

(21) WP G 06 F / 322 435 4

(22) 01.12.88

(44) 04.04.90

(71) Technische Universität Dresden, Direktorat Forschung, Mommsenstraße 13, Dresden, 8027, DD  
 (72) Leimer, Frank, Dr.-Ing.; Schwarz, Wolfgang, Prof. Dr. sc. techn., DD

(54) Schaltungsanordnung und Verfahren zur Erzeugung binärer Zufallsimpulse

(55) Komparator, Stromweiche, begrenzender Verstärker, Kondensator, Rückkopplung, Transfer-Kennlinie, Sättigungsspannung, Schwellwert, Haltezustand, Erholzustand, Eingangsspannung, Ausgangsspannung  
 (57) Die Erfindung betrifft eine Schaltungsanordnung und ein Verfahren zur Erzeugung von binären Zufallsimpulsen. Sie ist für alle Meß- und Prüfverfahren in der Nachrichten-, Rechen- und Regelungstechnik sowie der Bauakustik und Audiometrie geeignet. Aufgabe der Erfindung ist es, binäre Zufallsimpulse, d. h. zweiwertige Rechteckimpulse einstellbarer Pegel und stochastisch schwankender Impulsbreite, auf direktem Wege, ohne zusätzlichen Aufwand nachträglicher Aufbereitung mikrokosmischer Quellen oder amplitudenverrauschter Signale zu erzeugen. Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß ein Komparator, eine Stromweiche und ein setzbarer, begrenzter Verstärker in Reihe geschaltet und derart rückgekoppelt sind, daß der Ausgang des Verstärkers über einen Kondensator sowohl mit dem Eingang des Verstärkers als auch mit dem Eingang des Komparators verbunden ist. Die Transfer-Kennlinie des Verstärkers ist symmetrisch: Oberhalb einer positiven Schwellspannung begrenzt der Verstärker auf eine positive Sättigungsspannung, unterhalb einer negativen Schwellspannung auf eine negative Sättigungsspannung, das bedeutet, daß die Verstärkung positiv ist (sie sollte größer 2 sein) und daß Sättigungsspannungswerte und Schwellspannungswerte betragsmäßig jeweils gleich sind. Zusätzlich besitzt der Verstärker einen Setzeingang. Die Erfindung ist aus Fig. 1 ersichtlich. Fig. 1

