

EMPFINDLICHKEIT UND TOLERANZANALYSE LINEARER NETZWERKE

Von

V. BÉRES* und K. GÉHER

Institut für Nachrichtentechnik und Elektronik, Technische Universität, Budapest

Eingegangen an 16. September, 1976

Vorgelegt von Prof. Dr. S. CSIBI

1. Begriff des Empfindlichkeits- und Toleranzindex

In den letzten Jahren wurde bei dem Entwurf und bei der Herstellung elektronischer Netzwerke der Toleranz der Netzwerke eine große Aufmerksamkeit gewidmet [1, 4, 12]. Bei der Diskussion dieses Themas gehen wir von der

$$S_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (1)$$

differentiellen Empfindlichkeit der $y(x_i)$ Netzwerkcharakteristik aus.

Es werden die relative Empfindlichkeit

$$S_i^r = \frac{x_i}{y} \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (2)$$

und die partielle Toleranz

$$\frac{\Delta y_i}{y} = S_i^r \frac{\Delta x_i}{x_i} \quad (3)$$

eingeführt und die relative Toleranz mit dem Zusammenhang

$$\frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^N S_i^r \frac{\Delta x_i}{x_i} \quad (4)$$

definiert. Der Wert der Toleranz wird durch die folgenden Faktoren beeinflusst:

(i) Auf welche Weise wird die vorgeschriebene Spezifikation durch die Netzwerkcharakteristik $y(x_i)$ erfüllt? Welche Approximation wurde im Frequenzbereich gewählt, falls die Netzwerkcharakteristik die Amplitudencharakteristik $A(\omega, x_i)$ ist?

(ii) Welcher Netzwerkaufbau wurde gewählt? Welche Topologie (Abweigschaltung, Kaskadenschaltung oder Rückkupplung) und Netzwerkelemente werden z. B. zu aktiven RC-Netzwerken angewandt?

* z. Z. im Forschungsinstitut für Fernmeldetechnik TKI

(iii) Welche technologischen Möglichkeiten stehen zur Verfügung? Diese determinieren nämlich den Wert von $\Delta x_i/x_i$ und die Methode der in (4) vorgeschriebenen Summierung. Z. B. besteht die Frage darin, ob es eine Korrelation zwischen den Toleranzen der einzelnen Netzwerkparameter gibt, oder ob eine Möglichkeit für die Einstellung eines nachträglichen Wertes vorliegt.

Bei der Zielsetzung des Entwurfes und der Beurteilung des Ergebnisses der Erzeugung sind Toleranzkriterien notwendig, die die Durchführung der Optimierung und des Vergleiches ermöglichen. Eine solche Größe wird »Toleranzindex« genannt. Im Idealfall könnten die Toleranzverhältnisse mit einem einzigen Zahlenwert charakterisiert werden. Die Einführung eines solchen Index stößt aber auch theoretische und praktische Schwierigkeiten. Hier wird die umfangreiche Literatur des Problems nicht bekanntgegeben [1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17], sondern die Aufmerksamkeit auf die Aufklärung der grundsätzlichen Schwierigkeiten konzentriert.

Bei dem »worst case design« ist $\Delta x_i = d_i$, d. h. die maximale Abweichung des Netzwerkparameters und die Absolutwerte der partiellen Toleranzen werden summiert:

$$\frac{\Delta y}{y} \leq \sum_{i=1}^N |S_i^r| \left| \frac{d_i}{x_i} \right| \quad (5)$$

Der aus (5) abgeleitete Toleranzindex nimmt die Form

$$\varphi = \sum_{i=1}^N k_i |S_i^r| \quad (6)$$

an, wo $k_i = |d_i/x_i|$ das Gewicht des Absolutwertes der Empfindlichkeit bedeutet. Von diesen — von der Technologie abhängenden — Gewichten abgesehen, erhalten wir den Empfindlichkeitsindex der Form:

$$\varphi = \sum_{i=1}^N |S_i^r| \quad (7)$$

Die Voraussetzung der gleichmäßigen Toleranzen, d. h. die Voraussetzung der Gleichheit der d_i/x_i Werte auf Grund von (4) führt zum Zusammenhang

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{d_i}{x_i} \sum_{i=1}^N S_i^r = k \sum_{i=1}^N S_i^r \quad (8)$$

Da die Summe der relativen Empfindlichkeiten invariant ist:

$$\sum_{i=1}^N S_i^r = M \quad (9)$$

kann (8) in der folgenden Form geschrieben werden:

$$\frac{\Delta y}{y} = kM \tag{10}$$

Der Toleranzindex

$$\varphi = kM \tag{11}$$

spiegelt die invarianten Eigenschaften der Empfindlichkeit, damit kann er nicht als die Zielfunktion der Optimierung oder als die Grundlage des Vergleichs der Netzwerke gewählt werden [5].

