

In der Programmsammlung der Jahrbuch-Ausgabe 1981 hat Günter Finckbein die Berechnung komplexer Spannungsteiler anhand einiger attraktiver Beispiele vorgestellt. Paul Vaske entwickelt nun ein Programm zur Berechnung von Frequenzgängen für elektrische Netzwerke, das in dieser Form auch in seiner Vorlesung verwendet und folgendermaßen motiviert wird: „Wenn man Rechnerprogramme weitergeben will, muß man mit einer knappen Darstellung der Grundlagen ihre Anwendungsmöglichkeiten aufzeigen und eingrenzen, die Besonderheiten des Programms herstellen, mit einer klaren Benutzeranleitung eine sofortige Anwendung und über ein Testbeispiel eine Überprüfung seiner Funktion ermöglichen.“ Interessante Programmiertechniken werden aufgezeigt und mit Beispielen Hinweise für vielseitige Einsatzgebiete gegeben.

Paul Vaske

Frequenzgänge für elektrische Netzwerke mit dem TI-59

1 Grundlagen

Viele Netzwerke lassen sich auf eine Kettenschaltung nach Fig. 1 zurückführen, die sich aus k komplexen Querwiderständen Z_{qm} und k komplexen Längswiderständen Z_{lm} zusammensetzt. Zu den oberen k Knotenpunkten kommt noch der untere Knotenpunkt 0 hinzu, so daß insgesamt $(k + 1)$ echte Knotenpunkte auftreten. Die komplexen Widerstände Z dürfen entsprechend Fig. 2 aus beliebigen Wirkwiderständen R , Induktivitäten L und Kapazitäten in Reihen-Parallelschaltungen bestehen.

Man kann die Eigenschaften eines solchen Netzwerks bestimmen, indem man eine Ausgangsspannung U_a vorgibt und ihre Kenngrößen vom Schaltungsende zum Anfang hin durchrechnet [1], [2]. Es gilt dann in rekursiver Weise für die komplexen Ströme

$$I_{m+1} = I_m (U_m / Z_{qm}) \quad (1)$$

und die komplexen Spannungen

$$U_{m+1} = U_m + Z_{lm} I_{m+1} \quad (2)$$

Es lassen sich so die komplexen Verhältnisse von Ausgangs- zu Eingangsspannung

$$U_a / U_e \quad (3)$$

von Ausgangsspannung U_a zu Eingangsstrom I_e

$$U_a / I_e \quad (4)$$

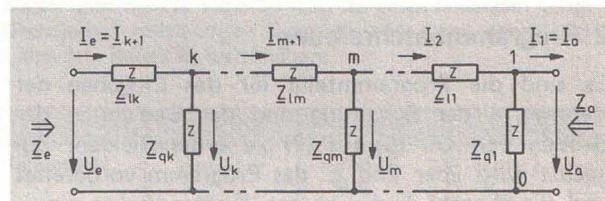


Fig. 1 Ketten-Netzwerk

sowie von Kurzschlußstrom I_{ak} am Ausgang zur Eingangsspannung

$$I_{ak} / U_e \quad (5)$$

berechnen und hieraus der komplexe Ausgangswiderstand

$$Z_a = Z_{iE} = \frac{U'_a}{U_e} \cdot \frac{U_e''}{I_{ak}} \quad (6)$$

der gleichzeitig der komplexe Innenwiderstand Z_{iE} der zugehörigen Ersatzquelle ist, sowie der komplexe Eingangswiderstand

$$Z_e = \frac{U_e}{I_e} = \frac{U_a}{I_e} \cdot \frac{U_e}{U_a} \quad (7)$$

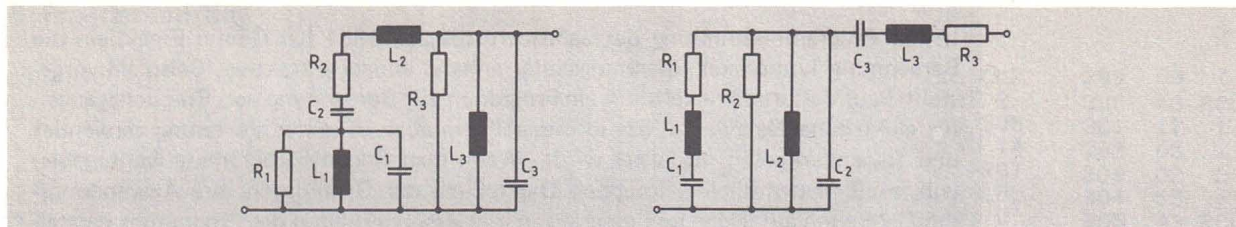


Fig. 2 Komplexe Quer- oder Längswiderstände

bestimmen. Sind Eingangsspannung \underline{U}_e oder Eingangsstrom \underline{I}_e bekannt, ist auch die komplexe Ausgangsspannung

$$\underline{U}_a = \underline{U}_e (\underline{U}_a / \underline{U}_e) = \underline{I}_e (\underline{U}_a / \underline{I}_e) = \underline{U}_{qE} \quad (8)$$

und somit auch die Quellenspannung \underline{U}_{qE} der Ersatzquelle bzw. ihr komplexer Quellenstrom

$$\underline{I}_{qE} = \underline{U}_e (\underline{I}_{ak} / \underline{U}_e) = \underline{U}_{qE} / \underline{Z}_{iE} \quad (9)$$

angebbar. Es können also die *Kennwerte von Ersatzquellen* oder *Frequenzgänge* als *Ortskurve* oder *Bodediagramm* berechnet werden.

2 Programmbeschreibung

Es sind die Programmteile für das Eingeben der Kennwerte der Schaltung und das Berechnen der Größen von Gl. (3) bis (7) zu unterscheiden. Zunächst wird über 2nd E' das Programm vorbereitet und die Anzahl k der oberen Knotenpunkte eingegeben.