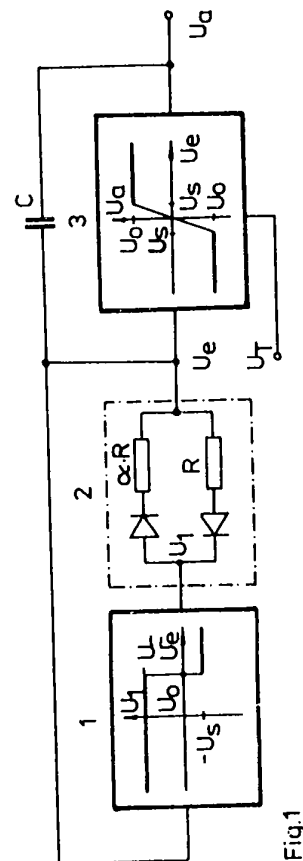


Fig. 1

### Patentansprüche:

1. Schaltungsanordnung zur Erzeugung von binären Zufallsimpulsen mit Rechteckimpulsen einstellbarer, konstanter Höhe und in einstellbaren Grenzen schwankender Breite, **dadurch gekennzeichnet**, daß ein Verstärker mit einem Eingang und einem Setzeingang, eine Stromweiche und ein Komparator in Reihe geschaltet sind, die Rückkopplung derart erfolgt, daß der Ausgang des Verstärkers über einen Kondensator sowohl mit dem Eingang des Verstärkers als auch mit dem Eingang des Komparators verbunden ist, der Verstärker eine symmetrische Transfer-Kennlinie besitzt, der Ausgang des Verstärkers der Ausgang der Schaltungsanordnung ist und der Setzeingang des Verstärkers zum Einspeisen von Rücksetzimpulsen geeignet ist.
2. Verfahren zur Erzeugung von binären Zufallsimpulsen mit Rechteckimpulsen einstellbarer konstanter Höhe und in einstellbaren Grenzen schwankender Breite, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Ausgangsspannung des Verstärkers oberhalb einer positiven Schwellspannung auf einen konstanten HIGH-Pegel und unterhalb einer negativen Schwellspannung auf einen konstanten LOW-Pegel begrenzt wird, die Ausgangsspannung auf den LOW-Pegel gesetzt wird, wenn die Spannung am Setzeingang größer als am Eingang des Verstärkers ist, der Komparator oberhalb einer fest eingestellten Schwellspannung eine kleinere konstante Ausgangsspannung als unterhalb der Schwelle hat, die Stromweiche bei Stromfluß von ihrem Eingang zum Ausgang einen höheren Widerstand als in rückwärtiger Richtung besitzt, Pegel und Schwellwerte der Schaltungsteile so eingestellt sind, daß der nach einmaligem kurzen Rücksetzen des Verstärkers folgende erste instabile Zustand (Haltezustand) länger dauert als der unmittelbar darauffolgende zweite instabile Zustand (Erholzustand), ein Rücksetzen während des Haltezustandes ausgeschlossen wird, während des Erholzustandes aber stets möglich ist und die Rücksetzimpulse im Abstand kürzer sind als die Dauer eines ungestörten Erholzustandes.

Hierzu 2 Seiten Zeichnungen

### Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft eine Schaltungsanordnung und ein Verfahren zur Erzeugung von binären Zufallsimpulsen, mit Rechteckimpulsen einstellbarer konstanter Höhe und in einstellbaren Grenzen schwankender Breite. Sie ist für alle Meß- und Prüfverfahren in der Nachrichten-, Rechen- und Regelungstechnik sowie der Bauakustik und Audiometrie geeignet.

### Charakteristik der bekannten technischen Lösungen

In vielen Anwendungsfällen von Rechteck-Impulsspannungen stochastisch verteilter Breite und konstanter Höhe begnügt man sich mit dem Pseudozufall. Dabei sind rückgekoppelte Schieberegisterketten die am häufigsten verwendete Pseudoräuschquelle (z. B. DE 31 29911). Die prinzipielle Periodizität des abgegebenen Signales ist der hauptsächliche Nachteil dieser Lösung. Ihn durch Erzielen möglichst großer Periodendauern zu mildern ist das Ziel vieler Patente. Eine originelle Alternative ist in DD 217 101 angegeben, wonach Pseudoräuschen durch periodisches Triggern einer monostabilen Kippstufe in deren Entladephase und nachfolgende Tiefpaßfilterung gewonnen werden kann. Allerdings enthält die Schrift keine Hinweise oder Vergleiche bezüglich der erreichbaren Periodenlänge.

Echtes Rauschen ist durch theoretisch unendlich lange Perioden gekennzeichnet. Die relevanten Quellen lassen sich in zwei generell unterschiedliche Gruppen einteilen. Die erste nutzt Zufallserscheinungen mikrokosmischen Ursprungs oder abgeleitete Folgeprozesse aus: Das Rauschen von elektrischen Widerständen oder Dioden (US 3967 184, DD 242 315, DE 28 20 426, JP 58-5006, SU 112 3088), die Zerfallsstrahlung radioaktiver Präparate (DE 23 13 699, JP 58-166 448), Netzspannungsschwankungen (SU 12 46 907). Ihnen allen ist der Nachteil eigen, daß kleine Initialsignale erst verstärkt und oftmals geeignet transformiert werden müssen. Eine moderne Alternative stellen Anordnungen unterschiedlichster Art dar, die determiniert, aber nichtperiodisch und mit unmittelbar verwertbarer Amplitude schwingen und für die sich die Bezeichnung „chaotische Systeme“ durchgesetzt hat. Hier gibt es bereits eigene (DD 244 429, DD 297 267) und ausländische Lösungen (SU 123 8131, SU 132 7098, SU 117 7810, SU 114 9375) zur Erzeugung periodisch getakteter Impulsspannungen mit im Betriebsspannungsbereich schwankender Amplitude, die durch analoge Filter leicht in zeitkontinuierliche Rauschspannungen gewandelt werden können. Ein Nachteil dieser zweiten Gruppe von Rauschquellen ist ihre Empfindlichkeit der Rauschparameter gegenüber Bauelemente- und Betriebsparametern, die noch ungenügend erforscht ist.

