Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 74 (1983)

Heft: 5

Artikel: SCANAL : ein Simulationsprogramm für geschaltete Kondensator-Netzwerke

Autor: Fischer, G. / Plodeck, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904772

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

SCANAL – ein Simulationsprogramm für geschaltete Kondensator-Netzwerke

G. Fischer und R. Plodeck

Der Bericht gibt einen Einblick in die prinzipielle Arbeitsweise von SCANAL. Dabei werden speziell das Aufstellen der notwendigen Netzwerkmatrizen und die Berechnungsmethode für die Sensitivitäten erläutert. Ein Beispiel demonstriert die Vielseitigkeit und Effizienz des Programms.

L'article décrit les principes du programme SCANAL, en particulier l'élaboration des matrices des réseaux et la méthode de calcul des coefficients de sensibilité. Un exemple démontre l'universalité et l'efficacité du programme.

Vortrag des «Fall 1982 Meeting on Computer Aided Design (CAD)», organisiert von der IEEE Section Switzerland, Chapter on Solid State Devices and Circuits, am 19. Oktober 1982 in Bern

Adresse der Autoren
G. Fischer und *R. Plodeck*, Institut für Fernmeldetechnik, ETHZ, 8092 Zürich.

1. Einleitung

Geschaltete Kondensator-Netzwerke (Switched Capacitor Networks) sind in letzter Zeit stark ins Zentrum des Interesses gerückt, weil sie als analoge Schaltungen sehr präzise in MOS-Technologie integriert werden können. SCANAL (*SC Analyse*) ist ein Analyseprogramm, das ausschliesslich für SC-Netzwerke konzipiert wurde. Es erlaubt folgende Analysearten:

1. Analyse im Zeitbereich: Transientenanalyse (Impulsantwort, Schrittantwort oder Antwort auf eine beliebige stückweise lineare Eingangsfunktion);
2. Analyse im Frequenzbereich: Bode-Diagramm (Übertragungsfunktion bezüglich beliebiger Netzwerkknoten);
3. Sensitivitätsanalyse (bezüglich Amplitude, Phase, Pole, Nullstellen);
4. Symbolische Analyse: Transferfunktion im z-Bereich (Koeffizienten der z-Übertragungsfunktion).

2. Ideale SC-Netzwerke im Zeitbereich

Voraussetzung: Ein ideales SC-Netzwerk besteht aus Kapazitäten, Verstärkern, idealen Schaltern und Quellen. Die Schalter werden durch ein T-periodisches Clocksignal mit N Phasen gesteuert. Die signalbeeinflussenden Mechanismen in einem solchen Netzwerk sind: Ladungsumverteilungen zwischen unmittelbar aufeinanderfolgenden Clockphasen und Veränderungen der Eingangsquellen während der Clockphasen.

Die Dynamik im Netzwerk wird somit allein bestimmt durch die Kapazitäten und die Änderung der momentan anliegenden Quellen. Während die Quellen das Netzwerk unmittelbar beeinflussen, bilden die Kapazitäten Speicher, die den Zustand des Netzwerkes während der vorangegangenen Clockphase beschreiben. Das T-periodische Clocksignal schliesslich bewirkt diskrete, T-periodische Signale im Netzwerk.

Die Beziehungen zwischen Eingangs- und Ausgangsgrössen in einem SC-Netzwerk lassen sich im Zeitbereich durch folgende Gleichung beschreiben:

$$A_i \underline{x}(t) = B_k \underline{x}(t_k) + y(t) \quad t \in \Delta_k \tag{1}$$

$\underline{x}(t)$: Ausgangsvektor
$\underline{y}(t)$: Quellenvektor

3. Analyse idealer SC-Netzwerke im z-Bereich

Da SC-Netzwerke zeitdiskrete Systeme darstellen, drängt sich eine Beschreibung im z-Bereich auf ($z = \exp[j\varphi T]$). Ausgangspunkt für die Analyse bildet Gleichung (1). Für kausale Signale gilt aufgrund der Periodizität

$$A_k \sum_{l=0}^{\infty} \underline{x}_{k+lN} z^{-1} = B_k \sum_{l=0}^{\infty} \underline{x}_{k-1+lN} z^{-1} + \sum_{l=0}^{\infty} \underline{y}_{k+lN} z^{-1} \tag{2a}$$

$$\sum_{l=0}^{\infty} \underline{x}_{k+lN} z^{-1} = \underline{x}_k(z)$$

$$\sum_{l=0}^{\infty} \underline{x}_{k-1+lN} z^{-1} = \begin{cases} \underline{x}_{k-1}(z) & k>1 \\ z^{-1} \underline{x}_N(z) & k=1 \end{cases}$$