Die Quer- und Längswiderstände dürfen entsprechend Fig. 2 aus Parallel- oder Reihenschaltungen von Wirkwiderstand R_i , Induktivität L_i und Kapazität C_i bestehen. Nur die Kennwerte vorhandener Bauelemente müssen mit steigender Indexzahlenfolge eingelesen werden, wobei zunächst über A bis 2nd C' eine Codezahl (s. *Tastenplan*) entsprechend der Schaltung vorgewählt und anschließend über R/S der Kennwert eingegeben wird. Das Ende des Zweiges ist über E zu signalisieren.

Auf diese Weise wird mit dem Datenregister 59 beginnend bei fallender Registernummer die Schaltung mit ihrer Konfiguration und ihren Daten vollständig gespeichert. Alle ungeraden Datenregister enthalten Codezahlen und die nächstkleineren geraden den zugehörigen Kennwert. Das Ende eines Zweiges wird in dem nächstfolgenden ungeraden Datenregister durch den Codezusatz 0.5 festgehalten. Es dürfen bis zu

$n = 22$ Bauelemente in der Schaltung enthalten sein; es müssen jeweils ein Quer- und ein Längsglied aufeinander folgen – der erste Widerstand muß ein Quer-, der letzte ein Längswiderstand sein. Gegebenenfalls muß man also die Eingabe mit sehr großen Werten (z. B. 1 EE 30) beginnen oder mit sehr kleinen Werten (z. B. 1 EE 30 +/-) beenden. Man kann bei n Bauelementen die Datenregister ab R (58 – 2n) auflisten und so die verwirklichte Schaltung über die Befehlsfolge

CLR INV 2nd Fix (58 – 2n) INV 2nd Write

überprüfen (s. *Testbeispiel*).

Nach dem Eingeben der Kreisfrequenz bzw. des Frequenzbereichs über 2nd D' sind die Berechnungsprogramme vorbereitet und über die Tasten A bis D abrufbereit. (Diese Tasten sind also doppelt belegt – s. *Tastenplan*). Während bei der Dateneingabe stets mit dem normalen Anzeigeformat gearbeitet wird, ist die Umstellung auf die Berechnungsprogramme an dem vierziffrigen Exponentialformat zu erkennen. Es werden die Größen von Gl. (3), (4), (5) und (7) unmittelbar berechnet.

Normalerweise wird der absolute Betrag ausgegeben; über 2nd D' oder 2nd Stflg 2 kann er auch in dB bestimmt werden. Der Winkel wird stets in ° berechnet. Wenn der Drucker PC-100 C angeschlossen ist, werden die Ergebnisse automatisch in Dreiergruppen in der Reihenfolge Kreisfrequenz, Betrag, Winkel ausgedruckt; ohne Drucker können die Ergebnisse über R/S abgerufen werden.

Die Quer- und Längswiderstände werden jedesmal neu anhand ihres Codes, der ein zugehöriges Unterprogramm mit indirekter Adressierung aufruft, berechnet. Die Kreisfrequenz ω darf daher beliebig und auch automatisch in einem vorgegebenen Bereich verändert werden. Für die Berechnungen in den Programmsegmenten A bis D wird die Ausgangsspannung $\underline{U}_a = 1 \text{ V}$ automatisch eingesetzt, für D außerdem der Kurzschlußstrom am Ausgang $\underline{I}_{ak} = 1 \cdot 10^{30} \text{ A}$.

Es wird das Modulprogramm ML-04 bei normaler Speicherbereichsverteilung angewendet. Die Datenregister, die Code und Wert der Schaltungselemente enthalten, können beliebig über STO-Befehle überschrieben werden. Alle Größen sind in SI-Einheiten einzugeben und werden daher auch in SI-Einheiten ausgegeben.

Tastenplan

R_p (287)	L_p (296)	C_p (303)	$\omega_A, k_\omega, \omega_E, \text{dB}$	PV, k
R_r (262)	L_r (267)	C_r (276)		ZE
$\underline{U}_a/\underline{U}_e$	$\underline{U}_a/\underline{I}_e$	\underline{Z}_e	$\underline{I}_{ak}/\underline{U}_e$	

3 Benutzeranleitung

Aufgabe	Schritt	Ziel	Eingabe	Befehle	Anzeige
Eingabe der Daten	1	Programmvorbereitung		2nd E'	59.
	2	Eingeben der Knotenzahl	k	R/S	0.5
	a	Vorbereitung Wirkwiderstand in Reihe		A	262.
	b	Eingeben des Wirkwiderstands	{R _s }	R/S	{R _r }
	a	Vorbereitung Induktivität in Reihe		B	267.
	b	Eingeben der Induktivität	{L _r }	R/S	{L _r }
	a	Vorbereitung Kapazität in Reihe		C	276.
	b	Eingeben der Kapazität	{C _r }	R/S	{C _r }
	a	Vorbereitung Wirkwiderstand parallel		2nd A'	287.
	b	Eingeben des Wirkwiderstands	{R _p }	R/S	{R _p }
	a	Vorbereitung Induktivität parallel		2nd B'	296.
	b	Eingeben der Induktivität	{L _p }	R/S	{L _p }
	a	Vorbereitung Kapazität parallel		2nd C'	303.
	b	Eingeben der Kapazität	{C _p }	R/S	{C _p }
	c	Ende eines Zweiges		E	0.5

Die Schritte a und b werden in einer aus Fig. 2 folgenden Reihenfolge nur für tatsächlich vorhandene Schaltungselemente ausgeführt. Für einen fehlenden Querwiderstand (also auch den ersten) gibt man A 1 EE 30 R/S, für einen fehlenden Längswiderstand (also auch den letzten) A 1 EE 30 +/- R/S ein. Nach jedem vollständigen Eingeben einer Quer- oder Längswiderstandskombination ist das Ende dieses Zweiges mit Schritt c, also dem Befehl E, festzuhalten.

