

Interner Bericht
DESY K1-72/3
August 1972

DESY-Bibliothek
11. DEZ. 1973

Hybride Simulation einer Thyristor-Gleichstromversorgung

von

M. Levy

" Hybride Simulation einer Thyristor-Gleichstromversorgung "

Einführung

Die meisten Starkstrom-Gleichrichtergeräte, die unterschiedliche Arten von Strahltransportmagnete bei DESY speisen, sind "Mehrphasen-Thyristorgeregelte Einheiten". Dieser Bericht beschreibt die Simulation einer derartigen Einheit auf dem Hybrid-Rechner HR 860 Telefunken. Das Blockdiagramm der Simulationsanordnung ist in Bild 1. angegeben. Die Simulation wurde zur Ermittlung der Fourier-Analyse von Strom und Spannung des Gleichrichters benutzt.

A) Simulation auf dem Analog-Rechner

Für das Problem wurden ein 3-phasen Wechselstromgenerator, eine 3-phasige Thyristorbrückenschaltung, ein Magnet mit konstanten Werten für R und L, sowie ein P-I-Regler und eine Gittersteuer-einheit nachgebildet. Die Verbindungen kann man in Abb.3 sehen.

Den 3-phasen Wechselstromgenerator kann man in Teil "a" von Abb.3 sehen. Die Verbindung mit nur 3 Operationsverstärkern basiert auf [1]. Die 3 Ausgangsphasen kann man dann wie folgt beschreiben:

$$\begin{aligned} Y_1(\tau) &= \frac{a}{Y_M} \sin(\omega\beta\tau + \phi) \\ Y_2(\tau) &= \frac{a}{Y_M} \sin(\omega\beta\tau + \phi + \frac{2\pi}{3}) \\ Y_3(\tau) &= \frac{a}{Y_M} \sin(\omega\beta\tau + \phi - \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (A.1)$$

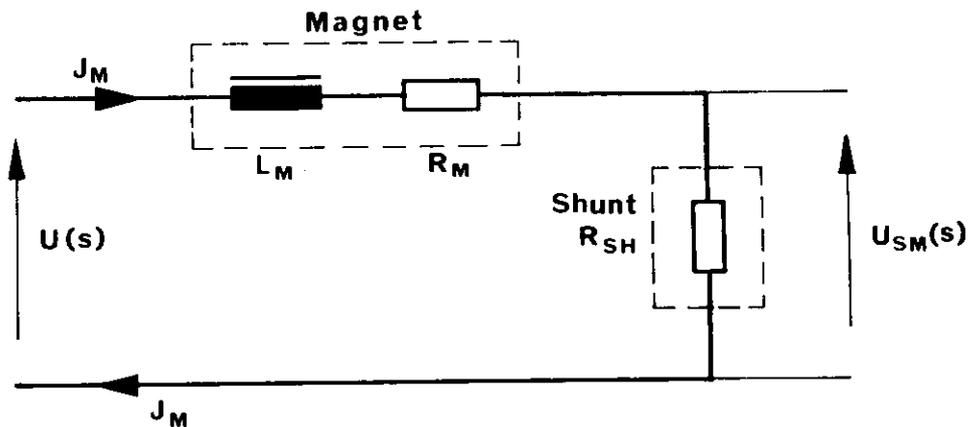
- wobei
- τ = Maschinenzeit
 - β = Zeitskalierungsfaktor (1/300) *
 - ϕ = Anfangsphase (0) *
 - ω = Winkelgeschwindigkeit = $2\pi f$ ($314 \frac{\text{Rad}}{\text{sec}}$) *
 - a = Amplitudenwert (1) *
 - Y_M = Amplitudenskalierungsfaktor (2) *

ist.

* In Klammern stehen die für diese Rechnung benutzten Werte.

Die Thyristoren wurden in 2 separaten Schaltungen gemäß ihren 2 Haupteigenschaften nachgebildet. In Teil "b" der Abb.3 ist die Schalteigenschaft mit Hilfe eines mechanischen Schalters (Relaisschließer) nachgebildet.

Die Gleichrichtereigenschaft des Thyristors ist mit Hilfe von Dioden (Typ 1N4007), die zu einer Drehstrombrückenschaltung verbunden sind, nachgebildet. wie man in Teil "c" von Abb.3 sehen kann.



In obigem Schaltbild ist die Lastseite des Gleichrichters mit allen elektrischen Größen dargestellt.

Der Magnet als Lastelement ist, wie in Teil "d" der Abb.3 zu sehen, gemäß der folgenden Gleichung

$$J_M(s) = \frac{U(s)}{R_M + sL_M} \quad (A2)$$

nachgebildet, wobei R_M bereits den Shuntwiderstand R_{SH} enthält. Hierbei gilt $R_{SH} = 0,01 \cdot R_M$.

Durch Umwandlung von Gleichung (A2) erhält man die für den Analog-Rechner verwendete Übertragungsfunktion:

$$\frac{J_M(s)}{U(s)} = \frac{1}{R_M} \cdot \frac{1}{1 + sT_M} \quad (A3)$$

wobei $s = j\omega$ der Laplace-Operator und T_M die Zeitkonstante des Magneten ist.

Die für den u.g. P-I-Regler benötigte Reglereingangsgröße ϵ wird durch einen Soll-Istwert-Vergleich gewonnen, wobei

$$U_{SM} = J_M \cdot R_{SH} \quad (A4)$$

der Istwert und U_{ref} der Sollwert ist.

Somit ist:

$$\epsilon = U_{ref} - U_{SM} = U_{ref} - J_M \cdot R_{SH} \quad (A5.1)$$

Bezieht man jedoch die Referenzspannung statt auf U_{SM} auf U_{RM} , so gilt:

$$U_{ref}' = U_{ref} \cdot \frac{R_M}{R_{SH}} \quad \text{und} \quad \epsilon' = \epsilon \frac{R_M}{R_{SH}} \quad (A5.2)$$

Multipliziert man die Gleichung (A5.1) mit dem Faktor R_M/R_{SH} und setzt danach die Gleichungen (A5.2) ein, so erhält man:

$$\mathcal{E}' = U_{ref}' - J_M \cdot R_M \quad . \quad (A5.3)$$

Es ist aber

$$J_M = \frac{U(s)}{R_{SH} + R_M + sL_M} \quad ; \quad (A5.4)$$

wegen $R_{SH} \ll R_M$ wird

$$J_M = \frac{U(s)}{R_M(1 + sT_M)} \quad . \quad (A5.5)$$

Dieser Wert von I_M in Gleichung (A5.3) eingesetzt ergibt:

$$\mathcal{E}' = U_{ref}' - \frac{U(s)}{1 + sT_M} \quad . \quad (A5.6)$$

Das ist jedoch der Ausgangswert des Operationsverstärkers in Teil "e" von Abb.3.

Der Regler, welcher die Stromversorgungseinheit steuert, ist ein P-I-Typ. Die Nachbildung ist bereits in [2] mit separater Parametervariation und der Übertragungsfunktion

$$F(s) = \frac{1 + sK_R T_R}{sT_R} \quad (A6)$$

beschrieben, wobei die Werte K_R und T_R wie folgt berechnet werden:

$$K_R = \frac{1}{p_{a10}} \times \frac{1}{p_{a9}} \quad (A7)$$

$$T_R = (p_{a10} \times \beta) / 20 \times p_{a8} \quad .$$

p_{a_i} sind hierbei Potentiometerwerte wie in Teil "f" der Abb.3 angegeben.

Die Teile "g" und "h" sind Hilfselemente zur Umformung und Begrenzung der Reglerausgangsspannung.

