

Programmierbare Taschenrechner können heute auch zur Lösung komplexerer Aufgaben aus dem naturwissenschaftlich-technischen Bereich verwendet werden. Als Beispiel wird ein Programm zur Berechnung von Ausgleichsvorgängen in elektrischen Maschinen vorgestellt. Die mathematische Formulierung führt auf ein nicht-lineares Differentialgleichungssystem, dessen numerische Lösung den Kern des vorgestellten Programms bildet. Das Niveau ist wegen der notwendigen Mathematik hoch. Interessant ist jedoch auch für Nicht-Fachleute das systematische Vorgehen bei der Programmierung von Aufgaben, die vor nicht langer Zeit nur auf großen Rechnern laufen konnten.

Karl Haidinger

Anwendung programmierbarer Taschenrechner zur Berechnung von Ausgleichsvorgängen in elektrischen Maschinen

Besondere Bedeutung auf dem Gebiet der elektrischen Maschinen hat in den letzten Jahren die Vorausberechnung dynamischer Vorgänge gewonnen. Als wertvolles Mittel steht hier die *Raumzeigertheorie* zur Verfügung.

Das Maschinenverhalten wird durch ein System von Differentialgleichungen beschrieben, wobei allerdings eine analytische Lösung nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich ist. Bei kleineren Asynchronmaschinen liefert die Rechnung unter solchen Voraussetzungen meist nur noch ein sehr idealisiertes Bild des tatsächlich ablaufenden Vorganges, da es zu einer starken Wechselwirkung zwischen dem elektrischen und dem mechanischen Vorgang kommt. Bei Berücksichtigung von Drehzahländerungen während des Ausgleichsvorganges gelingt eine Lösung des dann nichtlinearen Differentialgleichungssystems i.A. nur mehr durch Anwendung numerischer Methoden.

Aus diesem Grund war die Beschäftigung mit solchen Aufgaben bisher nur möglich, wenn eine Rechenanlage oder ein Tischrechner verfügbar war. Heute kann die numerische Integration der Differentialgleichungssysteme bereits durch die programmierbaren Taschenrechner der letzten Generation (TI-59, HP-41C) erfolgen.

1 Raumzeigergleichungen der Asynchronmaschine

Hinsichtlich der Raumzeigertheorie elektrischer Maschinen sei auf [1] verwiesen. Die folgenden, sehr kurz gefaßten Erörterungen können lediglich ein gewisses Verständnis für das hier beschriebene Rechenprogramm vermitteln.

1.1 Verwendung normierter Größen

Als Bezugsgrößen werden verwendet:

- Die Amplitude der Statornennspannung (Strangspannung) $\sqrt{2} U_N$ für alle Spannungen.
- Die Amplitude des Statornennstromes (Strangstrom) $\sqrt{2} I_N$ für alle Ströme.
- Die zur Nennspannung bei Nennfrequenz f_N gehörige Flußverkettung $\sqrt{2} U_N / \omega_N$ für alle Flußverkettungen ($\omega_N = 2 \pi f_N$).
- Die Impedanz U_N / I_N für alle Impedanzen.
- Das $1/2\pi$ -fache der Periodendauer bei Nennfrequenz f_N für die Zeit (die Zeit wird daher durch einen Winkel $\tau = \omega_N t$ gemessen).
- Die Nennscheinleistung $3 U_N I_N$ für alle Leistungen.

– Das der Nennscheinleistung und Synchrondrehzahl entsprechende Drehmoment für alle Drehmomente.

1.2 Zusammenfassung der normierten Stranggrößen zu komplexen Raumzeigern

Aus drei Strangströmen der Statorwicklung mit den normierten Augenblickswerten i_a, i_b und i_c wird ein komplexer Raumzeiger gebildet:

$$\underline{i}_S = \frac{2}{3} (i_a + \underline{a}i_b + \underline{a}^2i_c); \quad \underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos \frac{2\pi}{3} + j \sin \frac{2\pi}{3}$$

Analog werden komplexe Raumzeiger für den Rotorstrom (\underline{i}_R), für den Magnetisierungsstrom ($\underline{i}_M = \underline{i}_S + \underline{i}_R$), sowie für Stator- und Rotorflußverkettungen ($\underline{\psi}_S, \underline{\psi}_R$) und Stator- und Rotorspannungen ($\underline{u}_S, \underline{u}_R$) festgelegt.