Gleichung (2a) schreibt sich in Matrixform folgendermassen:

$$\begin{bmatrix} A_1 & & & & & -B_1 z^{-1} \\ -B_2 & A_2 & & & & \\ & -B_3 & A_3 & & [0] & \\ & & & \ddots & & \\ & & [0] & & \ddots & \\ & & & & & -B_N\ A_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{X}_1 \\ \underline{X}_2 \\ \underline{X}_3 \\ \vdots \\ \underline{X}_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Y}_1 \\ \underline{Y}_2 \\ \underline{Y}_3 \\ \vdots \\ \underline{Y}_N \end{bmatrix} \qquad (2b)$$

in Kurzform: $M\,\underline{X} = \underline{Y}$

Das dynamische Frequenzverhalten wird im Gleichungssystem (2b) einzig durch die Untermatrix $B_1 z^{-1}$ beeinflusst. Das erspart bei mehrfacher Auflösung des Gleichungssystems (für verschiedene Frequenzpunkte) viel Rechenzeit, da alle Untermatrizen A_i in M frequenzunabhängig sind und somit nur einmal invertiert werden müssen.

4. Aufstellen der Netzwerkmatrix

Die Grundlage für das Aufstellen der Netzwerkmatrix M bildet die modifizierte Knotenanalyse (Modified Nodal Analysis MNA). Anders als bei konventionellen analogen Netzwerken ist bei SC-Netzwerken der tatsächliche Stromverlauf nicht von Interesse. Für die Signalumformung sind nur die durch die Ströme verursachten Ladungsverschiebungen massgebend.

$$q_k = \int_{t_k}^{t_{k+1}} i(t)\,\mathrm{d}t \qquad t \in \Delta_k$$

Der effektive zeitliche Stromverlauf spielt solange keine Rolle, als die Ladungsverschiebungen innerhalb von Δ_k abgeschlossen sind.

Aufstellen der MNA-Gleichungen: Als Variable bzw. Quellen verwendet man:

$\underline{V}_k$: Knotenspannungsvektor während Δ_k
$\underline{q}_k$: Ladungstransfer durch Spannungsquellen während Δ_k
$\underline{U}_k$: Quellenspannungsvektor während Δ_k
$\underline{Q}_k$: Quellenladungsvektor während Δ_k + gesteuerte Quellen.

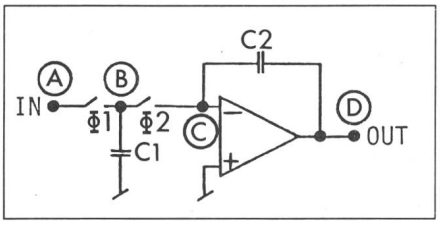

Fig. 1 Diskreter SC-Integrator

Das folgende Beispiel zeigt, wie aufgrund der Netzwerktopologie die verschiedenen Untermatrizen A_i und B_i gebildet und daraus die gesuchten Ausgangsgrössen berechnet werden. Es betrifft einen diskreten Integrator (zweiphasig) mit idealem Verstärker (Fig. 1).

Knotenreferenztabelle Tabelle I

Benützer	Name programmintern Phase 1	Phase 2
Ⓐ	1	1
Ⓑ	1	2
Ⓒ	2	2
Ⓓ	3	3

Mit Tabelle I werden die Schalter berücksichtigt. Da sie als ideal vorausgesetzt werden, ergibt sich daraus eine Reduzierung der ursprünglich vorhandenen Knoten durch Zusammenfassen von kurzgeschlossenen Knoten. Die vom Benützer bezeichneten vier Knoten sind intern auf drei reduziert worden (drei Knotenspannungen). Das Gleichungssystem lautet:

$$\begin{bmatrix} A_1 & -B_1 z^{-1} \\ -B_2 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{X}_1 \\ \underline{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_1 \\ \underline{Y}_2 \end{bmatrix} \qquad (3)$$