Um nun binäre Zufallsimpulse zu erzeugen, ist es im Sinne der bekannten technischen Lösungen möglich, die amplitudenverrauschten Signale einer Quelle aus den genannten beiden Gruppen mit einem Trigger oder Komparator zu formen.

## Ziel der Erfindung

Mit einer Schaltungsanordnung und einem Verfahren sind direkt und ohne den Umweg über ein amplitudenverraushtes Signal und ohne zusätzliche Verstärkung binäre Zufallsimpulse zu erzeugen.

## Darlegung des Wesens der Erfindung

Aufgabe der Erfindung ist es, binäre Zufallsimpulse, d. h. weiwertige Rechteckimpulse einstellbarer Pegel und stochastisch schwankender Impulsbreite, auf direktem Wege, ohne zusätzlichen Aufwand nachträglicher Aufbereitung mikrokosmischer Quellen oder amplitudenverrauschter Signale zu erzeugen.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß ein Komparator, eine Stromweiche und ein setzbarer, begrenzter Verstärker in Reihe geschaltet und derart rückgekoppelt sind, daß der Ausgang des Verstärkers über einen Kondensator sowohl mit dem Eingang des Verstärkers als auch mit dem Eingang des Komparators verbunden ist. Die Transfer-Kennlinie des Verstärkers ist symmetrisch: Oberhalb einer positiven Schwellspannung begrenzt der Verstärker auf eine positive Sättigungsspannung, unterhalb einer negativen Schwellspannung auf eine negative Sättigungsspannung, das bedeutet, daß die Verstärkung positiv ist (sie sollte größer 2 sein) und daß Sättigungsspannungswerte und Schwellspannungswerte betragsmäßig jeweils gleich sind. Zusätzlich besitzt der Verstärker einen Setzeingang. Wenn die Spannung am Setzeingang größer als die am Eingang des Verstärkers ist, liegt am Ausgang des Verstärkers die negative Sättigungsspannung. Übersteigt die Eingangsspannung des Komparators einen Schwellwert, der gleich dem positiven Sättigungswert des Verstärkers ist, so schaltet der Ausgang des Komparators von einem positiven Wert, der ebenfalls gleich dem positiven Sättigungswert des Verstärkers ist, auf einen negativen Wert, der gleich der negativen Schwellspannung des Verstärkers ist.

Diese Schaltung verharrt in einem statisch stabilen Zustand, solange der Verstärker nicht gesetzt wird. Durch einen den positiven Sättigungswert des Verstärkers übersteigenden Impuls wird die Schaltungsanordnung in einen ersten dynamisch stabilen Zustand, als Haltezustand bezeichnet, gebracht. Seine Zeitdauer wird durch die Höhe der beschriebenen Spannungen, den Kondensator und den Widerstand des relevanten Pfades der Stromweiche bestimmt. Erreicht die Eingangsspannung des Verstärkers den negativen Schwellwert, kippt die Schaltung in einen zweiten dynamisch stabilen Zustand, der als Erholzustand bezeichnet werden soll. Seine Dauer wird durch die beschriebenen Spannungswerte, den Kondensator und den anderen Pfad der Stromweiche bestimmt. Unterschreitet die Eingangsspannung am Komparator dessen Schwellwert, so schaltet sein Ausgang auf den positiven Spannungswert, und die Schaltung verharrt im statisch stabilen Ausgangszustand bis zu einem eventuellen weiteren Setzimpuls.