Beim statistischen Entwurf, wenn es keine Korrelation zwischen den Toleranzen der Netzwerkparameter gibt, kann die resultierende Varianz einfach berechnet werden:

$$D^2 = \sum_{i=1}^N |S_i^r|^2 D_i^2 \tag{12}$$

(Bei gleichmäßiger Verteilung ist $D_i^2 = d_i^2/3$)

Der statistische Entwurf führt zum Toleranzindex

$$\varphi = \sum_{i=1}^N k_i |S_i^r|^2 \tag{13}$$

Von den technologieabhängenden Gewichten abgesehen erhält man den Empfindlichkeitsindex

$$\varphi = \sum_{i=1}^N |S_i^r|^2 \tag{14}$$

Im Falle einer Korrelation wird die resultierende Varianz

$$D^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r_{ij} S_i^{r*} S_j^r = \varphi \tag{15a}$$

wo r_{ij} der nichtnormalisierte Korrelationskoeffizient ist.

In einer Matrix formuliert ist

$$\varphi = S^{r*t} \mathbf{R} S^r \tag{15b}$$

wo

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} D_1^2 & \dots & \dots & \dots & r_{1N} \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & & r_{ij} & \vdots \\ \vdots & & & \vdots & \vdots \\ r_{1N} & & r_{ij} & & D_N^2 \end{bmatrix} \text{ und} \tag{16a}$$

$$S^r = \begin{bmatrix} S_1^r \\ \vdots \\ S_i^r \\ \vdots \\ S_N^r \end{bmatrix} \quad (16b)$$

d.h. die Varianzen befinden sich in der Hauptdiagonalen, und $r_{ij} = r_{ji}$ (* bezeichnet Konjugieren, t Transponieren).

Sich auf die Beschreibung des Frequenzbereiches beschränkend findet man, daß die in (6), (7), (13), (14) und (15) eingeführten Indizes die gemeinsame Eigenschaft haben, daß jeder frequenzabhängig ist. Das ist von dem Gesichtspunkt des Entwerfers aus vorteilhaft, da es das Auswählen des für die Aufgabe kritischen Frequenzwertes und die Untersuchung der Empfindlichkeits- und Toleranzverhältnisse in diesem Bereich ermöglicht. Dagegen ist es nachteilig, weil statt einer einzigen Zahl eine Funktion im Frequenzbereich behandelt werden muß. Das ist theoretisch dadurch überbrückbar, daß als endgültiger Toleranz- oder Empfindlichkeitsindex das Integral der mit $w(\omega)$ gewogenen Funktionen der früher definierten Indizes genommen wird:

$$\Phi = \int_{\omega_1}^{\omega_2} w(\omega) \varphi(\omega) d\omega \quad (17)$$

Der Nachteil dieses Vorschlages besteht darin, daß es für die Aufnahme von ω_1 , ω_2 und $w(\omega)$ teilweise willkürliche Möglichkeiten gibt, und daß die Integration ohne Schwierigkeiten nicht durchgeführt werden kann.

Eine weitere gemeinsame Eigenschaft der unter (6), (7), (11), (13), (14) und (15) eingeführten Indizes besteht darin, daß diese nur eine einzige Netzwerkcharakteristik in Betracht nehmen. Wenn gleichzeitig mehrere Netzwerkcharakteristiken in Betracht genommen werden sollen, kann die gewogene Summe der einzelnen Indizes der Netzwerkcharakteristiken als endgültiger Toleranz- oder Empfindlichkeitsindex betrachtet werden.

Bei dem sogenannten gemischten Entwurf werden der eine Teil der partiellen Toleranzen dem schlechtesten Fall (worst case) entsprechend, der andere Teil der partiellen Toleranzen dem statistischen Fall entsprechend summiert. Dieser Vorgang führt auch zur Darstellung des endgültigen Toleranz- oder Empfindlichkeitsindex durch Gewichten.

Es ist wichtig zu bemerken, daß die Indexe (6), (13) und (15) die technologischen Änderungen enthalten und darum »Toleranzindizes« genannt werden. Die Empfindlichkeitsindizes (7) und (14) sind dagegen nur vom Aufbau des Netzwerkes abhängig, da sie die k_i Gewichte nicht enthalten. Die eingeführten Indizes beziehen sich auf die Netzwerkfunktion y und stehen mit der Spezifikation nur indirekt in Verbindung.