Aufgabe	Schritt	Ziel	Eingabe	Befehle	Anzeige
Vorgeben der Kreisfrequenzwerte	1	Eingeben des Kreisfrequenz-Anfangswerts	{ ω_A }	2nd D'	{ ω_A }
	2	Eingeben des Frequenzfaktors	k_ω	R/S	k_ω
	3	Eingeben des Kreisfrequenz-Endwerts	{ ω_E }	R/S	{ ω_E }
	4	Betrag in dB		R/S	

Schritt 3 und 4 dürfen fehlen. Wenn Schritt 3 entfällt und $k_\omega = 1$ eingegeben wird, wird das System nur für ω_A durchgerechnet.

Aufgabe	Befehle	Anzeige
Berechnen des Spannungsverhältnisses $\underline{U}_a/\underline{U}_e$	A R/S R/S	$\frac{\underline{U}_a}{\underline{U}_e}$ { φ_{ae} }
Berechnen des Verhältnisses $\underline{U}_a/\underline{I}_e$	B R/S R/S	{ $\underline{U}_a/\underline{I}_e$ }
Berechnen des Eingangswiderstands \underline{Z}_e	C R/S R/S	{ \underline{Z}_e }
Berechnen des Verhältnisses $\underline{I}_{ak}/\underline{U}_e$	D R/S R/S	{ $\underline{I}_{ak}/\underline{U}_e$ }

Datenregister:

R00: Zeiger, R02 bis R04: komplexe Arithmetik mit Modulprogramm ML-04, R05: U_{mw}, U_{ew} , R06: U_{mb}, U_{eb} , R07: I_{mw}, I_{ew} , R08: I_{mb}, I_{eb} , R09: Zähler, R10: k, R11: ω_A, ω_i , R12: ω_E , R13: k_ω , R14: SBR, R15: I_{ak} , R16 bis R59: paarweise Wert (gerade Registernummer) und Code (ungerade Nr.) der Schaltungselemente – belegt ab R59.

Taschenrechner TI-59

Flags.

F1: Berechnungsprogramm (über 2nd D'), F2: Betrag in dB (über 2nd D', R/S, R/S, R/S, R/S), F3: $\underline{U}_a/\underline{I}_e$ (über B), F4: \underline{Z}_e (über C), F5: $\underline{I}_{ak}/\underline{U}_e$ (über D).

4 Testbeispiel

Für das Netzwerk von Fig. 3 sind $\underline{U}_a/\underline{U}_e$, $\underline{U}_a/\underline{I}_e$, \underline{Z}_e und $\underline{I}_{ak}/\underline{U}_a$ für $\omega = 1$ zu bestimmen.

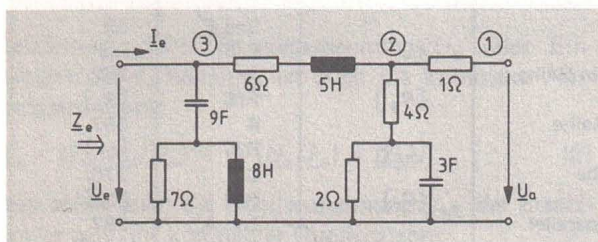


Fig. 3 Netzwerk

Eingabe	Befehle	Anzeige
3	2nd E'	59.
	R/S	0.5
	A	262.
1 EE 30	R/S E	0.5
	A	262.
1	R/S E	0.5
	2nd A'	287.
2	R/S	2.
	2nd C'	303.
3	R/S	3.
	A	262.
4	R/S E	0.5
	B	267.
5	R/S	5.
	A	262.
6	R/S E	0.5
	2nd A'	287.
7	R/S	7.
	2nd B'	296.
8	R/S	8.
	C	276.
9	R/S E	0.5
	A	262.
1 EE 30 +/-	R/S E	0.5
	2nd D'	5.000 - 01
1	R/S R/S R/S	1.000 00
	R/S	1.000 00
	A	1.000 00
	R/S	-8.712 00
	R/S	-2.951 01
2	INV 2nd Stflg	
	B	1.000 00
	R/S	1.308 00
	R/S	5.874 00
	INV 2nd Stflg	

Eingabe	Befehle	Anzeige
3	C	1.000 00
	R/S	3.103 00
	R/S	5.874 00
	INV 2nd Stflg	
4	2nd D'	4.000 00
1	R/S	1.000 00
2	R/S R/S D	1.000 00
	R/S	9.520 - 02
	R/S	-3.715 01
	R/S	2.000 00
	R/S	6.625 - 02
	R/S	-5.623 01

Druckstreifen

Speicherinhalte (Schaltungscode)

Labels

1.000 00	A	0.5	37	004	15	E
-8.712 00	DB	1. -30	38	011	75	-
-2.951 01		262.5	39	018	95	=
1.000 00	B	9.	40	033	30	TAN
1.308 00		276.	41	043	68	NOP
5.874 00		8.	42	057	85	+
1.000 00	C	296.	43	068	69	DP
3.103 00		7.	44	082	80	GRD
5.874 00		287.5	45	093	55	÷
1.000 00	D	6.	46	107	38	SIN
8.434 - 02		262.	47	113	11	A
-3.627 01		5.	48	131	42	STD
2.000 00	D	267.5	49	145	33	X²
5.945 - 02		4.	50	158	25	CLR
-5.526 01		262.	51	211	43	RCL
		3.	52	217	22	INV
		303.	53	236	44	SUM
		2.	54	255	71	SBR
		287.5	55	311	12	B
		1.	56	321	60	DEG
		262.5	57	327	54)
		1. 30	58	341	13	C
		262.5	59	351	70	RAD
				357	28	LOG
				365	39	CDS
				372	16	A'
				379	17	B'
				386	18	C'
				393	19	D'
				412	52	EE
				415	10	E'
				426	34	FX
				446	14	D
				454	24	CE

5 Beispiele zum Taschenrechnerprogramm

Es folgen einige Anwendungen, die die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten dieses Taschenrechnerprogramms andeuten und Hinweise für seine Benutzung liefern sollen. Weitere Beispiele findet man in [1] bis [4].