Die A- und B-Matrizen sehen folgendermassen aus:

$$A_1 = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} \underline{V}_{11} & \underline{V}_{21} & \underline{V}_{31} & \underline{q}_{v1} & \underline{q}_{a1} \end{array} \\ \begin{bmatrix} C1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & C2 & -C2 & 0 & 0 \\ 0 & -C2 & C2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$A_2 = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} \underline{V}_{12} & \underline{V}_{22} & \underline{V}_{32} & \underline{q}_{v2} & \underline{q}_{a2} \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & C1+C2 & -C2 & 0 & 0 \\ 0 & -C2 & C2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$B_1 = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} \underline{V}_{12} & \underline{V}_{22} & \underline{V}_{32} & \underline{q}_{v2} & \underline{q}_{a2} \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & C1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C2 & -C2 & 0 & 0 \\ 0 & -C2 & C2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$B_2 = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} \underline{V}_{11} & \underline{V}_{21} & \underline{V}_{31} & \underline{q}_{v1} & \underline{q}_{a1} \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C1 & C2 & -C2 & 0 & 0 \\ 0 & -C2 & C2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

Wie das Beispiel zeigt, enthalten die Untermatrizen A_i und B_i viele Nullen. Um möglichst wenig Speicherplatz zu benötigen, werden deshalb nur die von null verschiedenen Elemente abgespeichert. Die notwendigen Matrixoperationen werden alle unter Verwendung der «Sparse-Matrix-Technik» durchgeführt.

Für das obige Beispiel eines Zweiphasennetzwerkes ergeben sich die Lösungen im Zeitbereich und im Frequenzbereich aus folgenden Gleichungssystemen:

Transientenanalyse:

$$\begin{aligned} \underline{x}_{2l+1} &= A_1^{-1} B_1 \underline{x}_{2l} + A_1^{-1} \underline{y}_{2l+1} \\ & \qquad\qquad l = 0, 1, 2, \ldots \\ \underline{x}_{2l+2} &= A_2^{-1} B_2 \underline{x}_{2l+1} + A_2^{-1} \underline{y}_{2l+2} \end{aligned} \qquad (4)$$

Frequenzanalyse:

$$\begin{aligned} \underline{X}_2 &= [E - A_2^{-1} B_2 A_1^{-1} B_1 z^{-1}]^{-1} \cdot \\ & [A_2^{-1} \underline{Y}_2 + A_2^{-1} B_2 A_1^{-1} \underline{Y}_1] \\ \underline{X}_1 &= A_1^{-1} \underline{Y}_1 + A_1^{-1} B_1 \underline{X}_2 z^{-1} \\ z &= \exp[\mathrm{j}\varphi T] \end{aligned} \qquad (5)$$

Das Gleichungssystem (5) zeigt noch einmal deutlich, dass bei der Auflösung der MNA-Gleichungen nur ein kleiner Teil der Operationen frequenzabhängig ist. Die Inversionen der Untermatrizen A_i und die Berechnung der Produkte $A_i B_i$ sind frequenzunabhängig und müssen bei einer

Frequenzanalyse nur einmal durchgeführt werden.

5. Symbolische Analyse

Bei der Synthese von SC-Netzwerken wird sehr oft von der Übertragungsfunktion im z-Bereich ausgegangen. Die symbolische Analyse in SCANAL gibt dem Schaltungsentwerfer die Möglichkeit, anhand eines Koeffizientenvergleichs im z-Bereich zu prüfen, ob sein Netzwerk die gewünschte Funktion auch tatsächlich realisiert.

Die symbolische Analyse ermöglicht aber darüber hinaus ein wesentlich verkürztes Verfahren zur Bestimmung des Frequenzganges eines Netzwerkes. Dieser ergibt sich mit geringem Rechenaufwand aus der Übertragungsfunktion $H(z)$, wenn darin die Variable z durch $\exp[j\varphi t]$ ersetzt wird. Die Berechnung der Koeffizienten geschieht folgendermassen:

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^{n} a_i z^{-1}}{\sum_{i=0}^{n} b_i z^{-1}} = \frac{N(z)}{D(z)} \qquad (6)$$

n: Filtergrad

Das Nennerpolynom $D(z)$ in (6) ergibt sich direkt aus der Determinanten der Matrix M.

$$D(z_k) = \mathrm{Det}\, M(z) \qquad (7)$$

Gleichung (7) ist im allgemeinen komplex. Wird die Determinante von M für $(n+1)/2$ (bzw. die nächstgrössere ganze Zahl) Punkte z_k auf dem Einheitskreis bestimmt, so resultiert ein System von $(n+1)$ Gleichungen. Daraus können die $(n+1)$ unbekannten Nennerkoeffizienten b_i bestimmt werden. Die Ermittlung der Zählerkoeffizienten a_i erfolgt auf analoge Weise mittels folgendem Ansatz:

$$N(z_k) = H(z_k)\, D(z_k) \qquad (8)$$

$H(z_k)$ ergibt sich dabei aus der direkten Auflösung des MNA-Gleichungssystems (2).