2. Die Eigenschaften der Digitalrechnerprogramme

Die grundlegende Voraussetzung der Berechnung der Empfindlichkeits- und Toleranzindizes ist das die Analyse der Netzwerke durchführende Digitalrechnerprogramm. In unserem Fall wurde das Programm KEPAN-74 [9] für die Bestimmung der Empfindlichkeiten angewandt. Das Programm KEPAN-74 führt die Analyse von linearen Netzwerken mit konzentrierten bzw. verteilten Parametern durch. Die Netzwerkelemente können folgendermaßen gewählt werden: R, L, C, gesteuerte Generatoren mit endlichen Steuerungsfaktoren, Operationsverstärker mit endlicher Verstärkung, homogene, dreischichtige RC-Leitung mit verteilten Parametern. Das Programm stellt das Netzwerk mit der Matrix der indefiniten Admittanz dar. Das Programm berechnet den Absolutwert, die Phasencharakteristik, die Laufzeit der Transferfunktion, den realen und den imaginären Teil der Ein- und Ausgangsimpedanz und die relative Empfindlichkeit der Transferfunktion gegen die oben genannten Netzwerkparameter. Die Empfindlichkeiten werden ohne Differenzierung, aus der Multiplikation der Transferfunktionen bestimmt. Das Programm wurde für den Digitalrechner RAZDAN 3 in ALGOL-Sprache geschrieben.

Infolge der großen Bedeutung der Verstärker und der Filter lohnt es, sich daran zu erinnern [4], daß im Falle $K = Ae^{-jb}$ bzw. $\ln K = a - jb$ der Ausdruck der Toleranz

$$\Delta a = \sum_{i=1}^N \operatorname{Re} S_i^r \frac{\Delta x_i}{x_i} \quad (18a)$$

$$\Delta b = - \sum_{i=1}^N \operatorname{Im} S_i^r \frac{\Delta x_i}{x_i} \quad (18b)$$

ist.

Deswegen schreibt das Programm KEPAN-74 die Empfindlichkeit der Transferfunktion in der Form eines realen und eines imaginären Teiles aus.

Bei der Entwicklung des die Empfindlichkeitsindizes berechnenden Programms wurden die folgenden Gesichtspunkte in Betracht genommen:

- (i) Der Index soll sich für die Vergleichung der Toleranzverhältnisse eignen und alle wichtigen Effekte beachten;
- (ii) der Index soll einfach berechenbar sein;
- (iii) der Index soll für Verstärker und Filter charakteristisch sein.

Auf Grund dieser Gesichtspunkte haben wir die folgenden Indizes ausgewählt:

$$\text{I.a. } q_1 = \sum_{i=1}^N k_i (\operatorname{Re} S_i^r)^2 \quad (19a)$$

$$\text{I.b. } q_2 = \sum_{i=1}^N k_i (\operatorname{Im} S_i^r)^2 \quad (19b)$$

$$\text{I.c. } q_3 = \sum_{i=1}^N k_i |S_i^r|^2 \quad (19c)$$

oder

$$\text{II.a. } q_4 = (\text{Re}S^r)^t \mathbf{R}(\text{Re}S^r) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r_{ij} \text{Re}S_i^r \text{Re}S_j^r \quad (20a)$$

$$\text{II.b. } q_5 = (\text{Im}S^r)^t \mathbf{R}(\text{Im}S^r) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r_{ij} \text{Im}S_i^r \text{Im}S_j^r \quad (20b)$$

$$\text{II.c. } q_6 = S^{r*t} \mathbf{R}S^r = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r_{ij} S_i^{r*} S_j^r \quad (20c)$$

Das Programm berechnet im Falle von $R = 0$ einen unkorrelierten (I. Typ), im Falle von $R = 1$ einen korrelierten (II. Typ) Index. Das Programm berechnet — in Abhängigkeit von der $E3 = 1$ - bzw. $E3 = 0 =$ Vorschrift — alle drei Typen des Index bzw. nur den Empfindlichkeitsindex Typ c. Als Resultat werden die berechneten Indizes in Tabellenform mit Frequenz- und Empfindlichkeitsindex-Spalten angegeben. Das Resultat kann mit einer Reihendruckmaschine gezeichnet werden. Das Programm wurde auch für den Digitalrechner RAZDAN 3 in ALGOL-Sprache entwickelt.

Im folgenden wird mit numerischen Werten die Anwendung der Empfindlichkeitsindizes dargelegt.

3. Beispiele für die Berechnung der Indizes

Zuerst werden zwei Beispielgruppen untersucht; zuerst wird die Vergleichen von Dämpfungsgliedern, danach diejenige von einfachen Bandpaßfilterschaltungen durchgeführt.