Resonanzfrequenzen.

Für die Schaltung von Fig. 4 sollen die Resonanzfrequenzen bestimmt werden.

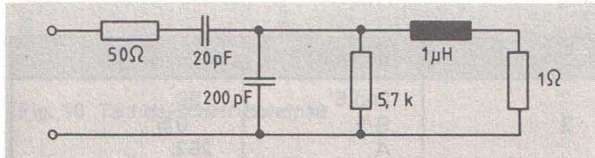


Fig. 4 Netzwerk

Das Netzwerk enthält nur einen echten oberen Knotenpunkt. Nach Eingabe der Kennwerte findet man über eine zunächst grobe Rechnung, daß der Phasenwinkel in der Nähe von $\omega = 70 \mu s^{-1}$ zweimal durch Null geht, hier also die Resonanzfrequenzen liegen müssen. Da sich die Scheinwiderstände sehr stark mit der Frequenz ändern, ist in Fig. 5 nur der Phasengang für den interessierenden Frequenzbereich dargestellt. Durch Iteration findet man die beiden Resonanzfrequenzen

$\omega_{\rho 1} = 67,7 \mu s^{-1}$ bzw. $f_{\rho 1} = 10,77$ MHz
mit $Z_{\rho 1} = 286,7 \Omega$

$\omega_{\rho 2} = 70,43 \mu s^{-1}$ bzw. $f_{\rho 2} = 11,21$ MHz
mit $Z_{\rho 2} = 2496 \Omega$

Der zugehörige Rechengang ist z. B. für $\omega_{\rho 2}$

Eingabe	Befehle	Anzeige
	2nd E'	59.
1	R/S	1.
	A	262.
1	R/S	1.
	B	267.
1 EE 6 +/-	R/S	0.000001
	2nd A'	287.
5.7 EE 3	R/S	5700.
	2nd C'	303.
2 EE 10 +/-	R/S E	0.5
	A	262.
50	R/S	50.
	C	276.
2 EE 11 +/-	R/S E	0.5
	2nd D'	5.000 -01
70.43 EE 6	R/S	7.043 06
1	R/S	1.000 00
	C	2.496 03
	R/S	3.007 -02

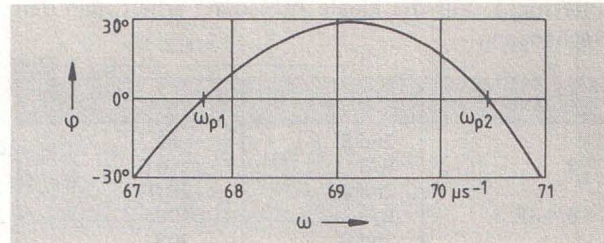


Fig. 5 Phasengang

Multiplexfilter.

Das Multiplexfilter von Fig. 6 wird in *Dolby-Schaltungen* zum Ausziehen der Pilotfrequenz $f = 19$ kHz eingesetzt. Die benötigten Bauelemente stehen mit der Toleranz $\pm 5\%$ zur Verfügung. Es soll der Verlauf der Dämpfung U_a/U_e im Frequenzbereich 17 bis 21 kHz für einige Toleranzgrenzwerte untersucht werden.

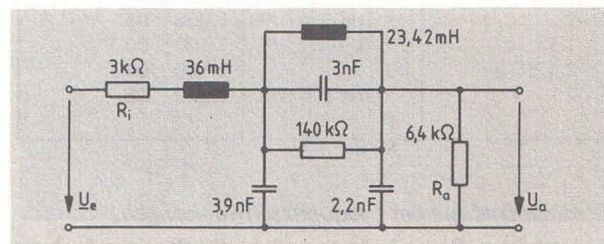


Fig. 6 Multiplexfilter mit innerem Widerstand der Spannungsquelle R_i und Ausgangswiderstand R_a

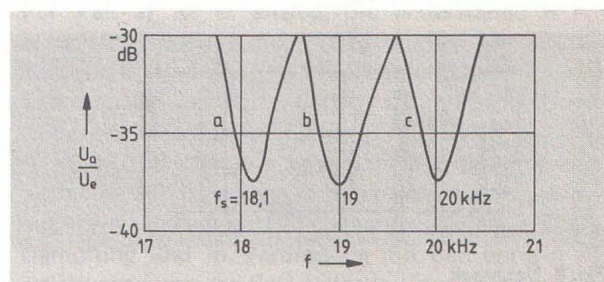


Fig. 7 Spannungsverhältnis $U_a/U_e = f(f)$

- a) L und C mit + 5 %
- b) R, L mit + 5 %, C mit - 5 %
- c) L und C mit - 5 %

Es ist anzunehmen, daß Induktivitäten und Kapazitäten sich stark auf die Siebfrequenz f_s auswirken. Daher werden die Fälle, daß diese Bauelemente gleichzeitig Größt- und Kleinstwerte sowie gegensinnige Toleranzen aufweisen, mit den Kurven in Fig. 7

Taschenrechner TI-59

untersucht. Für die ideale Auslegung erhält man den Rechengang

Eingabe	Befehle	Anzeige
2	2nd E'	59.
	R/S	0.5
	2nd A'	287.
6.4 EE 3	R/S	6400.
	2nd C'	303.
2.2 EE 9 +/-	R/S E	0.5
	2nd B'	
.02342	R/S	0.02342
	2nd A'	287.
140 EE 3	R/S	140000.
	2nd C'	303.
3 EE 9 +/-	R/S E	0.5
	C	276.
3.9 EE 9 +/-	R/S E	0.5
	B	267.
36 EE 3 +/-	R/S	0.036
	A	262.
3 EE 3	R/S E	0.5
	2nd D'	5.000 - 01
17 EE 3	x	1.700 04
2	x 2nd π = R/S	1.068 05
1.1	R/S	1.100 00
2.1 EE 3	x	2.100 04
2	x 2nd π = R/S	1.319 05
	A	

Stromaufnahme bei Frequenzschwankungen.