Der Gittersteuerkreis ist mit Hilfe von 3 Rampengeneratoren je Halbperiode nachgebildet. Der Zündpuls für die Thyristoren, in diesem Fall der mechanische Schalter, beginnt, sobald der Komparatorvergleich zwischen der entsprechenden Rampenspannung und der Reglerausgangsspannung einen Vorzeichenwechsel ergibt. Das Pulsdiagramm für den Rampengenerator (Schaltung in Teil "i" der Abb.3) ist in Abb.4 wiedergegeben.

Die Zündpulse für die Thyristorschaltereinheit sind in den Abb.5 und 6 zu sehen. Das Diagramm in Abb.6 zeigt die Ausgangsspannung der Stromversorgungseinheit für einen sicheren Zündwinkel.

Das Digitale Programmierfeld (DPF) wurde zum Ein- und Ausschalten und zur Steuerung des Simulationsnetzwerkes verwendet. Die Verbindungen hierfür sind in Abb.7 angegeben. Die Flip-Flops (FF) in Abb.7 wurden als Speicherelemente verwendet. Ein Komparator-Ausgangspuls bewirkt an dem FF-Ausgang "A" ein logisches "L", welches den mechanischen Schalter schließt. Der Schalter steht in dieser Position solange, bis ein Digital-Puls (immer wenn die Rampenfunktion Null-Pegel erreicht) den FF-Ausgang "A" zu Null werden läßt und somit den Schalter öffnet. Eine spezielle Verbindung wurde hinzugefügt, um die Variation der Parameter auszuführen und diese zum Digital-Rechner zur Weiterberechnung zu übertragen. Die Verbindungen sind in Abb.8 wiedergegeben. Die Werte aller in dieser Simulation verwendeten Parameter sind in Tabelle 1 angegeben. Da der Ripple der Stromversorgungsausgangsspannung eine Funktion der Unsymmetrie des Netzes und der Gittersteuerereinheit ist, wurde so eine unsymmetrische Bedingung durch Einfügen einer Klirrfaktorfunktion zu Beginn des Rechenprogrammes realisiert.

B) Das Digitalprogramm

Der Digital-Rechner war verantwortlich für folgende Aufgaben:

- 1.) Schaltung des Rampengenerators und der FF's
- 2.) Übertragung und Berechnung der Parameterwerte
- 3.) Übertragung und Abtastung der Strom- und Spannungswerte
- 4.) Berechnung der Fourier-Analyse
- 5.) Ausdrucken der Daten und Ergebnisse.

Die logische Operation des Hybrid-Rechners ist im Fluß-Diagramm in Abb.9 wiedergegeben. Wie man sehen kann, sind die abgetasteten Daten nur für den Beharrungszustand genommen worden. Die Werte sind während 5 Perioden gemessen. Die Funktion $f(\tau)$ ist berechnet worden, wie ein Ein-Perioden Durchschnittswert für die Fourier-Analyse. Die Programme basieren auf [3] und sind in Abb.10 wie ein Flußdiagramm wiedergegeben. Die mathematische Näherung ist folgende:

Angenommen es wird eine periodische Schwingung in gleichen Zeitintervallen während einer Periode zu $2N$ Punkten abgetastet, dann kann man schreiben:

$$f(\tau) = A_0 + \sum_{k=1}^{2N-1} (A_k \cos \frac{\pi}{N} k \tau + B_k \sin \frac{\pi}{N} k \tau) + A_n \cdot \cos \pi \tau \quad (B1)$$

wobei $f(\tau_i)$ ist der abgetastete Wert und $i = 0, 1, 2, \dots, 2N-1$
 A_0 ist die Gleichstromkomponente von $f(\tau)$
 A_k, B_k sind die Amplituden der k -ten Harmonischen

Um A_k und B_k zu berechnen sei daran erinnert, daß die sin- und cos-Funktionen rechtwinklig aufeinander stehen.

Man kann somit schreiben:

$$A_0 = \frac{1}{2N} \sum_{i=0}^{2N-1} f(\tau_i) \quad (\text{B2})$$

$$A_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{2N-1} f(\tau_i) \cos\left(k \frac{\pi}{N} i\right) \quad (\text{B3})$$

$$B_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{2N-1} f(\tau_i) \sin\left(k \frac{\pi}{N} i\right) \quad (\text{B4})$$

$$A_N = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{2N-1} f(\tau_i) \cos(\pi i) \quad (\text{B5})$$

Um den relativen Einfluß der Harmonischen zu berechnen, wähle man die 1. Harmonische als Basiseinheit aus, in diesem Falle 50 Hz.

Die höheren Harmonischen haben den relativen Wert:

$$RL(k) = \left(\sqrt{(A(k)^2 + B(k)^2) / (A(1)^2 + B(1)^2)} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{B6})$$

Das FORTRAN-Programm für den Hybrid-Rechner ist in Abb. 11 angegeben.

ERGEBNISSE

Die folgenden Fälle wurden nachgebildet und berechnet:

- I. Symmetrische Betriebsweise
- II. Unsymmetrische Betriebsweise des Stromes herrührend von:
 - a) Eingang der Spannungsquelle
 - b) Rampengenerator

SCHLUBFOLGERUNG

An den Ergebnissen kann man sehen, daß die hier beschriebene Methode es erlaubt, das Verhalten der Stromversorgungseinheiten für verschiedene Bedingungen und Regelkreise zu untersuchen. Die Genauigkeit der Ergebnisse wird durch die numerische Berechnungsmethode und die Rechner Analog-Digital-Umsetzung begrenzt.

Mit unsymmetrischen Bedingungen zeigen die Simulationskreise die gleichen Ergebnisse wie in tatsächlich existierenden Stromversorgungseinheiten.

DANKSAGUNG

Ich möchte Fräulein Borchardt und Ihrer Gruppe für die mir gegebene Unterstützung während meiner Arbeit an dieser Aufgabe herzlich danken. Ebenso möchte ich den Herren Bothe und Gode für das gezeigte Interesse sowie für nützliche Diskussionen danken. Außerdem möchte ich Herrn Neumann für die redaktionelle Bearbeitung herzlich danken.

Literatur

1. W. Ammon; Schaltungen der Analogrechentechnik, Oldenburg, 1966.
2. M. Levy; Interner Bericht, DESY K1-71/1.
3. D. McCracken; Fortran with Engineering Applications,
J. Wiley & Sons, 1967.

Figure Captions

- Fig. 1 Block diagram for the simulated circuit.
- Fig. 2 Block diagram with L-C filter and voltage feed back loop.
- Fig. 3 Simulation network.
- Fig. 4 Pulse diagram for switching the ramp generators.
- Fig. 5 Pulse diagram for the Thyristors switches.
- Fig. 6 A.C and D.C output voltage of the power supply unit for a given firing angle.
- Fig. 7 Connections of the digital field of the analoge computer.
- Fig. 8 Switching the parameter values to the digital computer through A/D converter.
- Fig. 9 Flowchart diagram of the Hybrid programme.
- Fig. 10 Flowchart diagram of the Fourier analysis computation.
- Fig. 11 Fortran programme.
- Fig. 12 Spectrum analysis for the output voltage of the power supply unit as a function of KR for symmetric condition and TR = 0.11 sec.
- Fig. 13 as Fig. 12 for TR = 0.2 sec.
- Fig. 14 as Fig. 12 for unsymmetric condition
 $\hat{U}_R < \hat{U}_S$ and $\hat{U}_S = \hat{U}_T$ TR = 0.1 sec.
- Fig. 15 as Fig. 12 for unsymmetric condition ramp phase R faster than phase S and T TR = 0.1 sec.
- Fig. 16 as Fig. 12 but for the Magnet Current.

Fig. 17 as Fig. 13 but for the Magnet Current.

Fig. 18 as Fig. 14 but for the Magnet Current.

