_i	Koeffizienten der charakteristischen Gleichung eines unregulierten Systems	\underline{q} r	Spaltenvektor Zahl der Ausgänge, $\dim \underline{y}$; Zahl der Meßgrößen
\underline{b}_i	i-te Spalte von B	\underline{r}	Rechtseigenvektor
\underline{c}_i^T	i-te Zeile von C	r_i	Koeffizienten der charakteristischen Gleichung eines geregelten (rückgeführten) Systems
d	Differentialoperator	$r_i(p)$	Teilreglerübertragungsfunktion
d_i, d'_i	Radialen der Gershgorin-Kreise; Koeffizienten	\underline{s}_i	fiktiver Steuervektor; speziell definierter Zustandsvektor
d(p)	kleinster gemeinsamer Hauptnenner der Elemente von $G(p)$	$s_i(p)$	Elementarteiler von $Q(p)$
\underline{e}	Fehlervektor; Einheitsvektor	t	Zeit
\underline{e}_i	Spalte einer Transformationsmatrix	t_i^T	Zeilen von T
$f_{oi}(p)$	charakteristische Übertragungsfunktionen des offenen Kreises	\underline{u}	Vektor der Eingangsgrößen (Stellgrößen)
$f_i(p)$	charakteristische Übertragungsfunktionen zu $F(p)$		

\underline{v}	Vektor fiktiver Stellgrößen; Zustandsvektor eines zusam- mengesetzten Systems	δ_i	Realteil eines konjugiert- komplexen Eigenwert- paars
$\underline{v}_i^T(p)$	dualer Eigenvektor einer Übertragungsmatrix	$\alpha(p)$	Koppelfaktor
\underline{w}	Sollwert	λ	komplexe Zahl; Eigenwert; Lagrangescher Parameter
w_i	Veränderung des Imaginär- teils eines Eigenwerts; Eigenwert von W	λ_i	Eigenwert eines unregel- ten Systems
$\underline{w}_i(p)$	Eigenvektor zu G(p)	λ'_i	vorgegebener Eigenwert; Eigenwert eines geregel- ten Systems (Pol)
\underline{x}	Zustandsvektor	φ	Phasenwinkel
$\hat{\underline{x}}$	durch einen Beobachter rekon- struierter Zustandsvektor	μ	skalare fiktive Stellgröße; Index
\underline{y}	Vektor der Ausgangsgrößen	μ_i	Koeffizienten
\underline{z}	Vektor der Störgrößen; Zustandsvektor der Diagonal- form der Systemgleichungen: Beobachterzustand	ν_i	Beobachtbarkeitsindex
z	e^{pT}	ν_μ	Polordnung
$\underline{z}(p)$	Spaltenvektor von Zähler- polynomen	ν	Ordnung eines Systems; Index; Koeffizient
\underline{z}_i^T	Zerlegungsvektor	π	Parameter
$\Lambda = \text{diag}(\lambda_i)$	Diagonalmatrix der Eigen- werte	$\underline{\rho}_i^T$	Linkseigenvektor
$\Gamma(g, p)$	charakteristische Funktion	$\underline{\xi}$	transformierter Zustands- vektor; Zustandsvektor von Systemerweiterungs- strukturen; verallgemei- nerter Zustandsvektor
$\Delta(g, p)$	charakteristische Funktion	τ	Integrationsvariable; Lauf- variable
Φ_i	Verkürzungsfaktor für Ostrowski-Kreise	ω	Kreisfrequenz
α	Zeitkonstante; Realteil	ω_i	Imaginärteil eines konju- giert-komplexen Eigen- wertpaars
$\alpha(p)$	Polynom	$\text{adj}(\)$	adjungierter Ausdruck
β	Imaginärteil	$\text{arc}\{\alpha(p)\}$	Winkel von $\alpha(p)$
$\beta(p)$	Polynom	C^g	generalisierte Inverse der (r,n)-Matrix C
$\left. \begin{matrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{matrix} \right\}$	Koeffizienten	C^+	Pseudoinverse der (r,n)- Matrix C
β_i^T	Zeilenvektoren	$\det(\)$	Determinante
γ	Konstante; Gewichtungsfaktor	$\text{eig } A$	Eigenwerte von A
$\gamma_i(p)$	Teilübertragungsfunktion	$\text{Im} \cdot$	Imaginärteil von
$\underline{\gamma}_i$	Zeilenvektoren		
δ	Grad der Übertragungs- matrix		

rang C	Rang der Matrix C	Indizes	
Re •	Realteil von	g	geschlossenes System
	euklidische Norm	o	offenes System; resultie- rendes System einer Zu- sammenschaltung
$\hat{\quad}$	kennzeichnet allgemein eine transformierte Größe bzw. kanonische Form (z. B. \hat{A} , \tilde{x} usw.)	r_x	Zustandsrückführung
\sim		r_y	Ausgangsrückführung
$\hat{G}(p)$	$= G^{-1}(p)$	soll	Sollwert; Führung
\hat{g}_{ij}	Elemente der inversen Über- tragungsfunktionsmatrix		
\bar{p}	konjugiert komplexer Wert zu p		
\underline{x}^T	transponierter Vektor zu \underline{x}		
$F^*(j\omega)$	konjugiert-komplexe trans- ponierte Matrix zu $F(j\omega)$		