1.3 Raumzeiger in einem bewegten Koordinatensystem

Nach Fig. 1 erfolgt die Umrechnung eines Raumzeigers \underline{A} von einem feststehenden Koordinatensystem S (statorfest) auf ein mit beliebiger Winkelgeschwindigkeit ω_K rotierendes Koordinatensystem K durch:

$$\underline{A}_{(K)} = \underline{A}_{(S)} e^{-j\delta} \rightarrow \underline{A}_{(S)} = \underline{A}_{(K)} e^{j\delta}$$

Da sowohl $\underline{A}_{(S)}$ als auch δ Funktionen der bezogenen Zeit τ sein können ist bei der Differentiation die Produktregel zu beachten:

$$\frac{d\underline{A}_{(S)}}{d\tau} = e^{j\delta} \frac{d\underline{A}_{(K)}}{d\tau} + j \frac{d\delta}{d\tau} e^{j\delta} \underline{A}_{(K)} = e^{j\delta} \left(\frac{d\underline{A}_{(K)}}{d\tau} + j\omega_K \underline{A}_{(K)} \right)$$

1.4 Normierte Raumzeigergleichungen der Asynchronmaschine

$$\underline{u}_S = r_S \underline{i}_S + \frac{d\underline{\psi}_S}{d\tau} + j\omega_K \underline{\psi}_S \tag{1}$$

$$\underline{u}_R = r_R \underline{i}_R + \frac{d\underline{\psi}_R}{d\tau} + j(\omega_K - \omega_m) \underline{\psi}_R \tag{2}$$

$$\underline{\psi}_S = x_S \underline{i}_S + x_H \underline{i}_R \tag{3}$$

$$\underline{\psi}_R = x_H \underline{i}_S + x_R \underline{i}_R \tag{4}$$

$$\frac{d\omega_m}{d\tau} = \frac{1}{\tau_m} [-\text{Im} \{ \underline{i}_S^* \underline{\psi}_S \} - m_L] \tag{5}$$

Die Gleichungen (1) und (2) sind durch Transformation der komplexen Spannungsgleichungen für den Stator bzw. den Rotor auf ein mit der Winkelgeschwindigkeit ω_K rotierendes Koordinatensystem ent-

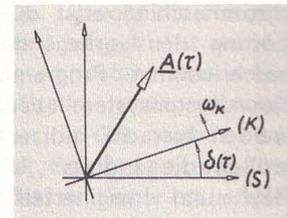


Fig. 1

standen. Die Gleichungen (3) und (4) zeigen den Zusammenhang zwischen Flußverkettungen und Strömen. In der Bewegungsgleichung (5) wird das von der Maschine entwickelte Moment durch $m_{el} = -\text{Im} \{ \underline{i}_S^* \underline{\psi}_S \}$ dargestellt.¹⁾

Die Elimination der Ströme mit Hilfe der Flußverkettungsgleichungen (3) und (4) und die Aufspaltung der komplexen Gleichungen in Real- und Imaginärteil liefert schließlich:

$$\frac{d\underline{\psi}_{S,Re}}{d\tau} = -\alpha_S \underline{\psi}_{S,Re} + \omega_K \underline{\psi}_{S,Im} + \alpha_{SH} \underline{\psi}_{R,Re} + u_{S,Re}$$

$$\frac{d\underline{\psi}_{S,Im}}{d\tau} = -\omega_K \underline{\psi}_{S,Re} - \alpha_S \underline{\psi}_{S,Im} + \alpha_{SH} \underline{\psi}_{R,Im} + u_{S,Im}$$

$$\frac{d\underline{\psi}_{R,Re}}{d\tau} = \alpha_{RH} \underline{\psi}_{S,Re} - \alpha_R \underline{\psi}_{R,Re} + (\omega_K - \omega_m) \underline{\psi}_{R,Im} + u_{R,Re}$$

$$\frac{d\underline{\psi}_{R,Im}}{d\tau} = \alpha_{RH} \underline{\psi}_{S,Im} - (\omega_K - \omega_m) \underline{\psi}_{R,Re} - \alpha_R \underline{\psi}_{R,Im} + u_{R,Im}$$

$$\frac{d\omega_m}{d\tau} = \frac{y_H}{\tau_m} (\underline{\psi}_{S,Im} \underline{\psi}_{R,Re} - \underline{\psi}_{S,Re} \underline{\psi}_{R,Im}) - \frac{m_L}{\tau_m}$$

Die Annahme eines Kurzschlußläufers (bzw. kurzgeschlossenen Schleifringläufers) führt auf $\underline{u}_R = u_{R,Re} + j u_{R,Im} = 0$. Der Statorspannungsraumzeiger $\underline{u}_S = u_{S,Re} + j u_{S,Im}$ wird durch die an den Klemmen der Statorwicklung liegenden Spannungen bestimmt.

Für die Winkelgeschwindigkeit des Bezugskordinatensystems sind drei Spezialfälle von Bedeutung:

- $\omega_K = 0$ statorfestes Koordinatensystem
- $\omega_K = \omega_m$ rotorfestes Koordinatensystem
- $\omega_K = \omega_S$ drehfeldfestes Koordinatensystem

Während bei der Behandlung der Synchronmaschine wegen der magnetischen Achsigkeit praktisch nur das rotorfeste Koordinatensystem verwendet wird, ist die Wahl des Koordinatensystems für die Asyn-

¹⁾ Der zu \underline{i}_S konjugiert komplexe Zeiger wird durch einen hochgestellten Stern gekennzeichnet.