(i) Symmetrische Dämpfungsglieder. Die in Abbildung 1 dargestellten symmetrischen Dämpfungsglieder wurden durch sechs äquivalente Netzwerke verwirklicht: durch Brückenschaltung, T-Glied, überbrückte T-Schaltung, π -Glied, erdsymmetrische T-Schaltung, erdsymmetrisches π -Glied (0-Glied). Wir bestimmen die Elementwerte so, daß jede Schaltung 40 dB Dämpfung gebe.

Die Empfindlichkeiten sind real und von der Frequenz unabhängig. Tabelle 1 wurde auf Grund der berechneten Indizes zusammengestellt. Die Tabelle zählt die Schaltungen nach zunehmenden Empfindlichkeitsindizes auf. Beachtenswert ist der hervorspringend große Empfindlichkeitsindex der Brückenschaltung. Wir möchten betonen, daß die Reihenfolge in der Tabelle von dem Gesichtspunkt der Empfindlichkeit aus zusammengestellt wurde. Die Reihenfolge nach der Anzahl der Netzwerkelemente oder nach dem Quotienten des größten und kleinsten Widerstandes weicht davon ab.

(ii) Bandpaßfilter. Es wurden Bandpaßfilter vierten Grades in LC- und aktiver RC-Realisierung verglichen. In letzterem Falle haben wir die Netz-

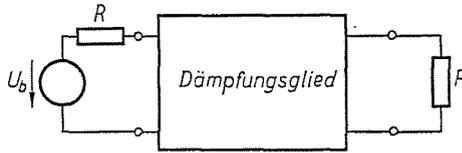


Abb. 1

Tabelle 1

Reihenfolge der Empfindlichkeit	Schaltung	$\sum_{i=1}^N S_i ^2$
1	Überbrücktes T-Glied	0,99
2	Erdsymmetrisches π -Glied	1,46
3	Erdsymmetrisches T-Glied	1,70
4-5	π -Glied	1,94
4-5	T-Glied	1,94
6	Brückenschaltung	625,50

werkfunktion mit zwei Methoden realisiert: mit Kaskadenrealisierung und PRB (Primary Resonator Block) Realisierung [10]. Bei beiden aktiven RC-Realisierungen wurde die Deliyannis-Bandpaßfilter-Grundschaltung angewandt (Abb. 2). Die Transferfunktion der Schaltung ist

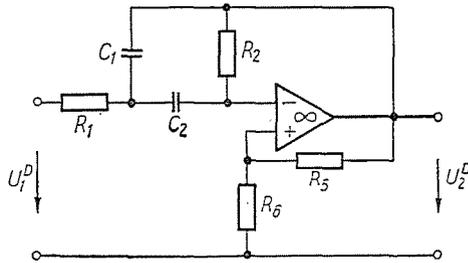


Abb. 2

$$K^D = \frac{U_2^D}{U_1^D} = \frac{-pAR_2C_2}{1 + pB + p^2R_1R_2C_1C_2} \quad (21)$$

wo

$$A = 1 + \frac{R_6}{R_5} \quad (22a)$$

$$B = R_2C_2 + R_1C_1 + R_1C_2 - AR_2C_2 \quad (22b)$$

Die Kaskadenrealisierung des Bandpaßfilters wird in Abb. 3, die PRB-Realisierung in Abb. 4, die LC-Realisierung in Abb. 5 dargestellt.

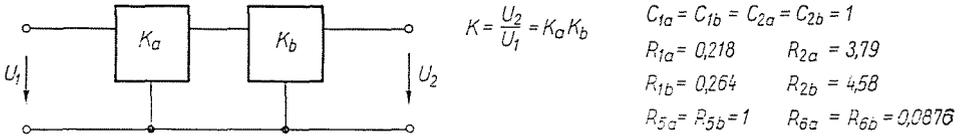
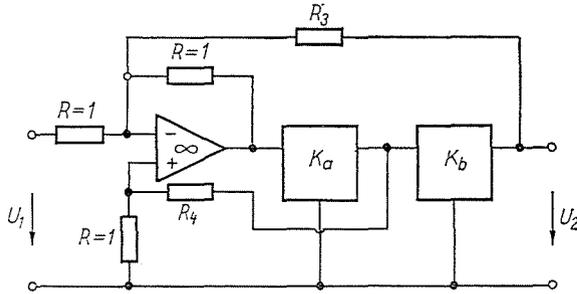