Zur Bestimmung der $2(n+1)$ unbekannten Koeffizienten der z-Übertragungsfunktion muss das Gleichungssystem (2) somit $(n+1)/2$ Male aufgelöst und ebensooft die Determinante von M bestimmt werden. Dieser Aufwand ist im allgemeinen bedeutend kleiner als die direkte Ermittlung des Frequenzganges aus Gl. (2). Der Weg

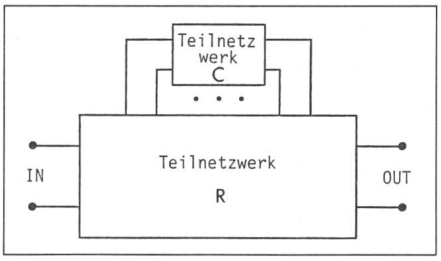

Fig. 2 Aufteilung des ursprünglichen SC-Netzwerkes in zwei Teilnetzwerke R (unabhängig von c_i) und C (von c_i beeinflusst)

über die Transferfunktion $H(z)$ lohnt sich vor allem dann, wenn bei der Frequenzanalyse viele Frequenzpunkte berechnet werden müssen. Als Nachteil dieser Methode muss allerdings ein geringer Verlust an Rechengenauigkeit in Kauf genommen werden.

6. Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivität einer Ausgangsgrösse F bezüglich einem bestimmten Netzwerkelement c ist wie folgt definiert:

$$S_c^F = \frac{\mathrm{d}F/F}{\mathrm{d}c/c} = \frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}c}\,\frac{c}{F} \qquad (9)$$

Das Problem bei der Berechnung der Sensitivität besteht in der Bestimmung der Ableitung der Ausgangsgrösse F nach einem bestimmten Netzwerkelement c_i. Geht man von der MNA-Gleichung (2) aus und leitet diese nach einem bestimmten Netzwerkelement c_i ab (in der Regel eine Kapazität), so resultiert folgende Gleichung:

$$M'\underline{X} + M\,\underline{X}' = \underline{Y}' = 0 \qquad (10a)$$

Aufgelöst nach der Ableitung des Ausgangsvektors erhält man

$$\underline{X}' = -M^{-1}\,M'\underline{X} \qquad (10b)$$

Zur Berechnung der Ableitung von M denkt man sich das Netzwerk aufgeteilt in ein vom entsprechenden Element c_i unabhängiges Teilnetzwerk R und ein abhängiges Teilnetzwerk C (Fig. 2). Das Teilnetzwerk R liefert definitionsgemäss keinen Beitrag an die Ableitung der Matrix M. M' besteht lediglich aus der Ableitung der Untermatrix C, bei der c_i immer nur als linearer Faktor in den Matrixelementen vorkommt. Somit schreibt sich M' allgemein wie folgt:

$$M' = \begin{array}{c} \\ i_1 \\ j_1 \\ i_2 \\ j_2 \\ \\ \\ \\ i_N \\ j_N \end{array} \begin{array}{c} \cdots\; i_1 \;\; j_1 \;\; i_2 \;\; j_2 \;\cdots\; i_N \;\; j_N \;\cdots \\ \begin{bmatrix} \ddots & & & & & & & & & \\ & 1 & -1 & & & & & & -z^{-1} & z^{-1} \\ & -1 & 1 & & & & & & z^{-1} & -z^{-1} \\ & -1 & 1 & 1 & -1 & & & & & \\ & 1 & -1 & -1 & 1 & [0] & & & & \\ & & & & \cdot & & & & & \\ & & & & & \cdot & & & & \\ & & & & [0] & & \cdot & & & \\ & & & & & & & & 1 & -1 \\ & & & & & & & & -1 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

Auch bei der Berechnung der Sensitivitäten ist ein verkürztes Verfahren via die Transferfunktion möglich. Dazu müssen die Ableitungen der Koeffizienten von $H(z)$ bestimmt werden. Diese berechnen sich aus folgenden Gleichungen:

$$H_{ki} = \frac{X_{ki}}{Y_{nj}} = \frac{N}{D}$$

$$D' = \mathrm{Det}\, M' \qquad (11)$$

$$N' = D'\,H_{ki} + D\,H'_{ki}$$

wobei: $H_{ki}' = Y_{nj} X_{ki}'$

Aus dem Gleichungssystem (11) lassen sich nicht nur die Ableitungen der Zähler- und Nennerkoeffizienten von