Die Schaltung hat die besonderen Eigenschaften, daß sie während des Haltezustandes nicht, wohl aber auch während des Erholzustandes auf Setzimpulse reagiert und daß bei dadurch verkürztem Erholzustand auch der folgende Haltezustand etwa proportional kürzer ist. Werden nun die Widerstandswerte der Stromweiche so gewählt, daß der Haltezustand länger als der vorangegangene Erholzustand dauert und werden an den Setzeingang periodische Impulse so hoher Frequenz gelegt, daß generell jeder Erholzustand verkürzt wird, so ergeben sich am Ausgang des Verstärkers, der gleichzeitig Ausgang der Schaltungsanordnung ist, binäre Zufallsimpulse.

## Ausführungsbeispiel

Zur Erläuterung der Erfindung an einem Beispiel zeigen

Fig. 1: das Blockschaltbild der erfindungsgemäßen Anordnung,

Fig. 2: eine bekannte Variante zur Realisierung der Teilschaltung „Verstärker mit Begrenzung“,

Fig. 3: eine bekannte Variante zur Realisierung der Teilschaltung „Komparator mit konstanter Schwellspannung“,

Fig. 4: charakteristische Spannungsverläufe bei zwei typischen Triggerfrequenzen,

Fig. 5: eine Poincaré-Abbildung zur Veranschaulichung der rekursiven Entwicklung der Impulsbreitenwerte.

Die Schaltung besteht prinzipiell aus einem begrenzenden Verstärker 3, dessen Transfer-Kennlinie durch die Gleichungen

$$U_a(U_e) = \begin{cases} +U_o & \text{für } U_e = +U_s \\ U_o + U_e & \text{für } |U_e| < U_s \\ -U_o & \text{für } U_e = -U_s \end{cases} \quad (1)$$

idealisiert werden kann, der durch einen Kondensator C vom Ausgang auf den Eingang rückgekoppelt wird und der einen Eingang für Triggerimpulse  $U_T$  besitzt, die gemäß der Beziehung

$$\begin{aligned} U_a &= -U_o & \text{für } U_T > U_e \\ U_a &= U_a(U_e) & \text{gemäß Gl. (1) für } U_T \leq U_e \end{aligned} \quad (2)$$

bei geeignetem HIGH- und LOW-Pegel den Ausgang des Verstärkers 3 definiert setzen können, aus einem Komparator 1 mit fester, positiver Schwellspannung gemäß

$$U_1 = \begin{cases} U_0 & \text{für } U_e \leq U_0 \\ -U_S & \text{für } U_e > U_0 \end{cases} \quad (3)$$

und einer dem Komparator 1 nachgeschalteten Stromweiche 2, deren Ausgang gleichzeitig mit den Eingängen des Verstärkers und des Komparators verbunden ist.

Die Flußspannung der Dioden in der Stromweiche sei in der folgenden Erläuterung vernachlässigt. Dann ruht bei offenem Triggereingang bzw. bei  $U_t < U_0$  die Gesamtanordnung in einem stabilen Zustand ( $U_a = U_e = U_1 = +U_0$ ). Ein erfolgreicher Triggerimpuls setzt die Schaltung in den Zustand ( $U_a = U_e = -U_0$ ,  $U_1 = +U_0$ ), der statisch instabil ist, weil über den Widerstand  $\alpha * R$  die Aufladung des Kondensators C beginnt, die nach

$$T_H = \alpha * R * C * \ln \frac{2 * U_0}{U_0 + U_S} \quad (4)$$

bei  $U_e = -U_S$  zum mitgekoppelten Umschalten des Verstärkers 3 führt. Der folgende Zustand ( $U_a = +U_0$ ,  $U_e = 2 * U_0 - U_S$ ,  $U_1 = -U_S$ ) ist ebenfalls instabil, es beginnt die Entladung des Kondensators C, die nach

$$T_E = R * C * \ln \frac{2 * U_0}{U_0 + U_S} \quad (5)$$

bei  $U_e = U_0$  durch das Umschalten des Komparators 1 plötzlich abgebrochen wird. Der Kondensator C ist gerade entladen; die Schaltung verharrt im statisch stabilen Ausgangszustand. Triggerimpulse während des ersten instabilen Zustandes sind ohne Wirkung, während des zweiten hingegen bewirken sie die Auslösung des geschilderten Vorgangs, allerdings ist der Kondensator dann noch vorgeladen, so daß sich die folgende Aufladezeit verkürzt.