TABLE I

Param. value	Pot. No.	KIND of Pot.	VALUE of Pot.	REMARKS
$\frac{2\omega\beta}{\sqrt{3} n}$	α_1	S	0.1212	n input amplification
$\frac{\omega\beta}{\sqrt{3} n}$	α_2	S	0.0606	
$\frac{a}{Y_M} \cdot \sin\phi$	α_3		0.0	$\phi = 0$
$\frac{a}{Y_M} \sin 60$	α_4	S	0.4330	$a/Y_M = 0.5$
$-\frac{a}{Y_M} \sin 60$	α_5	S	-0.4330	
β/T_M	α_6	H	0.0333	$\beta = 1/300$ $T_M = 0.1 \text{ sec}$
$c_{REF.}$	α_7	H	variable	$0 \leq c \leq 0.7$
T'_R	α_8	H	variable	see Eq.A.6
K'_R	α_9	H	variable	see Eq.A.6
$K_R''T_R''$	α_{10}	H	variable	see Eq.A.6
Ramp Slope	α_{11}	S	0.400	
Initial value Ramp T	α_{12}	S	0.200	
Initial value Ramp S	α_{13}	S	0.600	
$\beta \omega_0$	α_{14}	S	0.628	$\omega_0 = 2\pi \times 30$
$\beta^2 \omega_0 / T_M$	α_{15}	S	0.0209	
$\frac{\rho \omega_0}{10} \left(1 + \frac{1}{T_M}\right)$	α_{16}	S	0.6908	