In welchem Bereich ändert sich die Stromaufnahme der Schaltung von Fig. 8, wenn Eingangsspannung und Frequenz $f = 5$ kHz um $\pm 10\%$ schwanken?

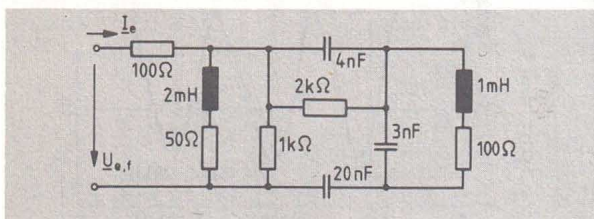


Fig. 8 Netzwerk

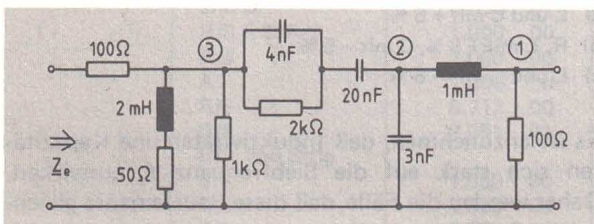


Fig. 9 Umgezeichnetes Netzwerk von Fig. 8

Das Netzwerk von Fig. 8 kann in die Schaltung von Fig. 9 umgezeichnet und so für die Berechnung mit dem Taschenrechnerprogramm vorbereitet werden. Zur Bestimmung des Eingangswiderstands bei der Frequenz $f = 4,5$ kHz erhält man daher den Rechengang

Eingabe	Befehle	Anzeige
3	2nd E'	59.
	R/S	0.5
	A	262.
100	R/S E	0.5
	B	267.
1 EE 3 +/-	R/S E	0.5
	C	276.
3 EE 9 +/-	R/S E	0.5
	2nd A'	287.
2 EE 3	R/S	2000.
	2nd C'	303.
4 EE 9 +/-	R/S	0.00000004
	C	276.
20 EE 9 +/-	R/S E	0.5
	A	262.
50	R/S	50.
	B	267.
2 EE 3 +/-	R/S	0.002
	2nd A'	287.
1 EE 3	R/S E	0.5
	A	262.
100	R/S E	0.5
	2nd D'	5.000 - 01
4.5 EE 3	x	
2	x 2nd π = R/S	2.827 04
1	R/S	1.000 00
	C	1.108 02

Die Ströme ändern sich reziprok zu den Widerständen. Man findet so für

die Frequenzen $f = 4,5 \quad 5 \quad 5,5$ kHz
 die Eingangswiderstände $Z_e = 110,8 \quad 112,1 \quad 113,5 \quad \Omega$

Daher gilt bei dem vorgegebenen Frequenzbereich und den möglichen Spannungsschwankungen für den Strombereich $0,8889 \leq I_e / I_{eN} \leq 1,113$.

Amplitudengang eines Tschebyscheff-Bandpasses.

Ein Tschebyscheff-Bandpaß soll laut Entwurfsrechnung die in Fig. 10 dargestellten Bauelemente mit den in Klammern stehenden Werten enthalten; er wird durch die Widerstände $R_i = R_a = 50 \quad \Omega$ abgeschlossen. Für den Aufbau des Filters stehen Bauelemente mit den ohne Klammern angegebenen Werten zur Verfügung. Es sollen daher a) für die ideale Auslegung und b) für die mögliche Realisierung der Amplitudengang $U_a / U_e = f(\omega)$ im Bereich $100 \text{ ms}^{-1} \leq \omega \leq 400 \text{ ms}^{-1}$ dargestellt werden.

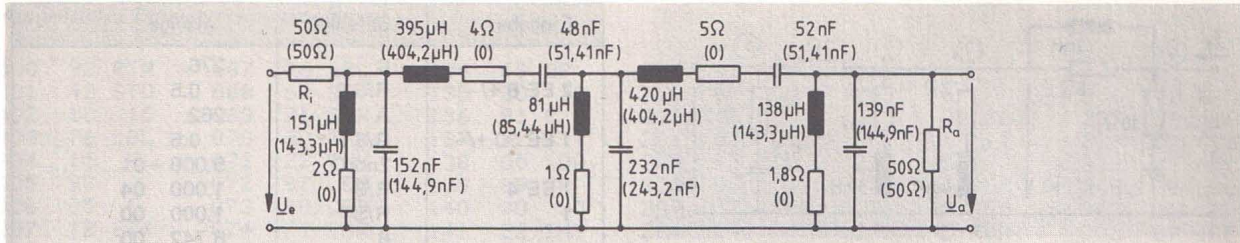


Fig. 10 Tschebyscheff-Bandpaß

Für den Fall b) erhält man den Rechengang

Eingabe	Befehle	Anzeige
3	2nd E'	59.
	R/S	0.5
	A	262.
1.8	R/S	1.8
	B	267.
138 EE 6 +/-	R/S	0.000138
50	2nd A'	287.
	R/S	50.
139 EE 9 +/-	2nd C'	303.
	R/S E	0.5
5	A	262.
	R/S	5.
	B	267.
420 EE 6 +/-	R/S	0.00042
	C	276.
	R/S E	0.5
52 EE 9 +/-	A	262.
	R/S	1.
81 EE 6 +/-	B	267.
	R/S	0.000081
	2nd C'	303.
232 EE 9 +/-	R/S E	0.5
	A	262.
	R/S	4.
4	B	267.
	R/S	0.000395
395 EE 6 +/-	C	276.
	R/S E	0.5
	A	262.
48 EE 9 +/-	R/S	2.
	B	267.
	R/S	0.000151
151 EE 6 +/-	2nd C'	303.
	R/S E	0.5
152 EE 9 +/-	A	262.
	R/S E	0.5
50	R/S E	0.5
	2nd D'	5.000 - 01
100 EE 3	R/S	1.000 05
10	y ^x	1.000 01
40	1/x = R/S	1.059 00
400 EE 3	R/S R/S	4.000 05
	A	