chronmaschine eher durch Rechenvorteile bei der Lösung der vorliegenden Aufgabe bestimmt. Im beschriebenen Programm wird das drehfeldfeste Koordinatensystem verwendet (für Statorgrößen werden hier die Indizes „X“ und „Y“, für Rotorgrößen die Indizes „U“ und „V“ verwendet um Real- und Imaginärteil der komplexen Größe zu kennzeichnen).

$$\frac{d\psi_X}{d\tau} = -\alpha_S \psi_X + \omega_S \psi_Y + \alpha_{SH} \psi_U + u_X$$

$$\frac{d\psi_Y}{d\tau} = -\omega_S \psi_X - \alpha_S \psi_Y + \alpha_{SH} \psi_V + u_Y$$

$$\frac{d\psi_U}{d\tau} = \alpha_{RH} \psi_X - \alpha_R \psi_U + (\omega_S - \omega_m) \psi_V$$

$$\frac{d\psi_V}{d\tau} = \alpha_{RH} \psi_Y - (\omega_S - \omega_m) \psi_U - \alpha_R \psi_V$$

$$\frac{d\omega_m}{d\tau} = \frac{\gamma_H}{\tau_m} (\psi_Y \psi_U - \psi_X \psi_V) - \frac{m_L}{\tau_m}$$

2 Die Integration des Differentialgleichungssystems (Verfahren von HEUN)

Für ein gegebenes Differentialgleichungssystem

$$\dot{X}_1 = f_1(\tau, X_1, X_2, \dots, X_n)$$

$$\dot{X}_2 = f_2(\tau, X_1, X_2, \dots, X_n)$$

⋮

$$\dot{X}_n = f_n(\tau, X_1, X_2, \dots, X_n)$$

wird hier im Gegensatz zum oft verwendeten RUNGE-KUTTA-Verfahren die Schrittweite h nicht weiter unterteilt sondern nur der Mittelwert der Ableitungen am Beginn und am Ende des Schrittweitenintervalls verwendet:

$$f_{i1} = f_i(\tau_0, X_{10}, X_{20}, \dots, X_{n0}) \quad i = 1 \dots n$$

$$X_{i1} = X_{i0} + h f_{i1}$$

$$f_{i2} = f_i(\tau_0 + h, X_{11}, X_{21}, \dots, X_{n1})$$

$$f_{im} = \frac{f_{i1} + f_{i2}}{2}$$

$$X_i(\tau_0 + h) = X_i(\tau_0) + h f_{im}$$

Sehr einfache Programme liefert dieses Verfahren in der „Predictor-Corrector-Form“, die unmittelbar aus der letzten Gleichung zu gewinnen ist:

$$\begin{aligned} X_i(\tau_0 + h) &= X_i(\tau_0) + h \frac{f_{i1} + f_{i2}}{2} \\ &= X_i(\tau_0) + h f_{i1} + \frac{h}{2} (-f_{i1} + f_{i2}) \end{aligned}$$

D-O-H		0.	14
		0.	15
.0523598776	00	75.	16
0.	01	0.	17
0.	02	0.03	18
20.	03	0.04	19
0.	04	3.	20
1.	05	3.	21
0.	06	0.0667	22
1.	07	0.	23
0.	08	0.	24
0.	09	0.	25
0.	10	0.	26
0.	11	0.	27
0.	12	0.	28
0.	13	0.	29

Fig. 2

3 Beschreibung des Programmes D-O-H

Das Programm wurde für einen TI-59 mit angeschlossenem Drucker PC 100 formuliert und dient zur Berechnung von Ausgleichsvorgängen in netzgespeisten Asynchronmaschinen unter Verwendung des drehfeldfesten Koordinatensystems, ohne Berücksichtigung der Schlupfabhängigkeit der Rotorimpedanz wobei das Verfahren von HEUN zur numerischen Integration verwendet wird.

Speicherbereichsverteilung: 719.29 (3 Op 17)

Das Programm wird durch „A“ gestartet und listet zunächst den Inhalt der Datenregister DR 00 bis DR 29 auf (Fig. 2).

DR 00	h	Schrittweite (z. B. $\pi/60 = 0,0523 \dots$)
DR 01	τ	Zeit
DR 03	N	Zahl der Integrationsschritte zwischen den ausgewerteten Zeitpunkten (Ausgaben am Drucker)
DR 05	u	Spannung des Speisernetzes ($u = 1$)
DR 07	ω_S	Kreisfrequenz des Speisernetzes ($\omega_S = 1$)
DR 16	τ_m	mechanische Anlaufzeitkonstante
DR 17	m_L	Lastmoment
DR 18	r_S	Statorwiderstand
DR 19	r_R	Rotorwiderstand
DR 20	x_S	Statorreaktanz
DR 21	x_R	Rotorreaktanz
DR 22	σ	Streuungsfaktor ($\sigma = 1 - \frac{x_H^2}{x_S x_R}$)
DR 24	ψ_X	Realteil der Statorflußverkettung
DR 25	ψ_Y	Imaginärteil der Statorflußverkettung
DR 26	ψ_U	Realteil der Rotorflußverkettung
DR 27	ψ_V	Imaginärteil der Rotorflußverkettung
DR 28	ω_m	mechanische Winkelgeschwindigkeit des Rotors