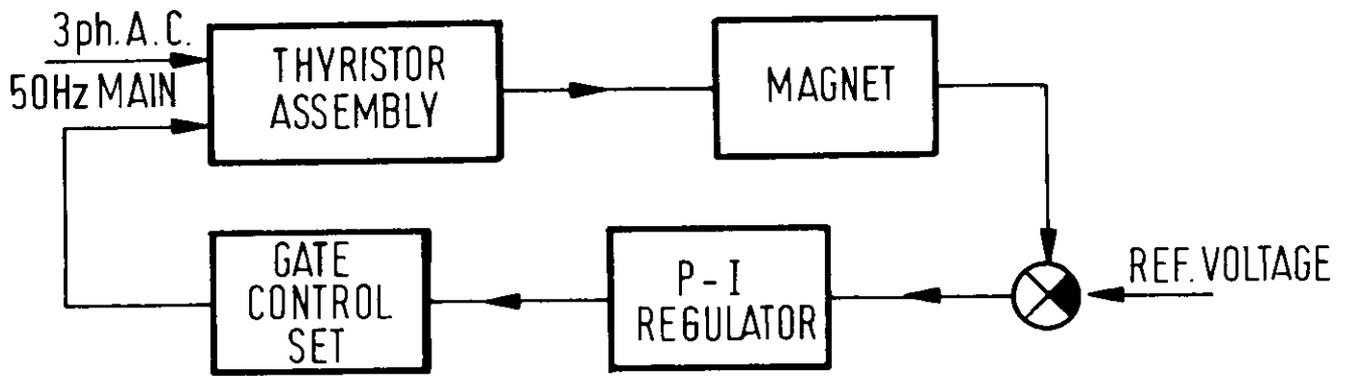


Fig. 1

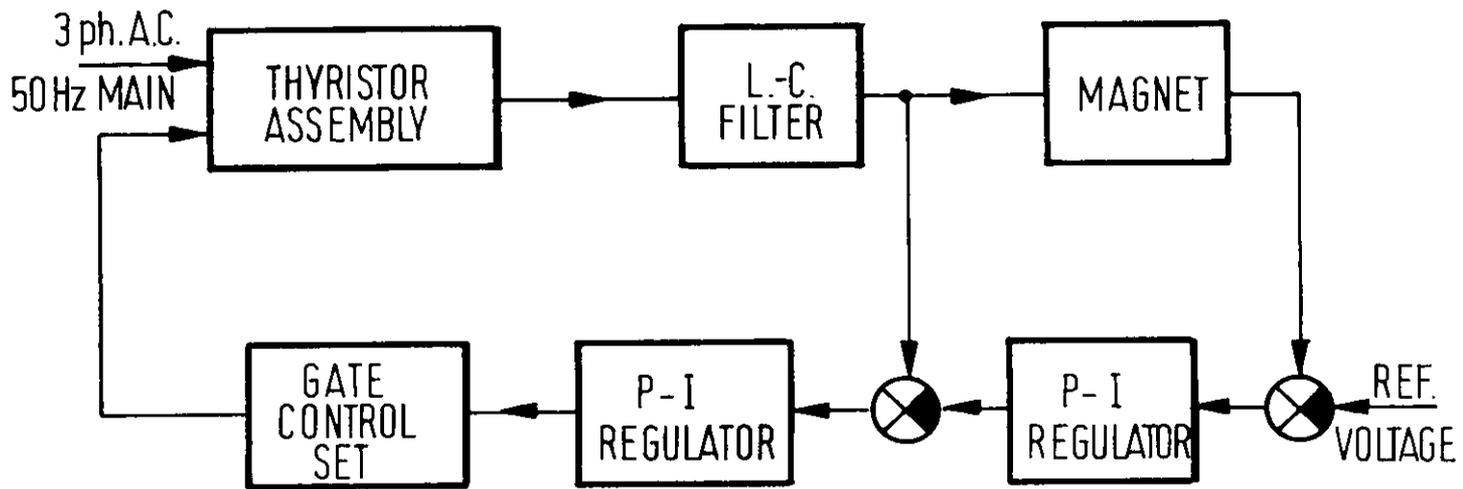


Fig. 2

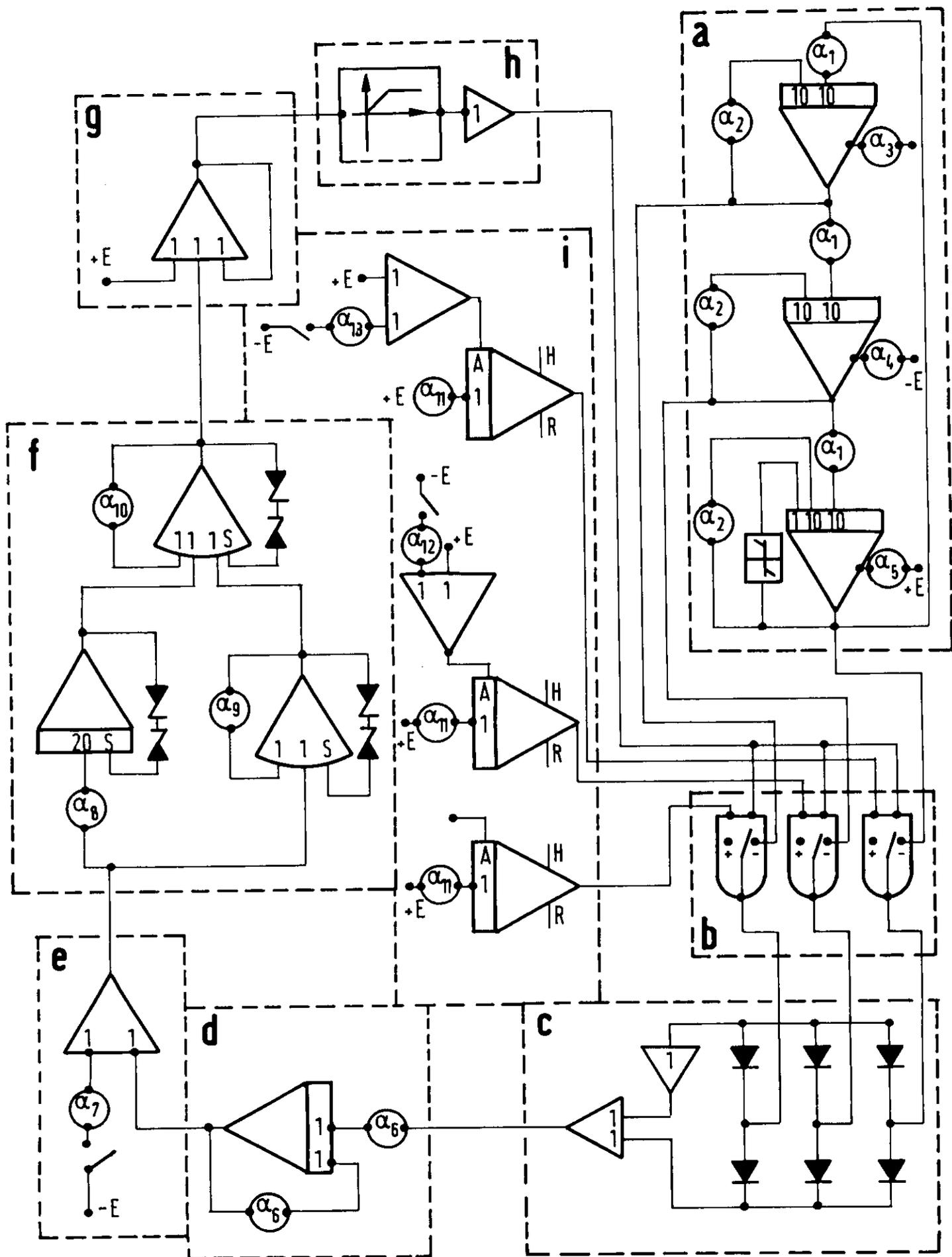