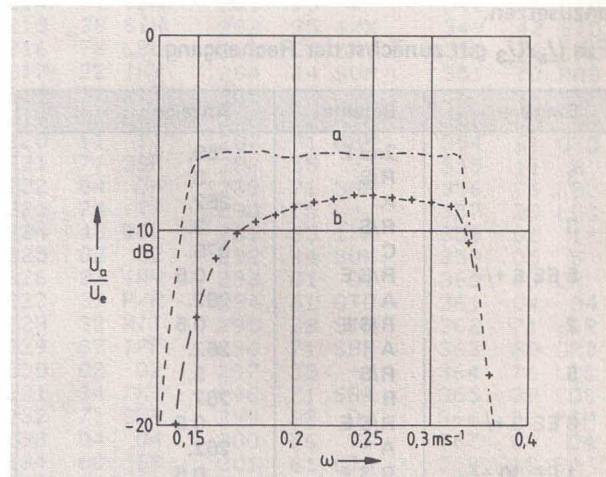


Fig. 11 Amplitudengang für Tschebyscheff-Bandpaß

Für Fall a) ist er analog; die Widerstände $R = 0$ brauchen jedoch nicht eingegeben zu werden. Die Ergebnisse sind in Fig. 11 wiedergegeben. Es zeigt sich deutlich der Riffel-Effekt, der bei a) im Durchlaßbereich zu Schwankungen $-6,152 \text{ dB} \leq U_a/U_e \leq -6,027 \text{ dB}$ bei den gerechneten Frequenzwerten führt. Im Fall b) wirken sich die verfügbaren Drosseln mit ihren schlechten Gütefaktoren in einer größeren Dämpfung und in Verbindung mit den übrigen Abweichungen von den Sollwerten in einer Verminderung der Bandbreite und einem Verschieben des Durchlaßbereichs aus.

Komplexe Teilspannungen.

In das Netzwerk von Fig. 12 fließt bei der Kreisfrequenz $\omega = 10 \text{ ms}^{-1}$ der Strom $I_e = 100 \text{ mA}$. Es sollen die komplexen Teilspannungen \underline{U}_a und \underline{U}_3 berechnet werden.

Wegen der beiden Reihenschaltungen in der Mitte der Schaltung sind hier die beiden oberen Knotenpunkte

Taschenrechner TI-59

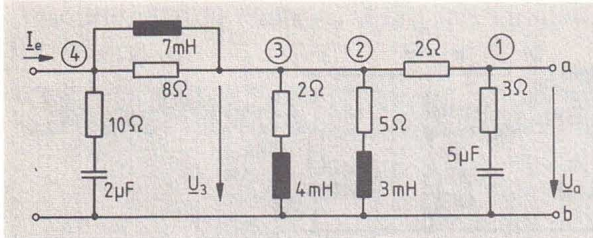


Fig. 12 Netzwerk

2 und 3 (bei dem Längswiderstand $R_{23} = 1 \cdot 10^{-30} \Omega$) anzusetzen.

Für U_a/U_3 gilt zunächst der Rechengang

Eingabe	Befehle	Anzeige
	2nd E'	59.
3	R/S	3.
	A	262.
3	R/S	3.
	C	276.
5 EE 6 +/-	R/S E	0.5
	A	262.
2	R/S E	0.5
	A	262.
5	R/S	5.
	B	267.
3 EE 3 +/-	R/S E	0.5
	A	262.
1 EE 30 +/-	R/S E	0.5
	A	262.
2	R/S	2.
	B	267.
4 EE 3 +/-	R/S E	0.5
	A	262.
1 EE 30 +/-	R/S E	0.5
	2nd D	5.000 - 01
1 EE 4	R/S	1.000 04
1	R/S	1.000 00
	A	9.810 - 01
	R/S	-5.505 00

Für die weitere Rechnung wird die vorhergehende Eingabe in folgender Weise korrigiert und so der neue Rechengang eingeleitet.

Eingabe	Befehle	Anzeige
	CLR RST INV Fix	
4	STO 10	4.
287.5	STO 43	287.5
8	STO 42	8.
41	STO 00	
	2nd B'	296.
7 EE 3 +/-	R/S E	0.5
	A	262.
10	R/S	10.

Eingabe	Befehle	Anzeige
	C	276.
2 EE 6 +/-	R/S E	0.5
	A	262.
1 EE 30 +/-	R/S E	0.5
	2nd D'	5.000 - 01
1 EE 4	R/S	1.000 04
1	R/S	1.000 00
	B	6.742 00
	R/S	4.226 00

Es ist also die Ausgangsspannung $U_a = I_e (U_a/I_e) = 100 \text{ mA} \cdot 6,742 \Omega / 4,226^\circ = 0,6742 \text{ V} / 4,226^\circ$.

Mit $U_a/U_3 = 0,981 / -5,505^\circ$ ist ferner die Teilspannung

$$U_3 = I_e \frac{U_a}{I_e} \cdot \frac{U_3}{U_a} = 100 \text{ mA} \frac{6,742 \Omega / 4,226^\circ}{0,981 / -5,505^\circ} = 0,6873 \text{ V} / 9,731^\circ$$

Anpassung.