.0523598776	00	4.997501249	15
0.	01	.0643727824	16
0.	02	0.	17
20.	03	0.03	18
0.	04	0.04	19
1.	05	3.	20
0.	06	3.	21
1.	07	0.0667	22
0.	08	0.	23
.1499250375	09	0.	24
0.19990005	10	0.	25
.1448387603	11	0.	26
.1931183471	12	0.	27
4.827958677	13	0.	28
4.997501249	14	0.	29

Fig. 3

Ist die Änderung einzelner Werte erforderlich (andere Anfangsbedingungen), so können diese neuen Werte in den zugehörigen Datenregistern gespeichert werden. Danach kann zur Kontrolle das Programm wieder mit „A“ gestartet werden. Anschließend erfolgt über „R/S“ die Ermittlung der für die Rechnung benötigten Werte ($\alpha_S, \alpha_R, \alpha_{SH}$, usw.) die in der folgenden Datenregistrauflistung in DR 09 bis DR 17 zu erkennen sind (Fig. 3). DR 18 bis DR 22 werden nun nicht mehr benötigt und bei der durch „R/S“ zu startenden numerischen Integration als Speicher für Zwischenergebnisse verwendet. Nach jeweils N Integrationsschritten werden die Rechenergebnisse in der unten angegebenen Reihenfolge ausgedruckt:

τ	Zeit
ψ_X	Realteil der Statorflußverkettung
ψ_Y	Imaginärteil der Statorflußverkettung
ψ_U	Realteil der Rotorflußverkettung
ψ_V	Imaginärteil der Rotorflußverkettung
ω_m	mechanische Winkelgeschwindigkeit des Rotors
m_{el}	von der Maschine entwickeltes Drehmoment
i_X	Realteil des Statorstromes
i_Y	Imaginärteil des Statorstromes
i_a	} Strangströme in der Statorwicklung
i_b	
i_c	
i_U	Realteil des Rotorstromes
i_V	Imaginärteil des Rotorstromes
i_{MX}	Realteil des Magnetisierungsstromes
i_{MY}	Imaginärteil des Magnetisierungsstromes
$\psi^{\circ}(\psi_S)$	} Tangentenwinkel an die von den einzelnen Raumzeigern durchlaufenen Ortskurven in Grad
$\psi^{\circ}(\psi_R)$	
$\psi^{\circ}(i_S)$	
$\psi^{\circ}(i_R)$	
$\psi^{\circ}(i_M)$	

In DR 02 wird die Anzahl der Integrationsschritte bis zur nächsten Datenausgabe gezählt (DSZ-Register)

und über „PAUSE“ angezeigt. Obwohl die Rechenergebnisse mit voller Stellenzahl ausgedruckt werden, dürfen natürlich wegen des verwendeten numerischen Verfahrens nur die ersten Stellen ernstgenommen werden. Zur Orientierung über die Genauigkeit kann eine Rechnung mit halbiertem Schrittweite empfohlen werden. Bei der Simulation länger dauernder Ausgleichsvorgänge ist es meist günstig an geeigneter Stelle die Schrittweite zu verdoppeln. Durch eine etwas sparsamere Auswertung der Rechenergebnisse kann das Programm auch auf dem wesentlich billigeren TI-58 laufen.

Die Rechenzeit pro Integrationsschritt beträgt ca. 20 Sekunden, d.h. zur Simulation eines realen Ausgleichsvorganges von 0,1 s Dauer wäre bei der im Beispiel (sehr vorsichtig) gewählten Schrittweite eine Rechenzeit von ca. 3,3 Stunden zu erwarten!

Da die Stärken der heutigen Taschenrechner sicher nicht bei der graphischen Ausgabe von Daten liegen, wurden die gewünschten Zusammenhänge händisch aufgezeichnet. Durch die Berechnung der Tangenten kann bei einer graphischen Darstellung der Raumzeigerortskurven in der komplexen Ebene schon bei Verwendung weniger Punkte eine klare Vorstellung vom Verlauf der Ortskurve gewonnen werden.

4 Anwendungsbeispiele

Aus der Vielzahl von möglichen transienten Vorgängen netzgespeister Asynchronmaschinen sei hier zunächst der Hochlauf der unbelasteten Maschine ($m_L = 0$) herausgegriffen. Das Beispiel wurde mit den Maschinenparametern und Anfangswerten nach Fig. 2 gerechnet. Die ersten vier Druckerausgaben sind in Fig. 4 wiedergegeben ($\Delta\tau = \pi = 3,14159 \dots$ entspricht der realen Zeitdauer $\Delta t = 0,01$ s). Figuren 5 und 6 enthalten den Drehmoment- und Drehzahlverlauf bzw. den Verlauf der Raumzeigerortskurven. Der Endzustand dieses Anlaufvorganges (leerlaufende Asynchronmaschine) stellt gleichzeitig den Ausgangszustand für das folgende Beispiel dar, in dem die Reaktion der Maschine auf einen Lastmomentsprung gezeigt wird (Figuren 7 bis 10). Der Wert $m_L = 2$ liegt nur knapp unter dem Kippmoment der Maschine!