Fig. 3

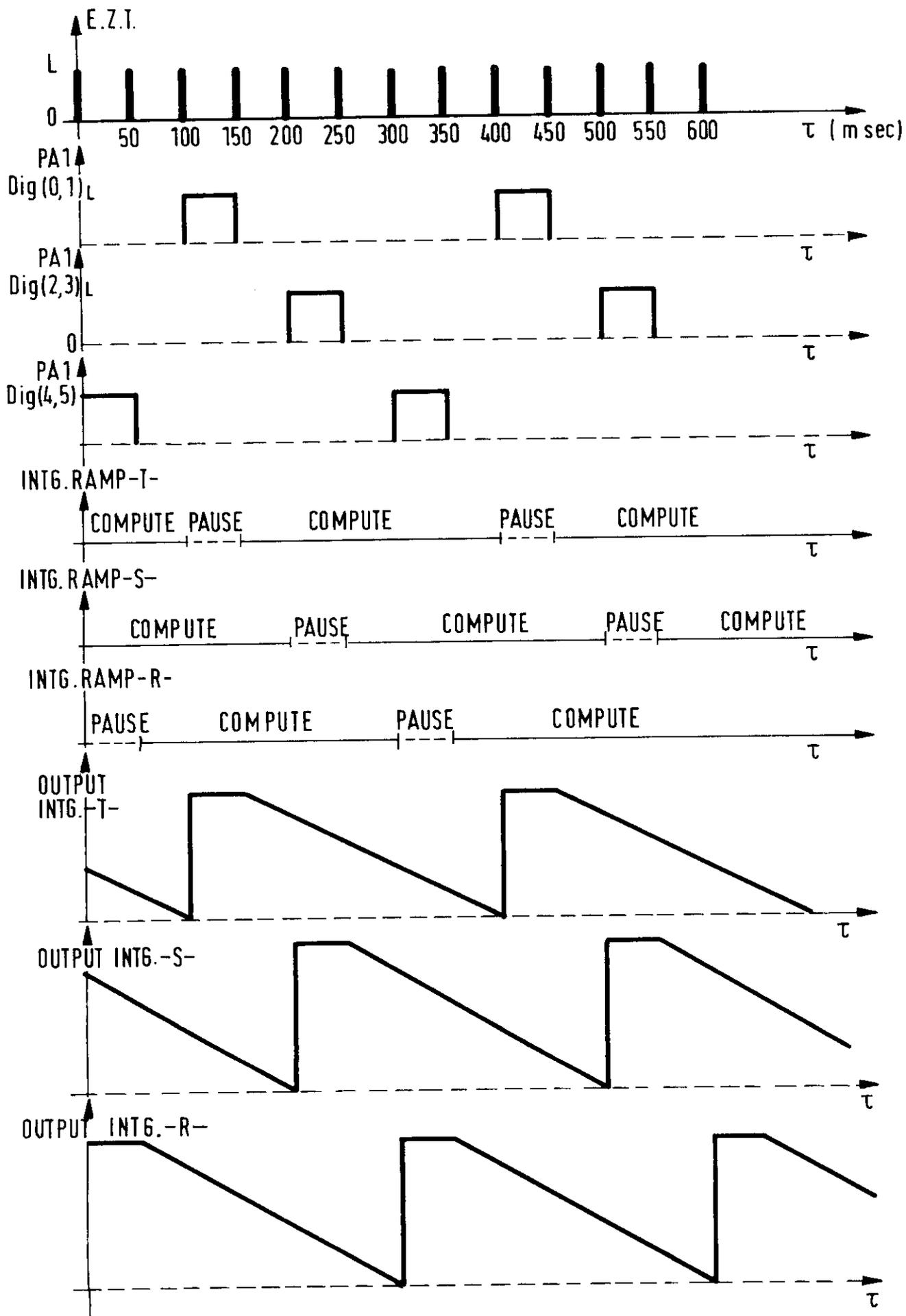


Fig.4

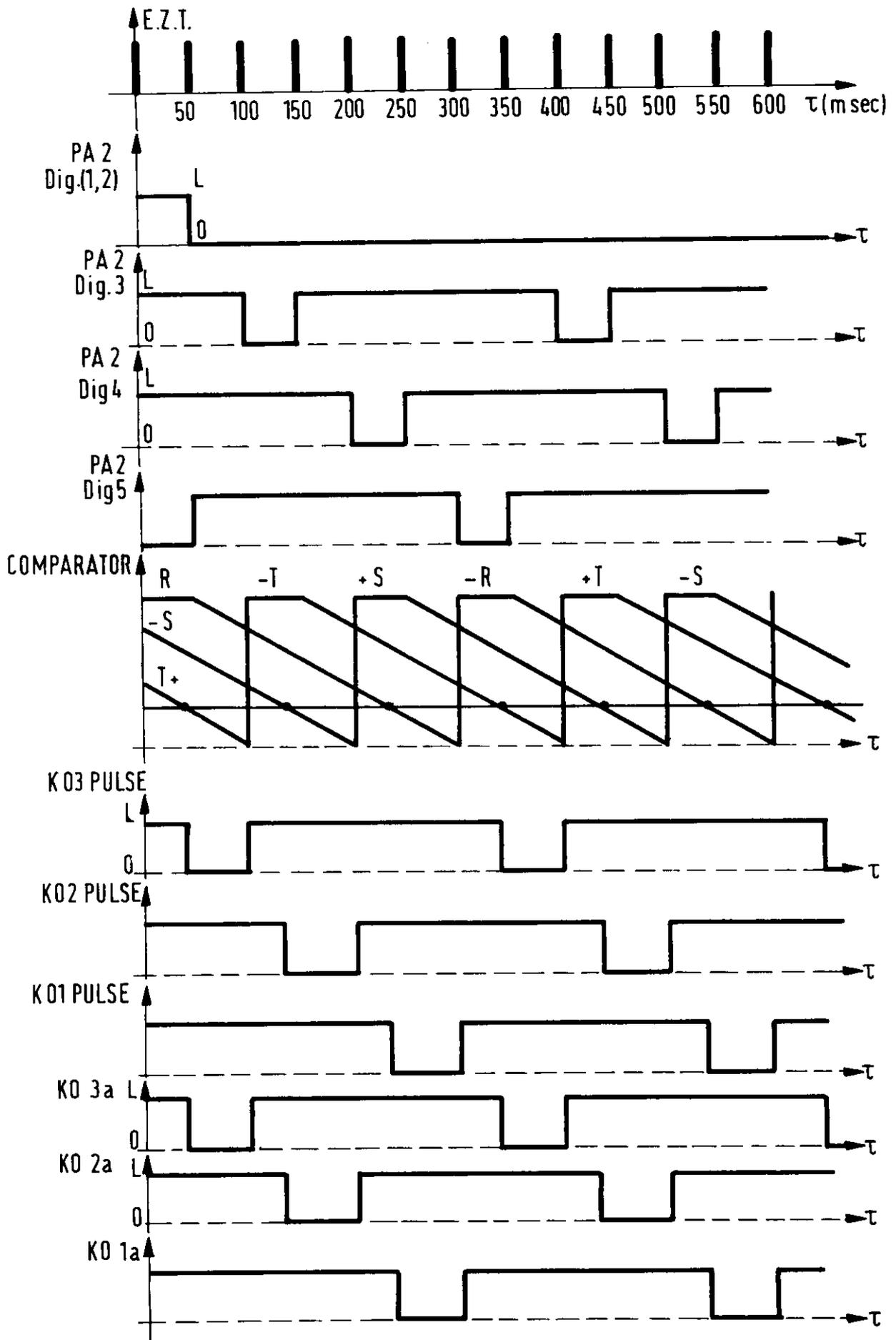


Fig.5

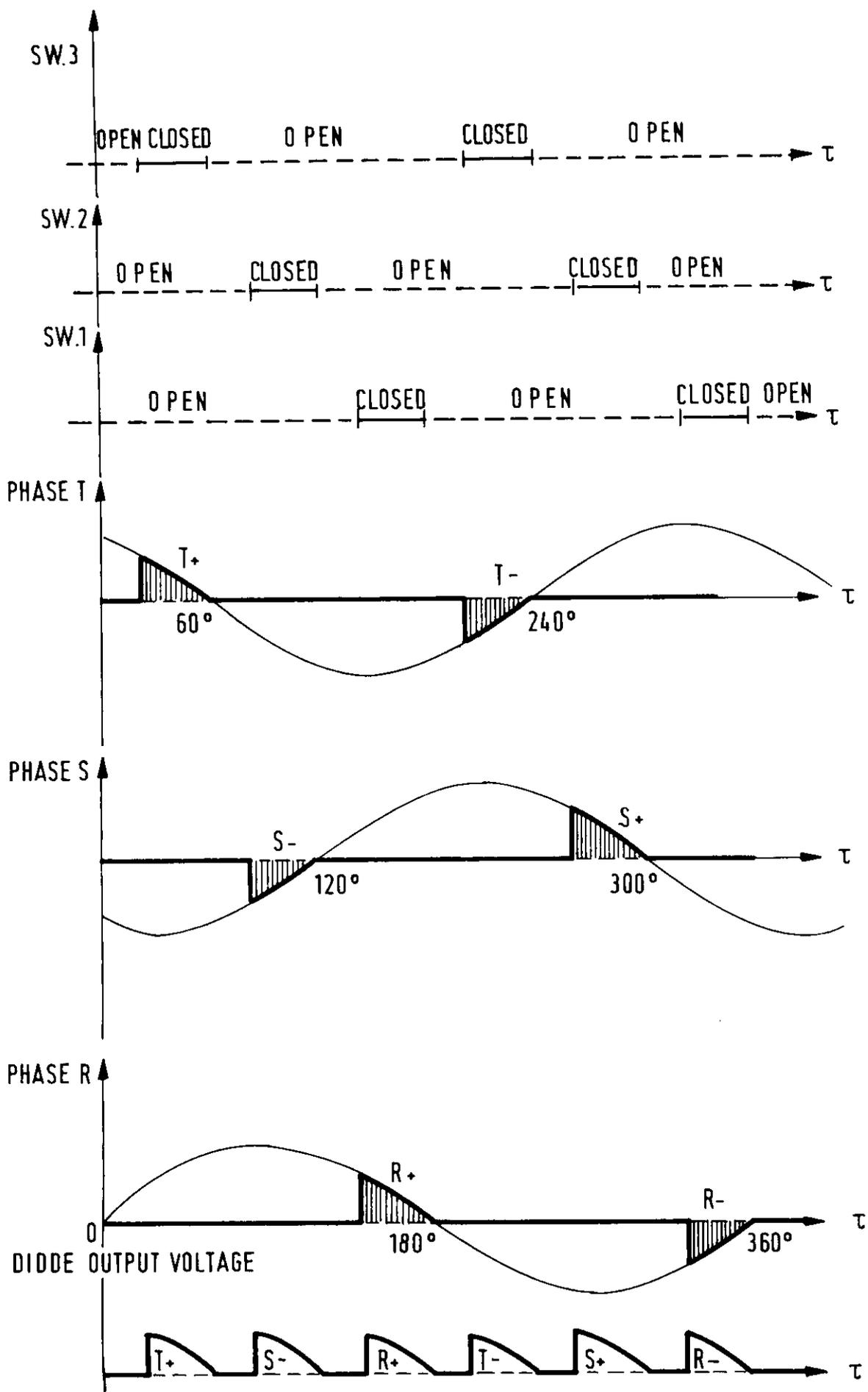