Abb. 3



$$K = \frac{U_2}{U_1} = \bar{K}_a \bar{K}_b$$

$$C_{1a} = C_{1b} = C_{2a} = C_{2b} = 1$$

- | | |
|-----------------------|----------------------------|
| $R_{1a} = 0,218$ | $R_{2a} = 3,79$ |
| $R_{1b} = 0,264$ | $R_{2b} = 4,58$ |
| $R_{5a} = R_{5b} = 1$ | $R_{6a} = R_{6b} = 0,0876$ |

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{K_a K_b}{1 - 2 \frac{R}{R_3} K_a + \frac{R}{R_4} K_a K_b}$$

$$C_{1a} = C_{1b} = C_{2a} = C_{2b} = 1$$

- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| $R_{1a} = R_{1b} = 0,1$ | $R_{2a} = R_{2b} = 10$ |
| $R_3 = 2325,8$ | $R_4 = 106,157$ |
| $R_{5a} = R_{5b} = 1$ | $R_{6a} = R_{6b} = 0,018$ |

Abb. 4

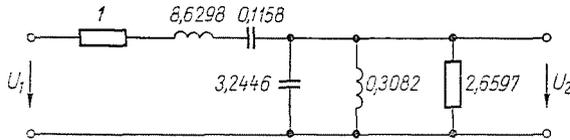


Abb. 5

Die Schwankung der Amplitudencharakteristik der Filter mit Tschebischew-Approximation im Durchlaßbereich $0,9 \leq \omega \leq 1,111$ hat den Wert von 1 dB. Sonst weichen die Amplitudencharakteristiken von einander nur

in einem konstanten Multiplikationsfaktor ab. Die mit dem KEPAN-74-Programm gewonnenen Ergebnisse bewiesen die Gleichwertigkeit der Schaltungen. Aus den Empfindlichkeiten war zu sehen, daß die aktiven Elemente bei den Indizes keine Rolle spielen, infolgedessen können sie bei der Berechnung der Indizes außer acht gelassen werden.

Die primäre Charakteristik der Netzwerke ist die Amplitudencharakteristik, deshalb werden zuerst die aus dem Realteil der Empfindlichkeit abgeleiteten Indizes erörtert. Im unkorrelierten Fall — die Widerstände, Induktivitäten und Kapazitäten mit dem gleichen Gewicht gewählt — werden die in Tabelle 2 dargestellten Ergebnisse erhalten. Tabelle 3 zeigt den Durch-

Tabelle 2

Frequenz	LC	K	PRB
0,100	2,04	4,11	6,09
0,158	2,11	4,35	6,22
0,251	2,29	4,63	6,60
0,398	2,92	5,94	7,88
0,631	6,69	14,1	15,6
1,000	0,15	135	4,86
1,58	6,69	14,1	15,6
2,51	2,92	5,94	7,88
3,98	2,29	4,63	6,60
6,31	2,11	4,25	6,22
10,00	2,04	4,11	6,09

Tabelle 3

Frequenz	LC	K	PRB
0,877	37,7	117	101
0,900	16,1	94,0	73,8
0,924	0,74	106	36,9
0,949	1,65	137	19,9
0,974	0,99	139	8,94
1,000	0,15	135	4,86
1,027	0,99	139	8,94
1,054	1,65	139	19,9
1,082	0,74	108	36,9
1,111	16,1	94,6	73,8
1,141	37,7	118	101

laßbereich in einer ausführlicheren Auflösung (in der Tabelle haben wir auch die zu den Frequenzen 0,877 und 1,141 gehörenden Werte dargestellt).

Im korrelierten Fall wurde der Korrelationsfaktor zwischen den Widerständen, zwischen den Induktivitäten und zwischen den Kapazitäten zu 0,7 gewählt. Gleichfalls wurde der Korrelationsfaktor zwischen den Widerständen und den Induktivitäten zu 0,7 gewählt. Dagegen wurde der Korrelationsfaktor zwischen den Widerständen und Kapazitäten bzw. zwischen den Induktivitäten und Kapazitäten zu $-0,7$ Gewählt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 4 und 5 dargestellt.

Tabelle 4

Frequenz	LC	K	PRB
0,100	0,612	1,233	1,826
0,158	0,632	1,275	1,867
0,251	0,688	1,390	1,981
0,398	0,876	1,782	2,365
0,631	2,007	4,221	4,675
1,000	0,044	40,53	1,459
1,58	2,007	4,230	4,675
2,51	0,876	1,783	2,365
3,98	0,688	1,390	1,981
6,31	0,632	1,275	1,867
10,00	0,612	1,233	1,826