In Fig. 4 ist der exponentielle Verlauf der Spannung  $U_e$  während der instabilen Phasen durch Geraden ersetzt worden, eine Näherung, die um so berechtigter ist, je kleiner das Verhältnis  $(U_0 - U_S)/U_0$  ist. Speziell für  $U_S/U_0 = 0,5$ , wie es in allen Abbildungen gewählt wurde, beträgt die relative maximale Abweichung vom exponentiellen Verlauf nur 10,7%. Akzeptiert man diese Linearisierung, so folgt auf jede vorzeitig durch erneutes Triggern unterbrochene Entladephase der Dauer  $T_E'$  eine verkürzte Haltephase  $T_H' = \alpha * T_E'$ . Davon geht die folgende Rechnung aus. Berücksichtigt man den exponentiellen Verlauf, so läßt sich aus dem Ansatz  $T_H' = \alpha * k(T_E') * T_E$  eine Korrekturfunktion  $k(T_E')$  errechnen, die für  $U_S/U_0 = 0,5$  maximal 1,18 werden kann, die determiniert, unabhängig von  $\alpha$  ist und deshalb den Effekt der Schaltung qualitativ nicht beeinflußt.

Die Periodendauer des Triggersignals sei T. Dann folgt mit den Abkürzungen  $\Delta = T_E'/T$  und  $x = T/T_E$  aus der Poincaré-Analyse folgende, das globale Verhalten der erfindungsgemäßen Anordnung für beliebige Triggerfrequenzen beschreibende Beziehung:

$$\Delta(n+1) = 1 - (\alpha * \Delta(n)) \bmod 1 \quad \text{für } (\alpha * \Delta(n)) \bmod 1 > \frac{x-1}{x} \quad (6)$$

$$\Delta(n+1) = 1/x \quad \text{für } (\alpha * \Delta(n)) \bmod 1 \leq \frac{x-1}{x}$$

mit  $n = 0, 1, 2, \dots$

mit  $n = 0, 1, 2, \dots$

Aus der gesamten daran diskutierbaren Lösungsvielfalt interessiert im Sinne der Erfindung der Bereich  $x < 1$ ,  $\alpha > 1$ , d. h.  $T < T_E'$ ,  $T_H > T_E$ . Unter diesen Bedingungen schwingt die Schaltung chaotisch, d. h. nichtperiodisch, wobei für  $\alpha \geq 0,5 * (1 + \sqrt{5})$  alle Erholzeiten  $0 < T_E' \leq T$  vorkommen, ihre Verteilungsdichtefunktion allerdings von  $\alpha$  abhängt und nur für ausgewählte  $\alpha$ -Werte konstant ist. Fig. 5 veranschaulicht die rekursive Entwicklung für  $\alpha = 1,5$ ,  $x = 0,8$ .