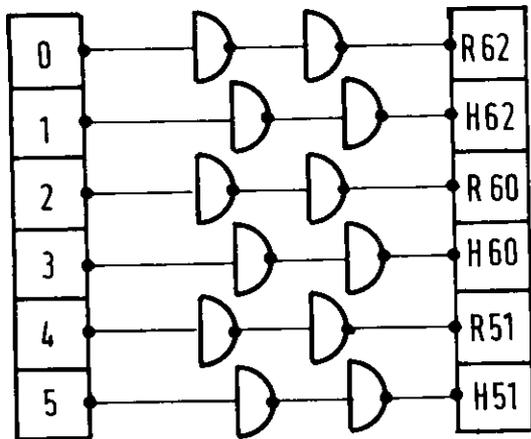
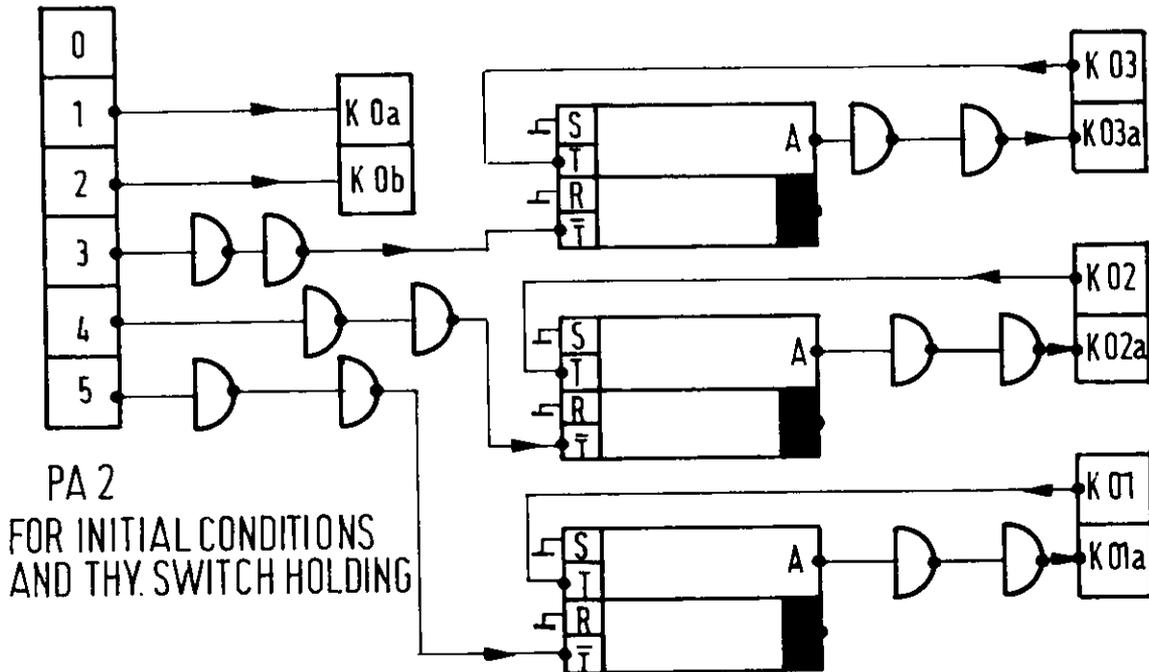
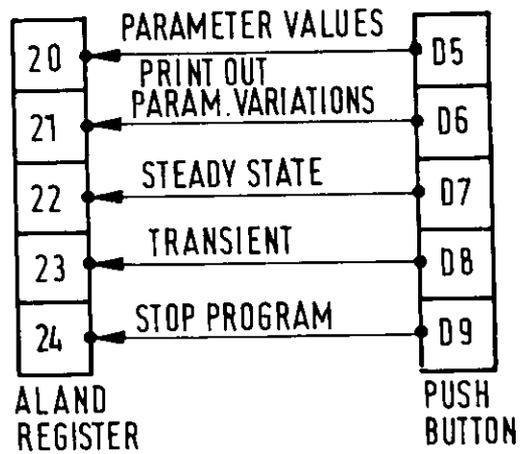