Ein weites Feld von Anwendungen der Raumzeigertheorie stellen auch die aktuellen Fragen stromrichtergespeister Drehfeldmaschinen dar. Die Speisung der Maschine durch einen Umrichter kann ja als eine Folge von periodischen Schaltvorgängen an den Strangwicklungen der Maschine gesehen werden. Durch geringfügige Änderungen im Programm ist auch die Simulation solcher Vorgänge möglich.

0.	3.713991571	.1490967103
0.	-1.994782791	-0.265035628
0.	3.584528357	59.9537591
0.	.1294632136	60.18850283
0.	-3.713991571	59.82347604
0.	-3.564487349	59.80839964
0.	1.907785681	60.01708811
0.	.1495042221	
0.	-0.08699711	3.141592654
0.	-60.02450686	.1814316967
0.	-60.04105085	-1.647779859
0.	-60.02065857	-.2242891724
0.	-60.02031384	-.4514337141
0.	-60.02721044	0.025366256
0.		2.179743998
0.	2.094395102	1.989563987
0.	.8190016308	-6.055278589
45.	???	-1.273523695
0.	0.060404104	-1.989563987
0.	???	6.238807078
0.	???	-4.249243091
0.	???	-1.996830154
0.	0.0050270177	5.69937252
0.	.7741707649	-.0072661667
1.047197551	3.801333155	-4.965700835
.8112933785		2.399756493
-.4551589003		3.801333155
.0705159519		-6.201089648
-.0579695065		-3.652236445
.0002092365		4.700665207
.0721022493		.4909761462