Tabelle 5

Frequenz	LC	K	PRB
0,877	11,31	35,07	30,33
0,900	4,817	28,19	22,15
0,924	0,221	31,87	11,07
0,949	0,495	41,21	5,977
0,974	0,295	41,54	2,683
1,000	0,044	40,53	1,459
1,027	0,295	41,71	2,683
1,054	0,495	41,71	5,977
1,082	0,222	32,48	11,07
1,111	4,821	28,39	22,15
1,141	11,31	35,49	30,33

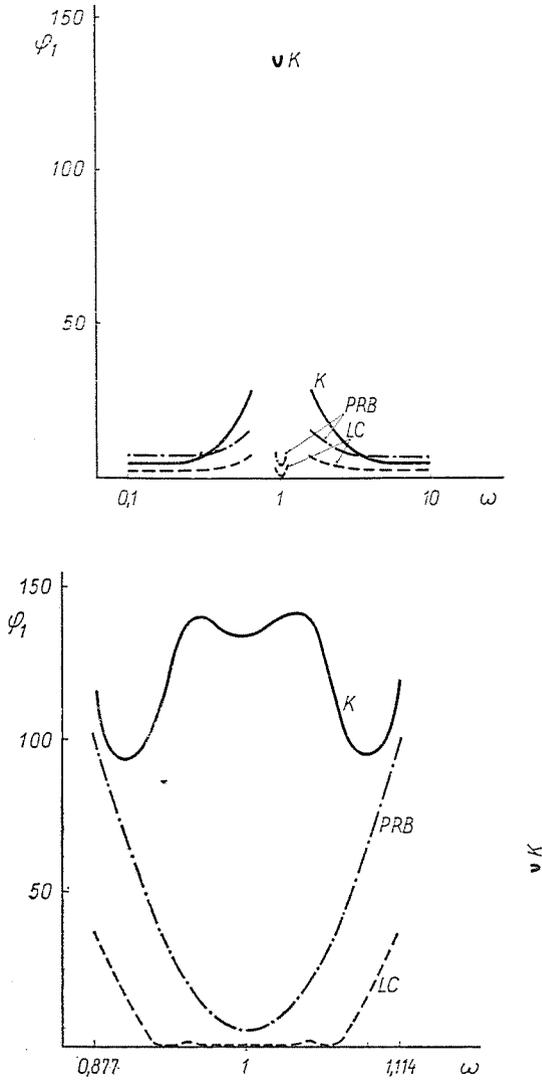


Abb. 6

Schließlich stellen wir im unkorrelierten Fall für alle drei Schaltungen die Empfindlichkeitsindizes dar. Abb. 6 zeigt den Empfindlichkeitsindex der logarithmischen Amplitudencharakteristik, Abb. 7 den Empfindlichkeitsindex der Phasencharakteristik. Abb. 8 zeigt die auf Grund der Quadrate der Absolutwerte der Empfindlichkeiten berechneten Indizes.

Wir hoffen, daß die Diagramme und die im vorigen gezeigten Tabellen die Effektivität des Empfindlichkeitsindex-Digitalrechnerprogramms entsprechend demonstrieren.

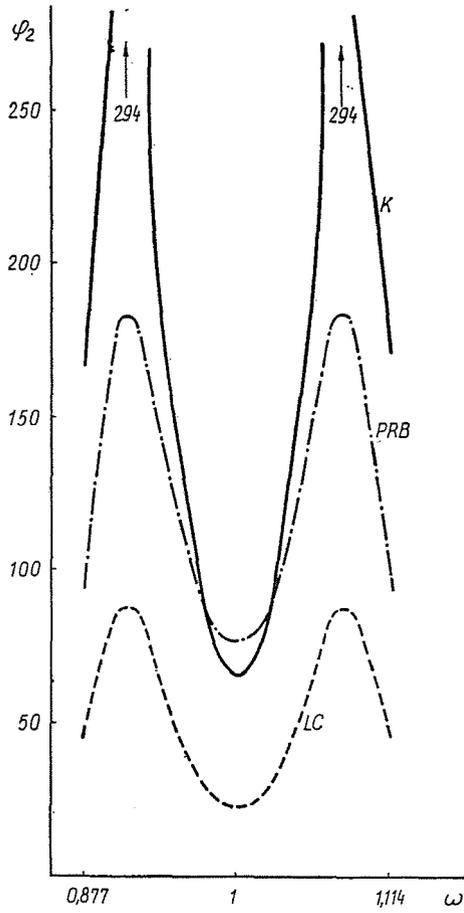
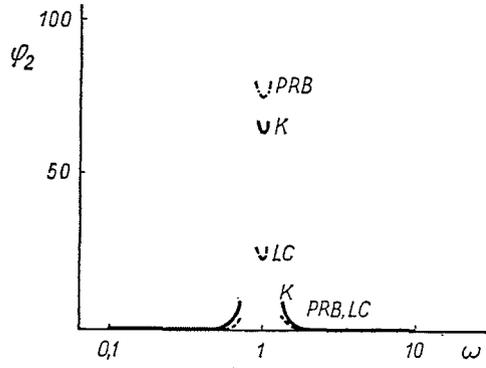