Fig. 6



PA1 - FOR SWITCHING RAMP GENERATORS



PA 2
FOR INITIAL CONDITIONS
AND THY. SWITCH HOLDING

FIG. 7

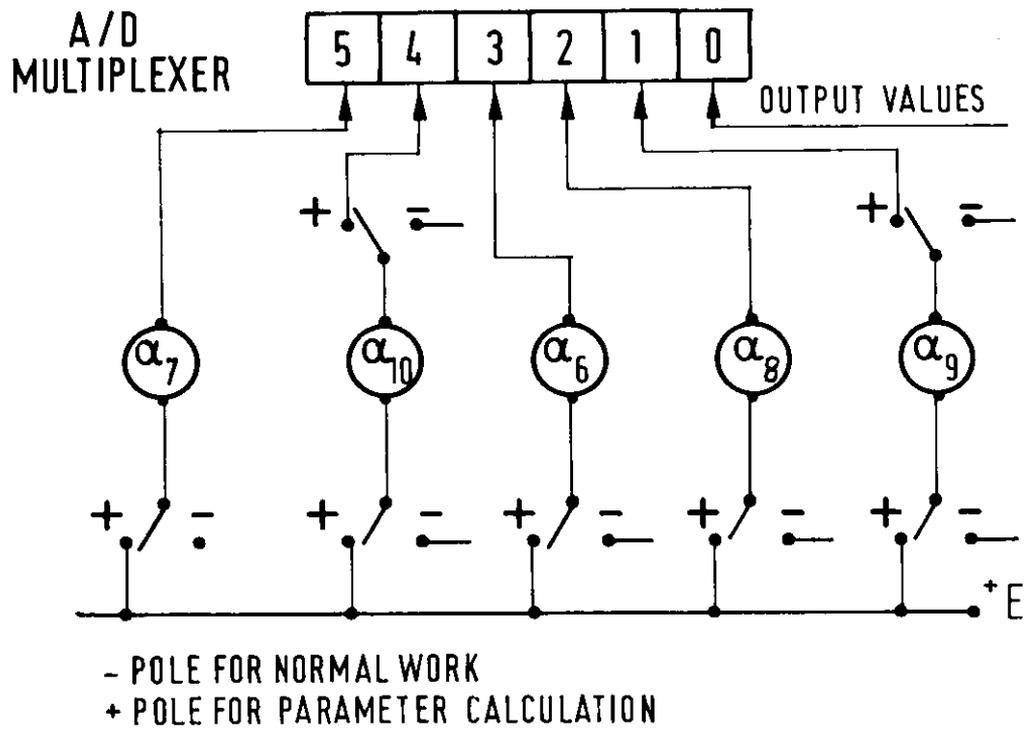


Fig. 8

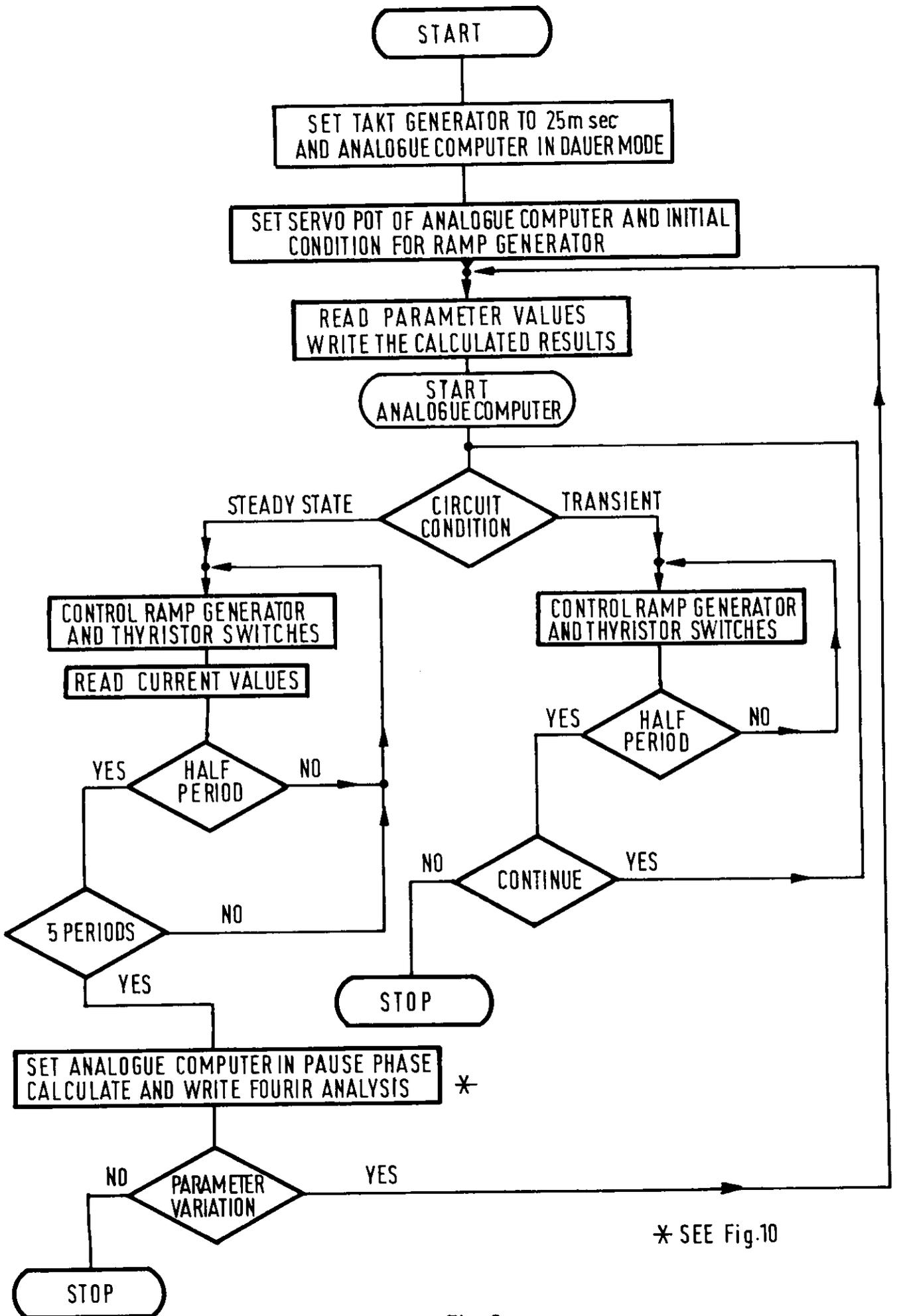


Fig.9

NUMBER OF DATA
POINTS $2N = 240$

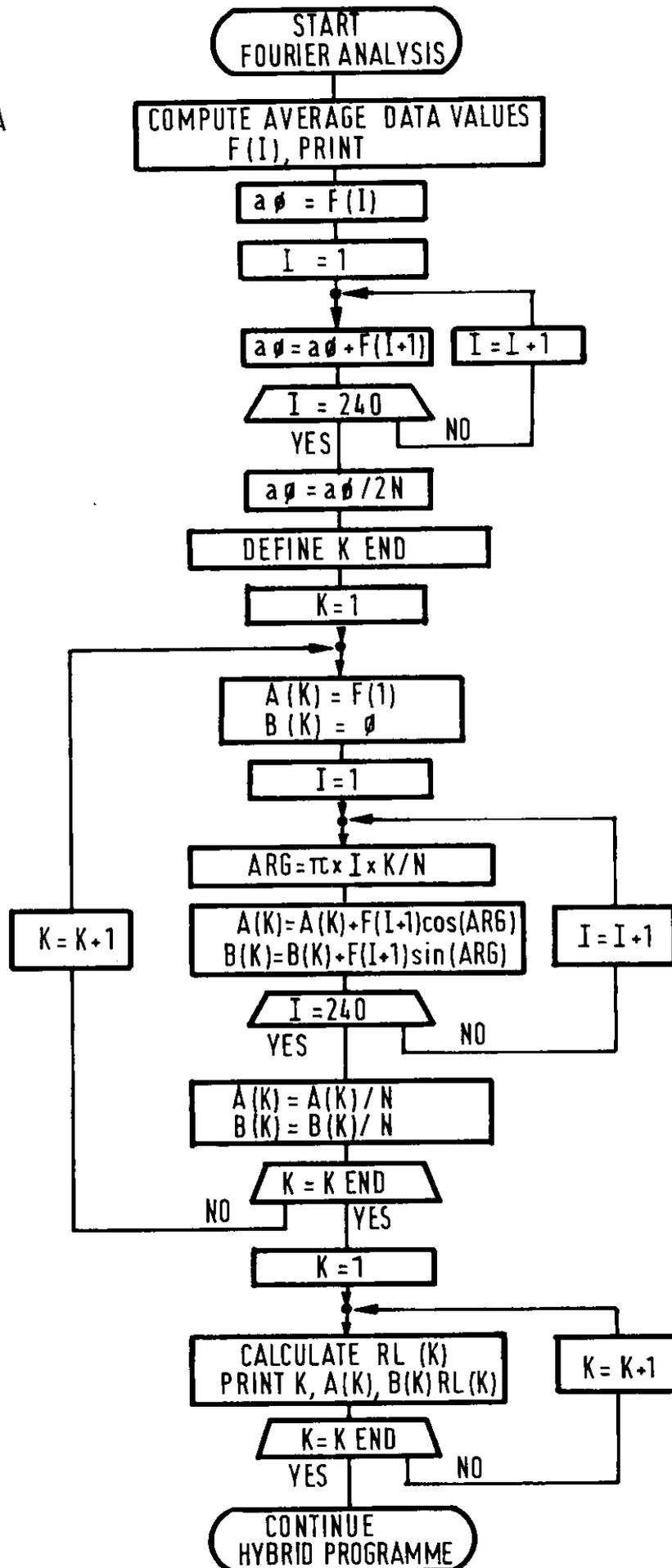


Fig. 10

```

INTEGER*2 N,I,K,J,XEND,NEND,KEND,POINTS,X
INTEGER*2 WZ,I1,I2,I3,I4,I5,I6
INTEGER*2 I7,I8,I9
  INTEGER*2 MM,NN,LL
    DIMENSION IADR(13)
  FRACTIONAL VAR(5)
  FRACTIONAL POTWRT(13),STF
  FLOATSHORT STR(240)
  FLOATSHORT KON(6),DSTR(10)
  FLOATSHORT NREAL,KREAL,F(250),A(40),B(40),PERCEN(40),AO,ARG,FO
  FLOATSHORT XREAL
  COMMON STF(1200),I4,I5,MM,NN,LL
  EXTERNAL WTIM
  DATA IADR/4HP051,4HP052,4HP070,4HP000,4HP011,4HP061,4HP001,
44HP020,4HP002,4HP012,4HP050,4HP060,4HP062/
  DATA POTWRT/.4000V,.6000V,.1212V,.1212V,.1212V,.0606V,.0606V,.0
5606V,.4330V,.433V,.2000V,.4000V,.4000V/
  CALL*ADAUER
  I3=0I
  I5=0I
  I6=1I
  CALL*ZYTAKT(25I,0I)
  CALL*R1SET(63I)
  CALL*R2SET(30I)
  CALL*POTSET(IADR,POTWRT,13I)
1 WRITE(6,46) I6
  CALL*PUNORM
  CALL*APAUSE
7 IF(ALAND('10'H))7,9,7
9 CONTINUE
  DO 105 MM=1,5
105 VAR(MM)=ADWERT(MM)
  KON(1)=KFRFL(VAR(1))*KFRFL(VAR(4))
  KON(2)=KFRFL(VAR(4))/KFRFL(VAR(2))
  KON(3)=KFRFL(VAR(5))
  KON(4)=1.0W0/KON(1)
  KON(5)=0.0033W0*KON(2)/20.W0
  KON(6)=0.0033W0/KON(3)
  WRITE(6,49)KON(4),KON(5),KON(6),VAR(3)
10 IF(ALAND('12'H))10,11,10
11 I4=0I
  CALL*ZYDEF(WTIM,WZ)
  CALL*ASTART
20 CALL*R1SET(48I)
  CALL*R2SET(30I)
  IF(ALAND('14'H))24,24,21
21 I1=0I
22 I2=0I
23 CALL*ZYSYN
  I2 I2+1I
  IF(I2.LT.20I) GO TO 23
  I1=I1+1I
  GO TO (2,3,2,4,2,5),I1
2 CALL*R1SET(0I)
  CALL*R2SET(56I)
  GO TO 22
3 CALL*R1SET(3I)
  CALL*R2SET(48I)
  GO TO 22
4 CALL*R1SET(12I)

```

```

CALL*R2SET(40I)
GO TO 22
5 IF(ALAND('1'H)) 29,29,20
29 CALL*PUNORM
   CALL*R1SET(63I)
   CALL*R2SET(30I)
   CALL*APAUSE
GO TO 30
24 I4=1I
28 I1=0I
   CALL*R1SET(48I)
   CALL*R2SET(30I)
   I3=I3+1I
25 I2=0I
26 CALL*ZYSYN
   I2=I2+1I
   IF(I2.LT.20I) GO TO 26
   I1=I1+1I
   GO TO(32,33,32,34,32,35),I1
32 CALL*R1SET(0I)
   CALL*R2SET(56I)
   GO TO 25
33 CALL*R1SET(3I)
   CALL*R2SET(48I)
   GO TO 25
34 CALL*R1SET(12I)
   CALL*R2SET(40I)
   GO TO 25
35 GO TO(28,28,28,28,28,28,28,28,28,27),I3
27 CONTINUE
   CALL*PUNORM
   CALL*R1SET(63I)
   CALL*R2SET(30I)
   CALL*APAUSE
C FOURIER ANALYSIS OF RECTIFIER OUTPUT
CMM DO 102 NN=1,240
   STR(NN)=0.WO
   DO101 MM=1,5
   LL=240I*(MM-1I)+NN
101 STR(NN)=(KFRFL(STF(LL))+STR(NN))
102 STR(NN)=STR(NN)/5.WO
C WRITE DATA
   WRITE(6,48) I5
   WRITE(6,47)
   DO103 I7=0,23
   DO104 I8=1,10
   I9=10I*I7+I8
104 DSTR(I8)= STR(I9)
   WRITE(6,43) I7,DSTR(1),DSTR(2),DSTR(3),DSTR(4),DSTR(5),DSTR(6),
1 DSTR(7),DSTR(8),DSTR(9),DSTR(10)
f 103 CONTINUE
   N=120I
   POINTS=2I*N-1I
   FO= STR(1)
   DO 60 J=1,POINTS
60 F(J)= STR(J+1I)
C CALCULATE A0
   AO=FO
   DO 61 I=1,POINTS
61 AO=AO+F(I)