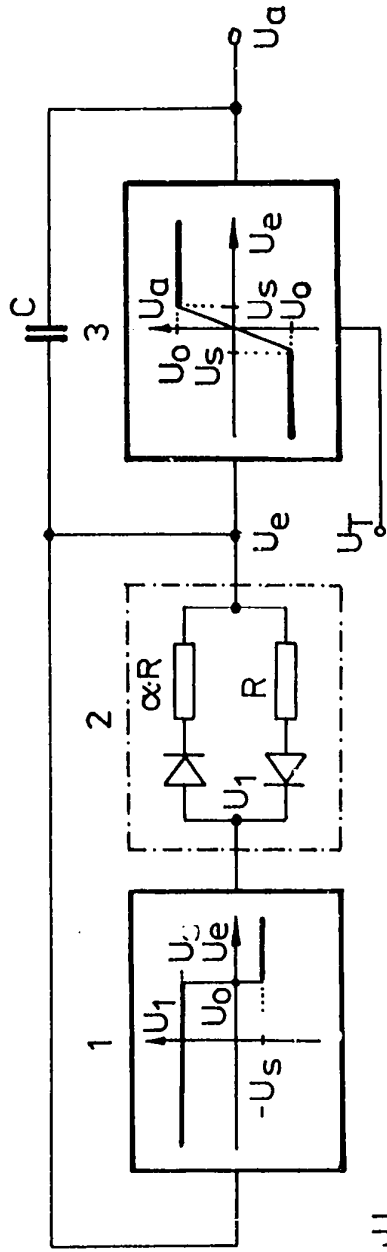


Fig.1

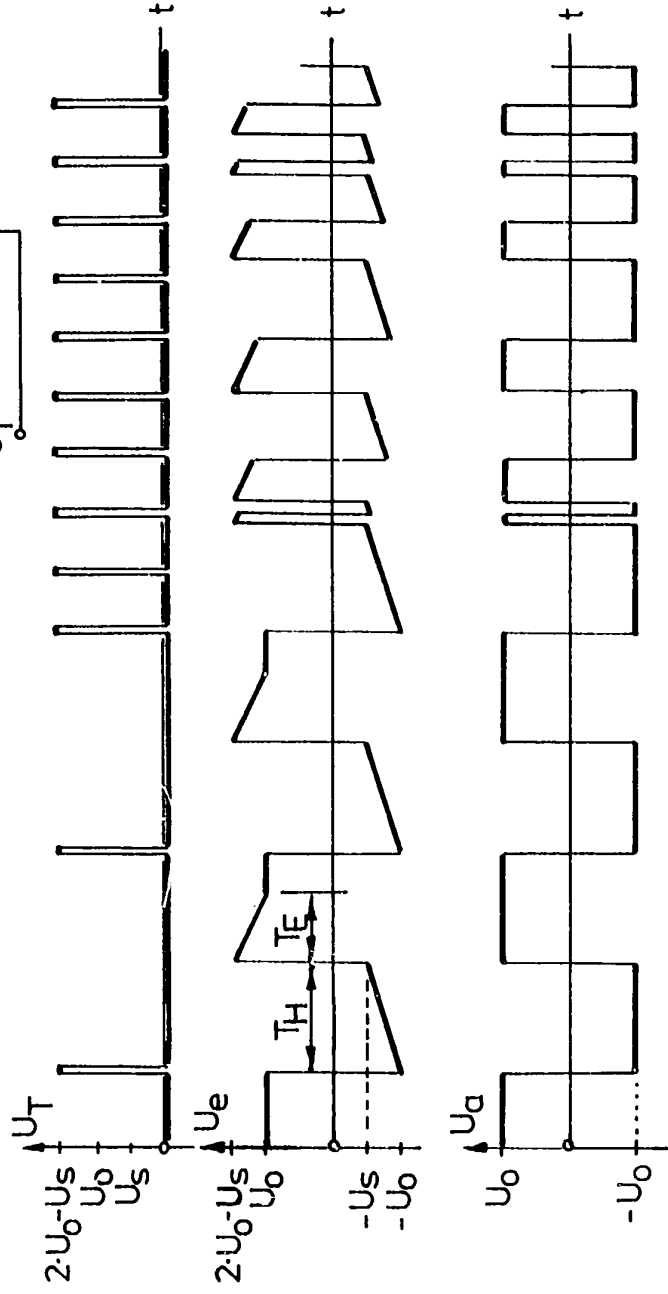


Fig.2

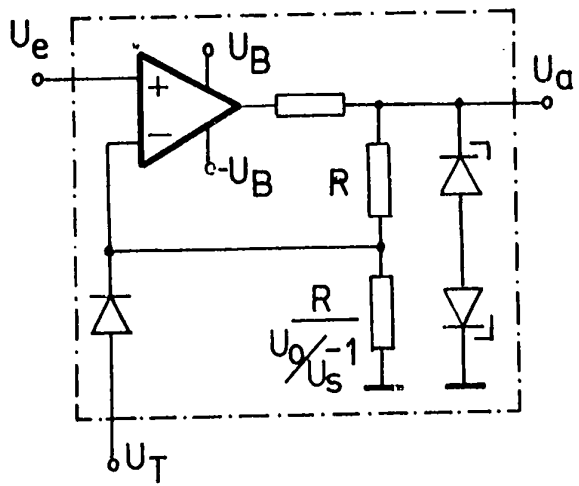