Fig. 4

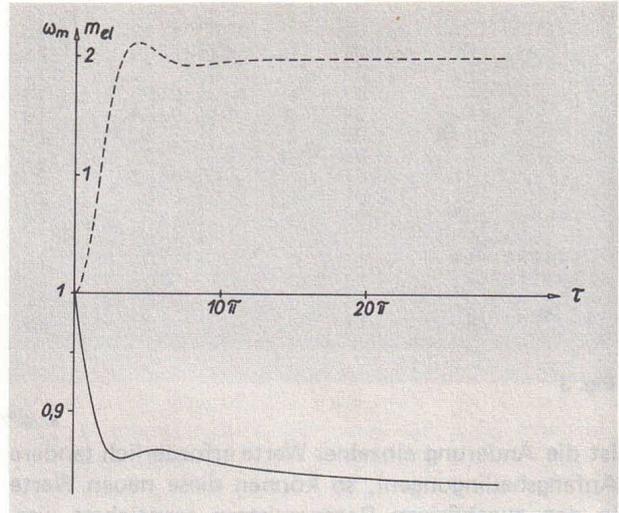


Fig. 7

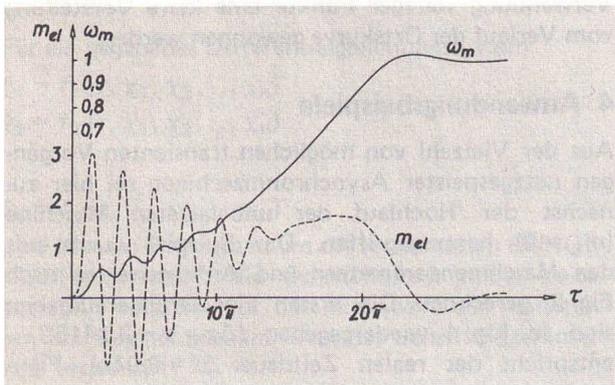


Fig. 5

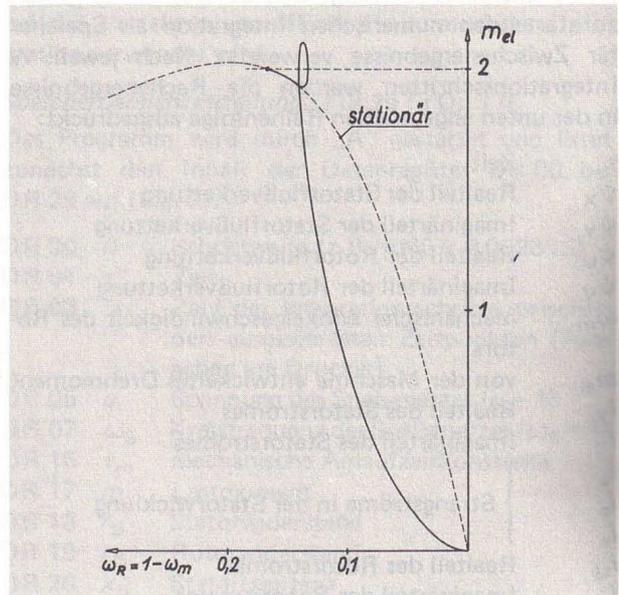


Fig. 8

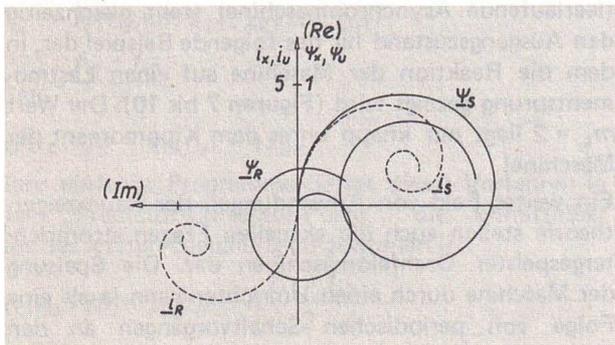


Fig. 6

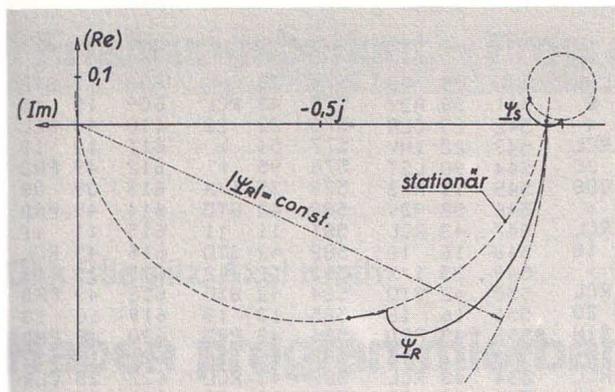


Fig. 9

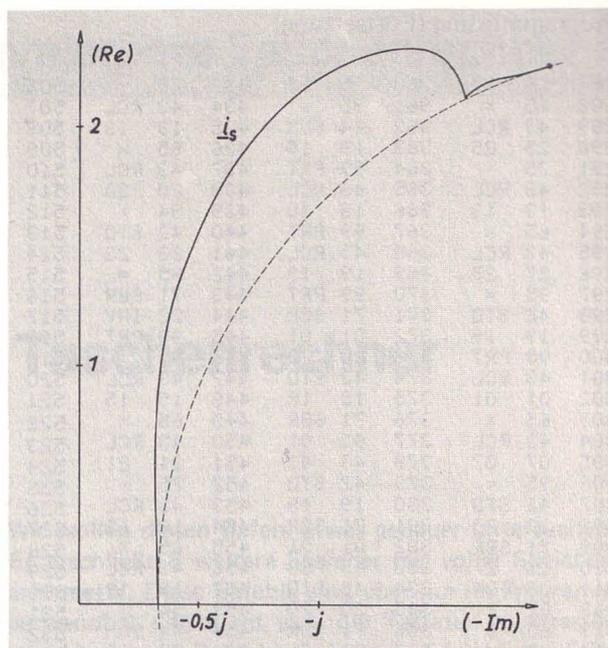


Fig. 10

5 Programmlisting

000	25	CLR	041	88	88	082	71	SBR	123	85	+	164	53	(	205	75	-	246	26	26
001	42	STD	042	71	SBR	083	02	02	124	43	RCL	165	43	RCL	206	43	RCL	247	99	PRT
002	18	18	043	00	00	084	13	13	125	11	11	166	07	07	207	10	10	248	43	RCL
003	42	STD	044	99	99	085	44	SUM	126	65	x	167	75	-	208	65	x	249	27	27
004	19	19	045	43	RCL	086	22	22	127	43	RCL	168	43	RCL	209	43	RCL	250	99	PRT
005	42	STD	046	02	02	087	92	RTN	128	26	26	169	28	28	210	27	27	251	43	RCL
006	20	20	047	66	PHU	088	49	PRD	129	85	+	170	54	)	211	54	)	252	28	28
007	42	STD	048	97	DSZ	089	18	18	130	43	RCL	171	65	x	212	92	RTN	253	99	PRT
008	21	21	049	02	02	090	49	PRD	131	07	07	172	43	RCL	213	53	(	254	43	RCL
009	42	STD	050	00	00	091	19	19	132	65	x	173	27	27	214	53	(	255	25	25
010	22	22	051	00	00	092	49	PRD	133	43	RCL	174	75	-	215	43	RCL	256	65	x
011	71	SBR	052	61	GTD	093	20	20	134	25	25	175	43	RCL	216	25	25	257	43	RCL
012	00	00	053	02	02	094	49	PRD	135	75	-	176	10	10	217	65	x	258	26	26
013	62	62	054	35	35	095	21	21	136	43	RCL	177	65	x	218	43	RCL	259	75	-
014	43	RCL	055	98	ADV	096	49	PRD	137	09	09	178	43	RCL	219	26	26	260	43	RCL
015	00	00	056	68	NDP	097	22	22	138	65	x	179	26	26	220	75	-	261	24	24
016	71	SBR	057	43	RCL	098	92	RTN	139	43	RCL	180	85	+	221	43	RCL	262	65	x
017	00	00	058	03	03	099	43	RCL	140	24	24	181	43	RCL	222	24	24	263	43	RCL