Auf welchen an die Klemmen a und b der Schaltung in Fig. 12 anzuschließenden äußeren komplexen Widerstand Z_a wird die optimale Leistung P_{amax} übertragen? Wie groß ist sie, wenn der Eingangsstrom $I_e = 100 \text{ mA}$ beträgt?

Im Anschluß an die letzte Eingabe des vorhergehenden Beispiels findet man über INV 2nd Stflg 2 A das Spannungsverhältnis $U'_a/U'_e = 0,1306 / 75,27^\circ$ und über D außerdem $I''_{ak}/U''_e = 0,9935 \text{ S} / -5,707^\circ$. Daher beträgt der komplexe innere Widerstand der Ersatzquelle

$$Z_{iE} = \frac{U'_a}{U'_e} \cdot \frac{U''_e}{I''_{ak}} = \frac{0,1306 / 75,27^\circ}{0,9935 \text{ S} / -5,707^\circ} = 0,1315 \Omega / 80,98^\circ = (0,02062 + j 0,1299) \Omega$$

sowie mit $U_a/I_e = 6,742 \Omega / 4,226^\circ$ die Quellenspannung

$$U_{qE} = I_e (U_a/I_e) = 100 \text{ mA} \cdot 6,742 \Omega / 4,226^\circ = 674,2 \text{ mV} / 4,226^\circ$$

Auf den äußeren komplexen Widerstand $Z_a = (20,62 + j 129,9) \text{ m}\Omega$ wird somit nach [3] die verfügbare Leistung

$$P_{\text{amax}} = \frac{U_{qE}^2}{4 R_{iE}} = \frac{674,2^2 \text{ mV}^2}{4 \cdot 20,62 \text{ m}\Omega} = 5,511 \text{ W}$$

übertragen.

Aufgelistetes Taschenrechnerprogramm

000	92	RTN	067	76	LBL	134	69	DP	201	43	RCL	268	75	-	335	01	01
001	42	STD	068	69	DP	135	30	30	202	05	05	269	65	x	336	43	RCL
002	10	10	069	71	SBR	136	91	R/S	203	42	STD	270	43	RCL	337	08	08
003	76	LBL	070	30	TAN	137	72	ST*	204	01	01	271	11	11	338	61	GTO
004	15	E	071	22	INV	138	00	00	205	43	RCL	272	95	=	339	43	RCL
005	93	.	072	67	EQ	139	69	DP	206	06	06	273	44	SUM	340	76	LBL
006	05	5	073	80	GRD	140	30	30	207	87	IFF	274	02	02	341	13	C
007	72	ST*	074	71	SBR	141	22	INV	208	04	04	275	92	RTN	342	87	IFF
008	00	00	075	40	IND	142	52	EE	209	28	LDG	276	71	SBR	343	01	01
009	92	RTN	076	14	14	143	92	RTN	210	76	LBL	277	75	-	344	70	RAD
010	76	LBL	077	69	DP	144	76	LBL	211	43	RCL	278	65	x	345	02	2
011	75	-	078	30	30	145	33	X ²	212	42	STD	279	43	RCL	346	07	7
012	69	DP	079	61	GTO	146	05	5	213	02	02	280	11	11	347	06	6
013	30	30	080	69	DP	147	09	9	214	71	SBR	281	95	=	348	61	GTO
014	73	RC*	081	76	LBL	148	42	STD	215	38	SIN	282	35	1/X	349	42	STD
015	00	00	082	80	GRD	149	00	00	216	76	LBL	283	22	INV	350	76	LBL
016	92	RTN	083	43	RCL	150	43	RCL	217	22	INV	284	44	SUM	351	70	RAD
017	76	LBL	084	07	07	151	10	10	218	32	X:T	285	02	02	352	86	STF
018	95	=	085	42	STD	152	42	STD	219	43	RCL	286	92	RTN	353	04	04
019	00	0	086	03	03	153	09	09	220	11	11	287	71	SBR	354	61	GTO
020	42	STD	087	43	RCL	154	01	1	221	71	SBR	288	55	+	355	11	A
021	01	01	088	08	08	155	42	STD	222	04	04	289	71	SBR	356	76	LBL
022	42	STD	089	42	STD	156	05	05	223	74	74	290	75	-	357	28	LOG
023	02	02	090	04	04	157	76	LBL	224	43	RCL	291	35	1/X	358	01	1
024	71	SBR	091	92	RTN	158	25	CLR	225	02	02	292	44	SUM	359	05	5
025	30	TAN	092	76	LBL	159	71	SBR	226	22	INV	293	01	01	360	69	DP
026	71	SBR	093	55	+	160	95	=	227	37	P/R	294	61	GTO	361	04	04
027	40	IND	094	29	CP	161	71	SBR	228	32	X:T	295	38	SIN	362	71	SBR
028	14	14	095	43	RCL	162	68	NDP	229	87	IFF	296	71	SBR	363	80	GRD
029	69	DP	096	01	01	163	36	PGM	230	02	02	297	55	+	364	76	LBL
030	30	30	097	22	INV	164	04	04	231	34	FX	298	71	SBR	365	39	CDS
031	92	RTN	098	67	EQ	165	10	E'	232	71	SBR	299	02	02	366	36	PGM
032	76	LBL	099	38	SIN	166	36	PGM	233	04	04	300	76	76	367	04	04
033	30	TAN	100	43	RCL	167	04	04	234	68	68	301	61	GTO	368	18	C'
034	29	CP	101	02	02	168	18	C'	235	76	LBL	302	38	SIN	369	61	GTO
035	73	RC*	102	22	INV	169	44	SUM	236	44	SUM	303	71	SBR	370	22	INV
036	00	00	103	67	EQ	170	07	07	237	32	X:T	304	55	+	371	76	LBL
037	42	STD	104	38	SIN	171	43	RCL	238	71	SBR	305	71	SBR	372	16	A'
038	14	14	105	92	RTN	172	02	02	239	04	04	306	02	02	373	02	2
039	22	INV	106	76	LBL	173	44	SUM	240	68	68	307	67	67	374	08	8
040	59	INT	107	38	SIN	174	08	08	241	43	RCL	308	61	GTO	375	07	7
041	92	RTN	108	36	PGM	175	71	SBR	242	12	12	309	38	SIN	376	61	GTO
042	76	LBL	109	05	05	176	95	=	243	32	X:T	310	76	LBL	377	42	STD
043	68	NDP	110	15	E	177	71	SBR	244	43	RCL	311	12	B	378	76	LBL
044	71	SBR	111	92	RTN	178	69	DP	245	11	11	312	87	IFF	379	17	B'
045	30	TAN	112	76	LBL	179	36	PGM	246	77	GE	313	01	01	380	02	2
046	22	INV	113	11	A	180	04	04	247	52	EE	314	60	DEG	381	09	9
047	67	EQ	114	00	0	181	13	C	248	43	RCL	315	02	2	382	06	6
048	85	+	115	42	STD	182	44	SUM	249	13	13	316	06	6	383	61	GTO
049	71	SBR	116	06	06	183	05	05	250	49	PRD	317	07	7	384	42	STD
050	40	IND	117	42	STD	184	43	RCL	251	11	11	318	61	GTO	385	76	LBL
051	14	14	118	07	07	185	02	02	252	61	GTO	319	42	STD	386	18	C'
052	69	DP	119	42	STD	186	44	SUM	253	11	A	320	76	LBL	387	03	3
053	30	30	120	08	08	187	06	06	254	76	LBL	321	60	DEG	388	00	0
054	61	GTO	121	87	IFF	188	97	DSZ	255	71	SBR	322	86	STF	389	03	3
055	68	NDP	122	05	05	189	09	09	256	43	RCL	323	03	03	390	61	GTO
056	76	LBL	123	71	SBR	190	25	CLR	257	15	15	324	61	GTO	391	42	STD
057	85	+	124	87	IFF	191	01	1	258	42	STD	325	11	A	392	76	LBL
058	43	RCL	125	01	01	192	03	3	259	07	07	326	76	LBL	393	19	D'
059	05	05	126	33	X ²	193	69	DP	260	61	GTO	327	54	)	394	86	STF
060	42	STD	127	02	2	194	04	04	261	33	X ²	328	01	1	395	01	01
061	03	03	128	06	6	195	87	IFF	262	71	SBR	329	04	4	396	52	EE
062	43	RCL	129	02	2	196	05	05	263	75	-	330	69	DP	397	58	FIX
063	06	06	130	76	LBL	197	24	CE	264	44	SUM	331	04	04	398	03	03
064	42	STD	131	42	STD	198	87	IFF	265	01	01	332	43	RCL	399	91	R/S
065	04	04	132	74	SM*	199	03	03	266	92	RTN	333	07	07	400	42	STD
066	92	RTN	133	00	00	200	54	)	267	71	SBR	334	42	STD	401	11	11