Abb. 7

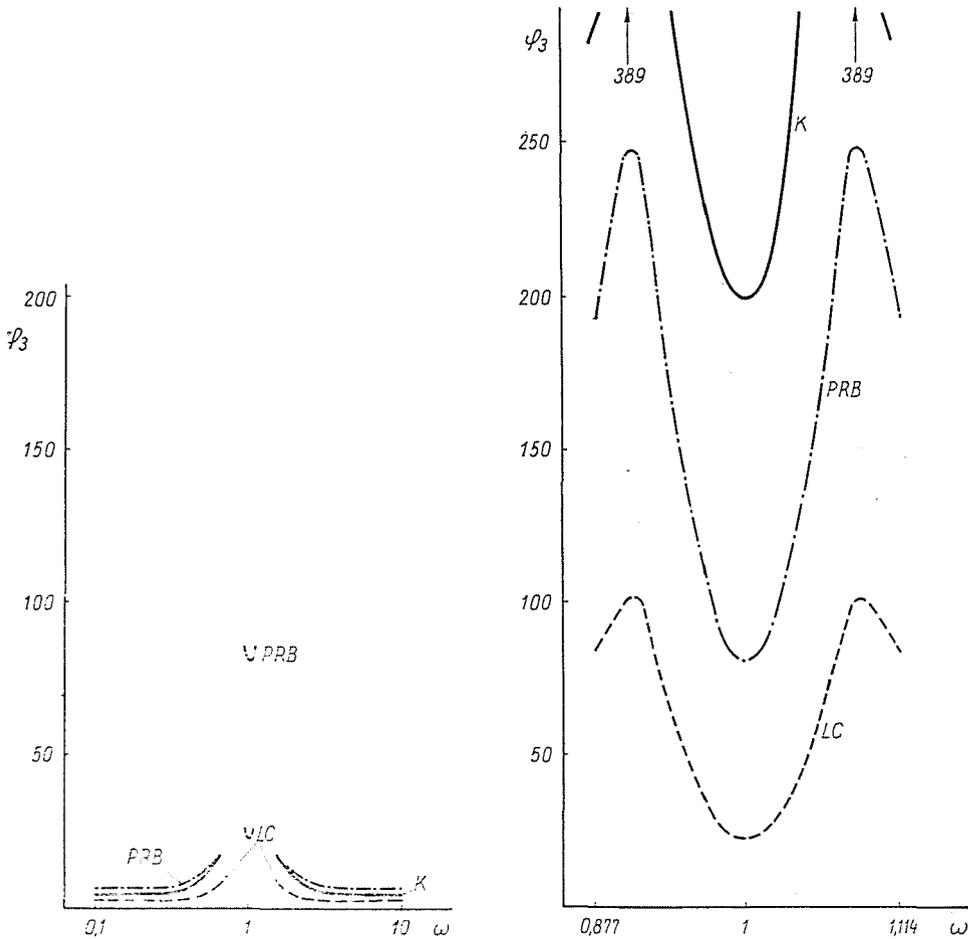


Abb. 8

4. Zusammenfassung

Die Toleranz der Netzwerkcharakteristik hängt (i) von der Art der Erfüllung der Spezifikation, (ii) vom Aufbau des Netzwerkes und (iii) von der angewandten Technologie ab. Für die Bestimmung der Zielfunktion der Optimierung und für die Vergleichung verschiedener Netzwerke wäre es wünschenswert, einen einzigen charakteristischen Index anzugeben. In diesem Beitrag wird bewiesen, daß es zweckmäßig ist, den Toleranz- und den Empfindlichkeitsindex voneinander zu unterscheiden. Der erstere enthält auch die technologischen Parameter, der letztere hängt aber nur vom Aufbau des Netzwerkes ab.

Die gewogene Quadratsumme des Realteiles der Empfindlichkeiten ist für die Toleranz der Amplitudencharakteristik kennzeichnend. Die gewogene Quadratsumme des imaginären Teiles der Empfindlichkeiten gibt den Toleranzindex der Phasencharakteristik an. In vielen Fällen ist die gewogene Quadratsumme der Absolutwerte der Empfindlichkeiten der vorteilhafte Toleranzindex. Alle drei Indizes können auf den Fall einer zwischen den Netzwerkparametern bestehenden Korrelation erstreckt werden.