018	88	88	059	42	STD	100	18	18	141	54	)	182	12	12	223	65	x	264	27	27
019	71	SBR	060	02	02	101	44	SUM	142	92	RTN	183	65	x	224	43	RCL	265	95	=
020	00	00	061	81	RST	102	24	24	143	53	(	184	43	RCL	225	27	27	266	65	x
021	99	99	062	71	SBR	103	43	RCL	144	43	RCL	185	24	24	226	54	)	267	43	RCL
022	43	RCL	063	01	01	104	19	19	145	11	11	186	54	)	227	65	x	268	13	13
023	00	00	064	20	20	105	44	SUM	146	65	x	187	92	RTN	228	43	RCL	269	95	=
024	44	SUM	065	44	SUM	106	25	25	147	43	RCL	188	53	(	229	16	16	270	99	PRT
025	01	01	066	18	18	107	43	RCL	148	27	27	189	43	RCL	230	75	-	271	43	RCL
026	35	1/X	067	71	SBR	108	20	20	149	75	-	190	12	12	231	43	RCL	272	14	14
027	94	+/-	068	01	01	109	44	SUM	150	43	RCL	191	65	x	232	17	17	273	65	x
028	71	SBR	069	43	43	110	26	26	151	09	09	192	43	RCL	233	54	)	274	43	RCL
029	00	00	070	44	SUM	111	43	RCL	152	65	x	193	25	25	234	92	RTN	275	24	24
030	88	88	071	19	19	112	21	21	153	43	RCL	194	75	-	235	43	RCL	276	75	-
031	71	SBR	072	71	SBR	113	44	SUM	154	25	25	195	53	(	236	01	01	277	43	RCL
032	00	00	073	01	01	114	27	27	155	75	-	196	43	RCL	237	68	NDP	278	13	13
033	62	62	074	63	63	115	43	RCL	156	43	RCL	197	07	07	238	99	PRT	279	65	x
034	43	RCL	075	44	SUM	116	22	22	157	07	07	198	75	-	239	43	RCL	280	43	RCL
035	00	00	076	20	20	117	44	SUM	158	65	x	199	43	RCL	240	24	24	281	26	26
036	55	÷	077	71	SBR	118	28	28	159	43	RCL	200	28	28	241	99	PRT	282	95	=
037	02	2	078	01	01	119	92	RTN	160	24	24	201	54	)	242	43	RCL	283	42	STD
038	95	=	079	88	88	120	53	(	161	54	)	202	65	x	243	25	25	284	18	18
039	71	SBR	080	44	SUM	121	43	RCL	162	92	RTN	203	43	RCL	244	99	PRT	285	99	PRT
040	00	00	081	21	21	122	05	05	163	53	(	204	26	26	245	43	RCL	286	43	RCL