Taschenrechner TI-59

402	91	R/S	428	65	x	454	24	CE
403	42	STD	429	02	2	455	01	1
404	13	13	430	00	0	456	06	6
405	92	RTN	431	95	=	457	69	DP
406	42	STD	432	48	EXC	458	04	04
407	12	12	433	01	01	459	43	RCL
408	92	RTN	434	01	1	460	15	15
409	86	STF	435	06	6	461	42	STD
410	02	02	436	01	1	462	01	01
411	76	LBL	437	04	4	463	71	SBR
412	52	EE	438	69	DP	464	85	+
413	92	RTN	439	04	04	465	61	GTD
414	76	LBL	440	71	SBR	466	39	CDS
415	10	E*	441	04	04	467	68	NOP
416	22	INV	442	72	72	468	48	EXC
417	58	FIX	443	61	GTD	469	01	01
418	25	CLR	444	44	SUM	470	69	DP
419	47	CMS	445	76	LBL	471	00	00
420	05	5	446	14	D	472	48	EXC
421	09	9	447	42	STD	473	01	01
422	42	STD	448	15	15	474	69	DP
423	00	00	449	86	STF	475	06	06
424	81	RST	450	05	05	476	69	DP
425	76	LBL	451	61	GTD	477	08	08
426	34	FX	452	11	R	478	91	R/S
427	28	LDG	453	76	LBL	479	92	RTN

Literatur

- [1] *Lange, D.:* Spektral-Transformationen. Skriptum FH Hamburg 1980
- [2] *Vaske, P., Dörrscheidt, F., Selle, D.:* Programmierbare Taschenrechner in der Elektrotechnik. Stuttgart 1981
- [3] *Vaske, P.:* Berechnung von Wechselstromschaltungen. Stuttgart 1980
- [4] *Vaske, P.:* Übertragungsverhalten elektrischer Netzwerke. Stuttgart 1977

CORVALLIS TEAM

SEMINAR & SOFTWARE SERVICE GMBH



Software + Zubehör für Hewlett Packard-Rechner
z. B. Koffer für das vollständige HP-41C System, Magnetkartenhüllen, schwarzdruckendes Thermopapier, Netzteil, Accu etc.

Professionelle Software
u. a. aus den Bereichen: Effektivzinsberechnung, Lohn-/Einkommensteuer, Statistik, Karteiverwaltung/Textverarbeitung etc.

Seminare über die Anwendung der HP-Rechner HP-41C + HP-85
Fordern Sie unsere Informationsbroschüren (Schutzgeb. 3,- in Briefm.) an
CORVALLIS TEAM

Seminar & Software Service GmbH

Petunienweg 1 · 6382 Friedrichsdorf 1 · Telefon (0 61 72) 7 95 51