Für die Berechnung der angeführten sechs Arten der Toleranzindizes wurde für den Digitalrechner RAZDAN 3 in ALGOL-Sprache ein Programm entwickelt. Die Anwendung des Programms wird durch den Toleranzindex der Bandpaßfilter und den Empfindlichkeitsindex der Dämpfungsglieder veranschaulicht. Die Ergebnisse zeigen u.a., daß bei den Dämpfungsgliedern von dem Gesichtspunkt der Empfindlichkeit aus die überbrückte T-Schaltung, bei den Bandpaßfiltern die LC-Schaltung die besten sind. Die PRB- (Primary Resonator Block) Realisierung der aktiven RC-Filter ist vorteilhafter als die Kaskadenrealisierung.

5. Danksagung

Das KEPAN-74-Programm wurde von L. Gefferth im Institut für Nachrichtentechnik und Elektronik, im Auftrage des Radiotechnischen Betriebs REMIX entwickelt. Die verglichenen Bandpaßfilter wurden von L. Schultéty in dem Ungarischen Forschungsinstitut für Meßtechnik (MIKI) entworfen. Die ausführliche Beurteilung der als Grundlage dieser Veröffentlichung dienenden Diplomarbeit wurde von E. Simonyi (Forschungsinstitut für Fernmeldetechnik TKI) verfertigt.

Die Verfasser sprechen obengenannten Kollegen ihren aufrichtigsten Dank aus.

Literatur

1. BÉRES, V.: Elektronikus áramkörök érzékenysége és toleranciája. Diplomaterv. BME Híradástechnikai Elektronika Intézet, 1975.
2. BISWAS, R. N.—KUH, E. S.: Multiparameter sensitivity for linear systems. IEEE Trans. on CT-18 1971, No. 6. pp. 718—19.
3. FLIEGE, N.: Statistical error and sensitivity measures. Proc. of the SSCT, 1974, Vol. 2. pp. 212—16. Prague.
4. GÉHER, K.: Theory of network tolerances. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1971.
5. GÉHER, K.: The theory of sensitivity invariants and their application to optimization of tolerances and noises. Periodica Polytechnica El. Eng. 1975, Vol. 19. No. 1. pp. 25—34.
6. GOLDSTEIN, A. J.—Kuo, F. F.: Multiparameter sensitivity. IEEE Trans. on CT-8 1961, No. 2. pp. 177—78.
7. HAYKIN, S. S.—BUTLER, W. J.: Multiparameter sensitivity indexes of performances for linear, time-invariant networks. Proc. of the IEE, 1970, No. 7. pp. 1239—47.
8. HILBERMAN, D.: An approach to the statistical variability and sensitivities of biquadratic filters. IEEE Trans. on CT-20 1973, No. 4. pp. 282—390.
9. KEPAN-74. Koncentrált és elosztott paraméterű hálózatok analízise. Programleírás. A program a REMIX Radiotechnikai Vállalat megbízásából készült. BME Híradástechnikai Elektronika Intézet, 1974.
10. LAKER, K. R.—GHAUSI, M. S.: Synthesis of low-sensitivity multiloop feedback active RC filter. IEEE Trans. on CAS-21 1974, No. 2. pp. 252—59.
11. LAKER, K. R.—GHAUSI, M. S.: Large-change sensitivity — a dual pair of approximate statistical sensitivity measures. Journal of the Franklin Institute. Vol. 298. Nos. 5 and 6. December 1974, pp. 395—413.
12. REINSCHKE, K.: Zuverlässigkeit von Systemen Band, 1, 2. Verlag Technik, Berlin, 1973, 1974.
13. ROSENBAUM, A. L.—GHAUSI, M. S.: Multiparameter sensitivity in active RC networks. IEEE Trans. on CT-18. 1971, No. 6. pp. 592—99.
14. ROSKA, T.: Aktív RC hálózatok szintézise. Aktív RC hálózatok optimalizálásának és tervezésének néhány kérdése. Egyetemi doktori dolgozat. BME Villamosmérnöki Kar 1967.
15. ROSKA, T.: The designing of optimum sensitive linear networks. Acta Imeco 1967, Tome IV. pp. 23—31. Warszawa.
16. SCHOFFLER, J. D.: Synthesis of minimum sensitivity networks. IEEE Trans. on CT-11 1964, No. 2. pp. 271—276.
17. SHENOI, B. A.: Optimum variability design and comparative evaluation of thin film RC active filters. IEEE Trans. on CAS-21 1974, No. 2. pp. 263—68.

Vilmos BÉRES
Dr. Károly GÉHER | H-1521 Budapest