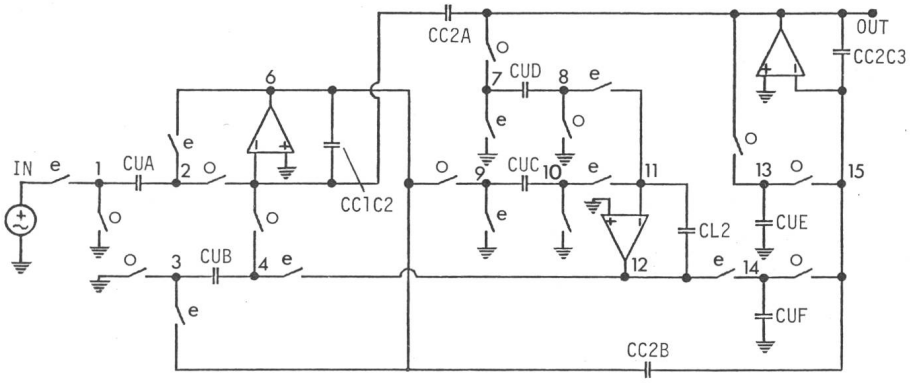

Fig. 3 Elliptischer Tiefpass 3. Ordnung in SC-Technik

$H(z)$ berechnen, sondern darüber hinaus auch die Ableitungen der Pol- und Nullstellenfrequenzen (und damit auch deren Sensitivitäten).

7. Programmbeispiel

Als Beispiel dient ein Zweiphasennetzwerk, das einen elliptischen Tiefpass 3. Ordnung realisiert (Fig. 3). Dieses Netzwerk wird für die Analyse mit SCANAL gemäss Tabelle II beschrieben. Es wird sowohl im Frequenzbereich als auch im Zeitbereich analysiert. Weiter wird auch die Sensitivität des Frequenzganges bezüglich vier ausgewählter Kapazitäten (CL2, CC2A, CC2B, CUA) berechnet. Die Figuren 4 bis 9 zeigen die Resultate der entsprechenden Analysen in grafischer Form.

8. Rechenaufwand

Rechner: CDC 6400 (das Programm wurde auf einer CDC 6400-Rechenanlage entwickelt, läuft aber auch auf einem kleineren System wie z. B. VAX 780).

Hauptspeicher: 46 000_8 60-bit-Worte (14 000_8 Daten, 32 000_8 Programm).

Rechenzeiten:

Analyse im Frequenzbereich

Punkte pro Dekade	Punkte total	Rechenzeiten AC	TF	ACSE	TFSE
10	30	5 s	3 s	8 s	4 s
50	150	10 s	4,3 s	23 s	6 s

Analyse im Zeitbereich

Total gerechnete Punkte	Zeit-intervall	Zeit-schritt	Rechenzeit Impuls	Schritt
156	600 µs	3,9 µs	6,2 s	6,4 s

Programminput

Elliptischer Tiefpass 3. Ordnung

Netzwerkbeschrieb mit SCANAL[1]) Tabelle II

```
VIN     IN    0     1000000017M1²)
CUA     1     2     2
CUB     3     4     1
CC1C2   5     6     7.3824
CUD     7     8     1
CUC     9     10    1

CL2     11    12    6.0456
CUE     0     13    1
CUF     0     14    1
CC2B    15    6     0.8785
CC2C3   OUT   15    7.3824
CC2A    5     OUT   0.8785

SIN1    IN    1     EVEN³)
SINO    IN    0     ODD
S10     1     0     ODD
S26     2     6     EVEN
S25     2     5     ODD
S36     3     6     EVEN

S30     3     0     ODD
S412    4     12    EVEN
S45     4     5     ODD
S70     7     0     EVEN
S7OUT   7     OUT   ODD
S811    8     11    EVEN

S80     8     0     ODD
S90     9     0     EVEN
S96     9     6     ODD
S1011   10    11    EVEN
S100    10    0     ODD

S13OUT  13    OUT   EVEN
S1315   13    15    ODD
S1412   14    12    EVEN
S1415   14    15    ODD
SOUTE   OUT   OUTE  EVEN

A1      0     5     6
A2      0     11    12
A3      0     15    OUT

.CLOCK 128K
.TIME 600U
.PLOT TR V (OUTE)
.OPT OUTPHASE = 1
.FREQ AC DEC 10 100 64K
.FREQ ACSE DEC 10 100 64K
.PLOTACSEVDB(OUTE)CL2CC2ACC2BCUA
.PLOTACSEVP(OUTE)CL2CC2ACC2BCUA
.PLOT AC VDB (OUTE) VP (OUTE)
.END
```