Programmlisting (Fortsetzung)

```

287 14 14 360 25 25 433 75 - 506 76 LBL 540 05 05 574 75 - 608 42 STD
288 65 x 361 95 = 434 43 RCL 507 15 E 541 98 ADV 575 43 RCL 609 15 15
289 43 RCL 362 44 SUM 435 13 13 508 53 ( 542 25 CLR 576 22 22 610 43 RCL
290 25 25 363 19 19 436 65 x 509 43 RCL 543 22 INV 577 54 ) 611 18 18
291 75 - 364 99 PRT 437 43 RCL 510 20 20 544 90 LST 578 95 = 612 49 PRD
292 43 RCL 365 43 RCL 438 20 20 511 39 CDS 545 91 R/S 579 35 1/X 613 09 09
293 13 13 366 18 18 439 54 ) 512 65 x 546 98 ADV 580 42 STD 614 49 PRD
294 65 x 367 99 PRT 440 42 STD 513 43 RCL 547 43 RCL 581 11 11 615 11 11
295 43 RCL 368 43 RCL 441 23 23 514 18 18 548 16 16 582 42 STD 616 43 RCL
296 27 27 369 19 19 442 95 = 515 75 - 549 35 1/X 583 12 12 617 19 19
297 95 = 370 99 PRT 443 71 SBR 516 43 RCL 550 42 STD 584 42 STD 618 49 PRD
298 42 STD 371 71 SBR 444 22 INV 517 20 20 551 16 16 585 13 13 619 10 10
299 19 19 372 01 01 445 99 PRT 518 38 SIN 552 49 PRD 586 49 PRD 620 49 PRD
300 99 PRT 373 20 20 446 53 ( 519 65 x 553 17 17 587 16 16 621 12 12
301 43 RCL 374 42 STD 447 43 RCL 520 43 RCL 554 43 RCL 588 43 RCL 622 25 CLR
302 01 01 375 18 18 448 15 15 521 19 19 555 20 20 589 20 20 623 22 INV
303 65 x 376 71 SBR 449 65 x 522 54 ) 556 65 x 590 65 x 624 90 LST
304 43 RCL 377 01 01 450 43 RCL 523 92 RTN 557 43 RCL 591 43 RCL 625 98 ADV
305 07 07 378 43 43 451 21 21 524 76 LBL 558 21 21 592 22 22 626 25 CLR
306 95 = 379 42 STD 452 75 - 525 11 A 559 65 x 593 95 = 627 98 ADV
307 42 STD 380 19 19 453 43 RCL 526 70 RAD 560 53 ( 594 35 1/X 628 91 R/S
308 20 20 381 71 SBR 454 13 13 527 01 1 561 01 1 595 42 STD 629 61 GTD
309 71 SBR 382 01 01 455 65 x 528 06 6 562 75 - 596 09 09 630 02 02
310 15 E 383 63 63 456 43 RCL 529 02 2 563 43 RCL 597 42 STD 631 35 35
311 99 PRT 384 42 STD 457 19 19 530 00 0 564 22 22 598 14 14 632 00 0
312 02 2 385 20 20 458 54 ) 531 03 3 565 54 ) 599 43 RCL 633 00 0
313 65 x 386 71 SBR 459 44 SUM 532 02 2 566 95 = 600 21 21 634 00 0
314 89 + 387 01 01 460 22 22 533 02 2 567 34 FX 601 65 x 635 00 0
315 55 + 388 88 88 461 55 + 534 00 0 568 65 x 602 43 RCL 636 00 0
316 03 3 389 42 STD 462 53 ( 535 02 2 569 43 RCL 603 22 22 637 00 0
317 95 = 390 21 21 463 43 RCL 536 03 3 570 22 22 604 95 = 638 00 0
318 42 STD 391 68 NOP 464 15 15 537 69 DP 571 55 + 605 35 1/X 639 00 0
319 21 21 392 68 NOP 465 65 x 538 02 02 572 53 ( 606 42 STD
320 22 INV 393 43 RCL 466 43 RCL 539 69 DP 573 01 1 607 10 10
321 44 SUM 394 19 19 467 20 20
322 20 20 395 55 + 468 75 -
323 71 SBR 396 43 RCL 469 43 RCL
324 15 E 397 18 18 470 13 13
325 99 PRT 398 95 = 471 65 x
326 43 RCL 399 71 SBR 472 43 RCL
327 21 21 400 22 INV 473 18 18
328 44 SUM 401 99 PRT 474 54 )
329 20 20 402 43 RCL 475 44 SUM
330 44 SUM 403 21 21 476 23 23
331 20 20 404 55 + 477 95 =
332 71 SBR 405 43 RCL 478 71 SBR
333 15 E 406 20 20 479 22 INV
334 99 PRT 407 95 = 480 99 PRT
335 43 RCL 408 71 SBR 481 43 RCL
336 15 15 409 22 INV 482 22 22
337 65 x 410 99 PRT 483 55 +
338 43 RCL 411 53 ( 484 43 RCL
339 26 26 412 43 RCL 485 23 23
340 75 - 413 14 14 486 95 =
341 43 RCL 414 65 x 487 71 SBR
342 13 13 415 43 RCL 488 22 INV
343 65 x 416 19 19 489 99 PRT
344 43 RCL 417 75 - 490 61 GTD
345 24 24 418 43 RCL 491 00 00
346 95 = 419 13 13 492 55 55
347 44 SUM 420 65 x 493 76 LBL
348 18 18 421 43 RCL 494 22 INV
349 99 PRT 422 21 21 495 53 (
350 43 RCL 423 54 ) 496 22 INV
351 15 15 424 42 STD 497 30 TAN
352 65 x 425 22 22 498 65 x
353 43 RCL 426 55 + 499 01 1
354 27 27 427 53 ( 500 08 8
355 75 - 428 43 RCL 501 00 0
356 43 RCL 429 14 14 502 55 +
357 13 13 430 65 x 503 89 +
358 65 x 431 43 RCL 504 54 )
359 43 RCL 432 18 18 505 92 RTN

```

Literatur

- [1] Kleinrath, H.: Stromrichtergespeiste Drehfeldmaschinen. Springer Wien, 1980.
- [2] Jordan-Engeln, G. und F. Reutter: Numerische Mathematik für Ingenieure. B.I.-Hochschultaschenbuch, 2. Aufl. 1978.
- [3] Haidinger, K.: Berechnung von Ausgleichsvorgängen in Asynchronmaschinen unter Verwendung eines elektronischen Taschenrechners. Diplomarbeit am Institut für Elektrische Maschinen der Technischen Universität Wien, 1979.

Glossar: In diesem Beitrag wird auf ein Glossar verzichtet, weil die benutzten Fachwörter ganz spezialisiert der höheren Mathematik bzw. dem Bereich elektrischer Maschinen angehören. Spezialisten haben diese Hilfe ohnehin nicht nötig. Alle anderen Leser seien auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.