Fig. 3

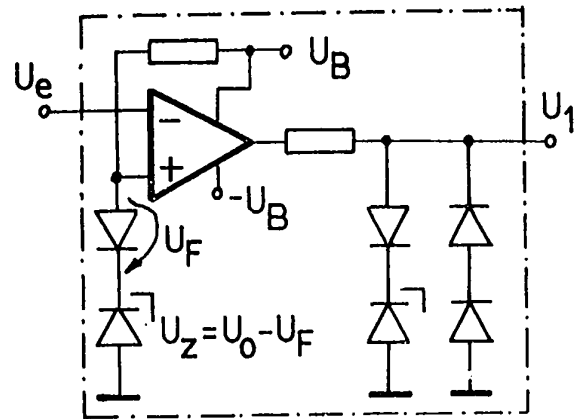


Fig. 4

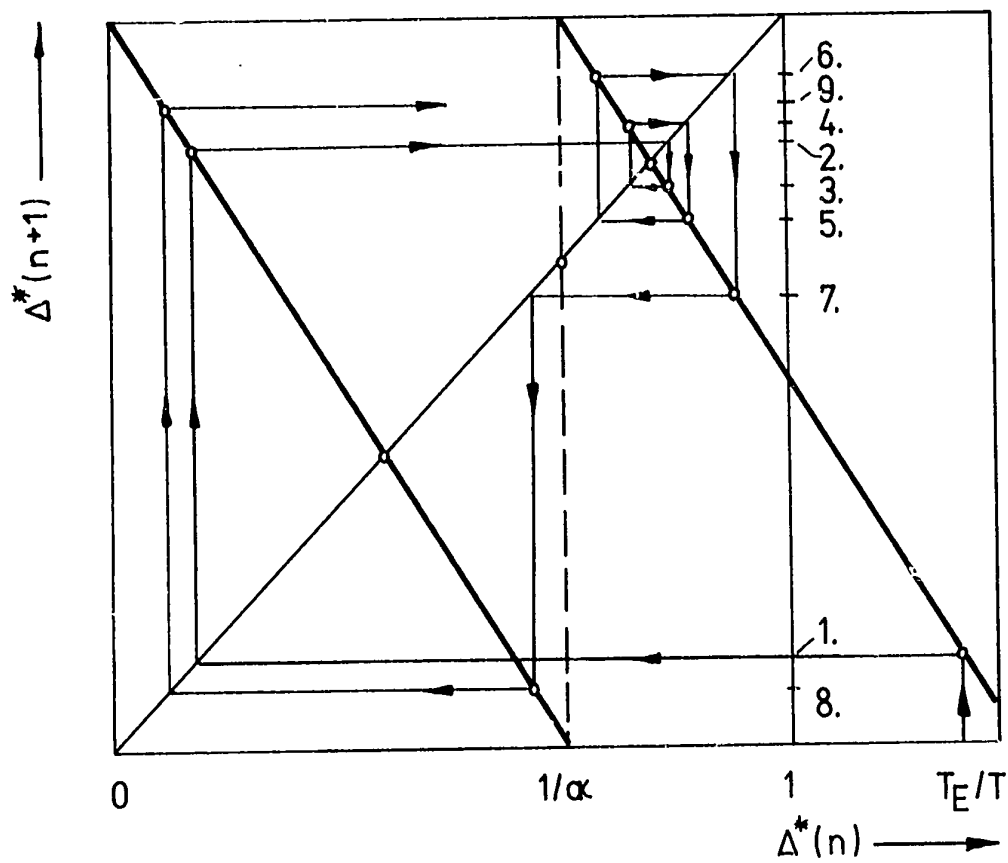


Fig. 5