[1]) Nach D. J. Allstot et al: MOS Switched Capacitos Ladder Filler; IEEE Journal of Solid-state Circuits, SC-13(1978)6

[2]) Für AC-Analyse und Schrittantwort

[3]) Even ≙ Phase 1; Odd ≙ Phase 2

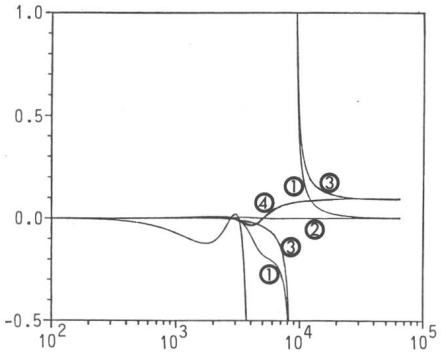

Fig. 6 Sensitivität des Amplitudenganges

SCANAL berechnet die Abweichungen des Amplitudenganges bei einer 1%igen Zunahme der entsprechenden Kapazitäten

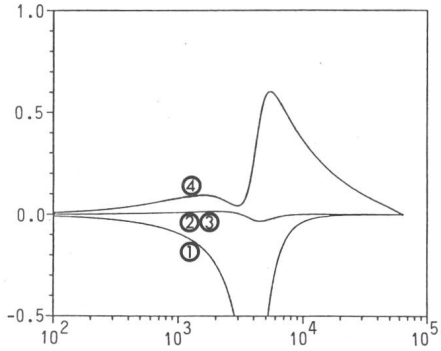

Fig. 7 Sensitivität des Phasenganges

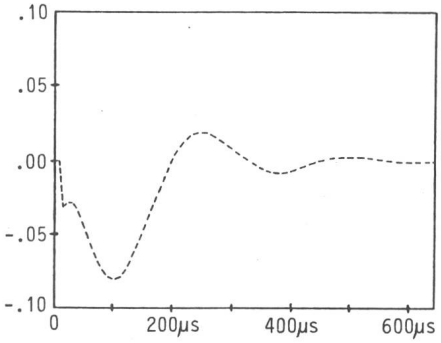

Fig. 8 Impulsantwort des Netzwerkes

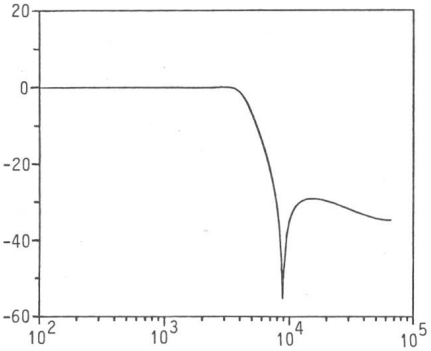

Fig. 4 Amplitudengang

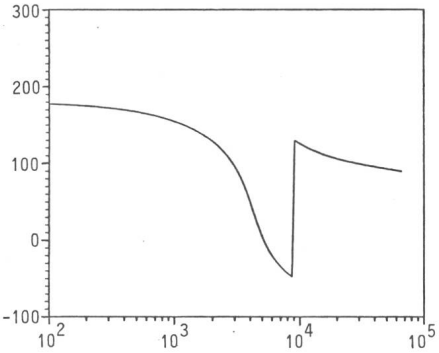

Fig. 5 Phasengang

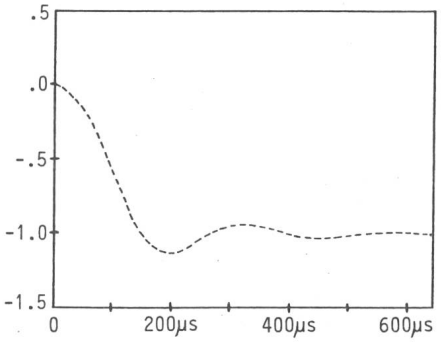

Fig. 9 Schrittantwort des Netzwerkes