```

```

NREAL=KI2FL(N)
AO=AO/(NREAL*P.WO)
C CALCULATE AK AND BK
  KEND=30I
  DO 62 K=1 ,KEND
    A(K)=FO
    B(K)=O.WO
    KREAL=KI2FL(K)
    DO 63 X=1 ,POINTS
      XREAL=KI2FL(X)
      ARG=3.1416*(KREAL*XREAL/NREAL
      A(K)=A(K)+F(X)*KR4FL(COS(KFLR4(ARG)))
63   B(K)=B(K)+F(X)*KR4FL(SIN(KFLR4(ARG)))
    A(K)=A(K)/NREAL
62   B(K)=B(K)/NREAL
C CALCULATE PERCENTAGES
  DO 64 K=1 ,KEND
64   PERCEN (K)=SQRT(FL((A(K)*A(K)+B(K)*B(K))/(A(6)*A(6)+B(6)*B(6)))
    F #1.WO
    WRITE(6,41) N,POINTS
    WRITE(6,42) AO
    NEND=29I
    DO 65 I=1 ,NEND
65   WRITE(6,44) I,A(I) ,I,B(I),I,PERCEN(I)
41   FORMAT(1X,'N=',I4,5X,'POINTS=',I4)
42   FORMAT(1X,'A(0)=' ,F10.5)
43   FORMAT(1X,'R=' ,2X, I2,3X,F6.4,3X,F6.4,3X,F6.4,3X,F6.4,3X,F6.4,
1   3X,F6.4,3X,F6.4,3X,F6.4,3X,F6.4,3X,F6.4)
44   FORMAT(1X,'A(1,I2,')=' ,F10.5,5X,'B(1,I2,')=' ,F10.5,
1   5X,'HARMONIC',I2,',' ,F6.2,2X,'RELATIVE')
45   FORMAT(1X,'CASE-NUMBER=' ,3X,I3)
47   FORMAT(12X,'S1=' ,5X,'S2=' ,7X,'S3=' ,5X,'S4=' ,7X,'S5=' ,5X,'S6=' ,
1   5X,'S7=' ,5X,'S8=' ,5X,'S9=' ,5X,'S10=')
46   FORMAT(1X,'NUMBER OF SAMPLING POINTS=' ,I5)
49   FORMAT(1X,'KREG=' ,F10.4,5X,'TREG=' ,F9.4,2X,'SEC',5X,'TMAG=' ,F9.4
1   ,2X,'SEC',5X,'SOLLWEKT=' ,F7.5)
C PAUSE FOR PARAMETER VARIATION
  CALL*PUNDRM
  CALL*APAUSE
71 IF(ALAND('S'H))70,70,71
70 I6=I6+1I
  I5=0I
  I3=0I
  GO TO 1
30 CONTINUE
  STOP
  END

```

Fig.11

```
SUBROUTINE  WTIM
SPECIAL  16
INTEGER*2  MM,NN,LL
          INTEGER*2  I5,I2,I4
FRACTIONAL  STF
COMMON  STF(1200),I4,I5,MM,NN,LL
IF(I4.LT.11) GO TO 50
I5=1I+I5
STF(I5)=ADWERT(OI)
50  RETURN
END
```

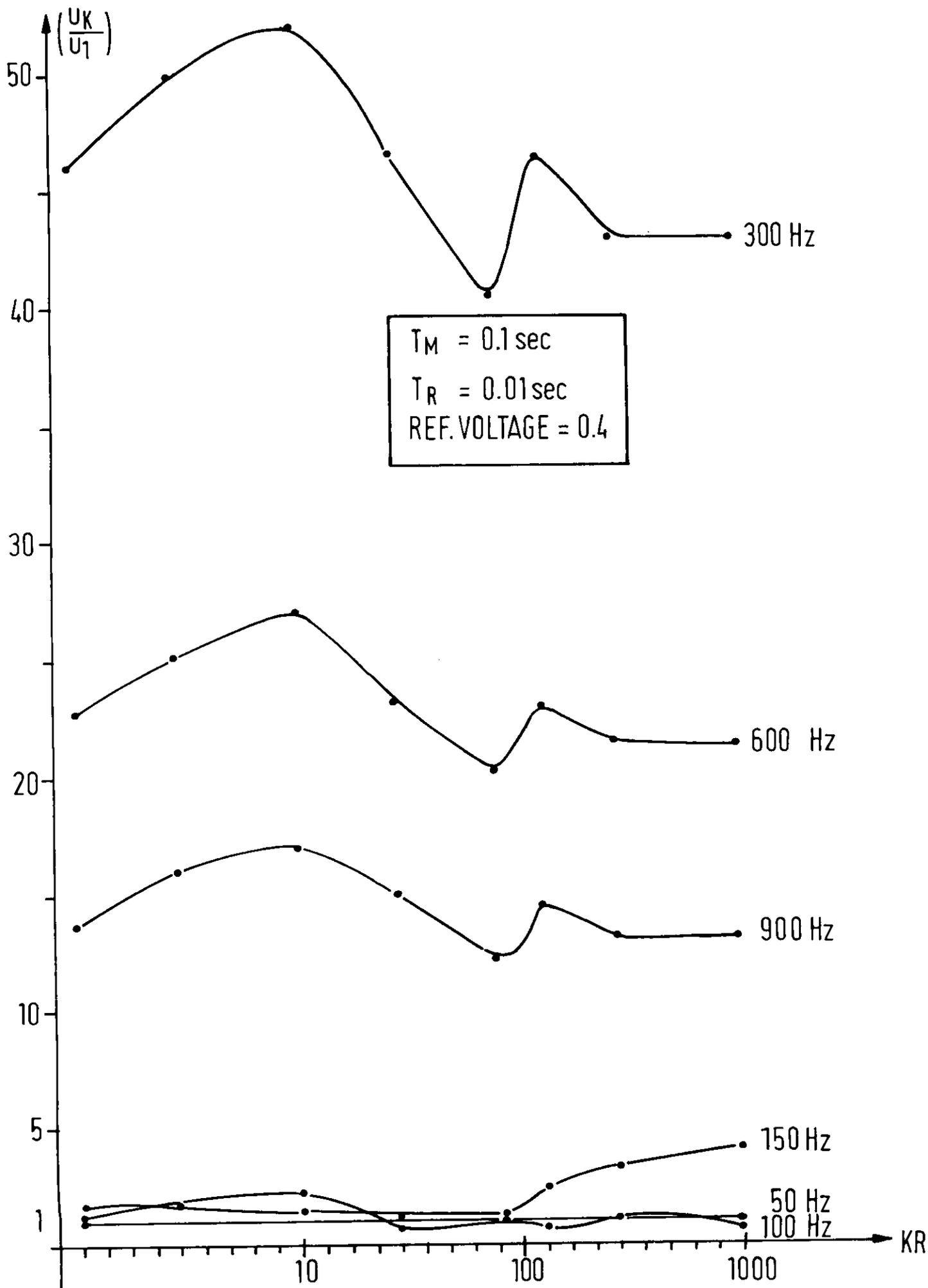


Fig. 12

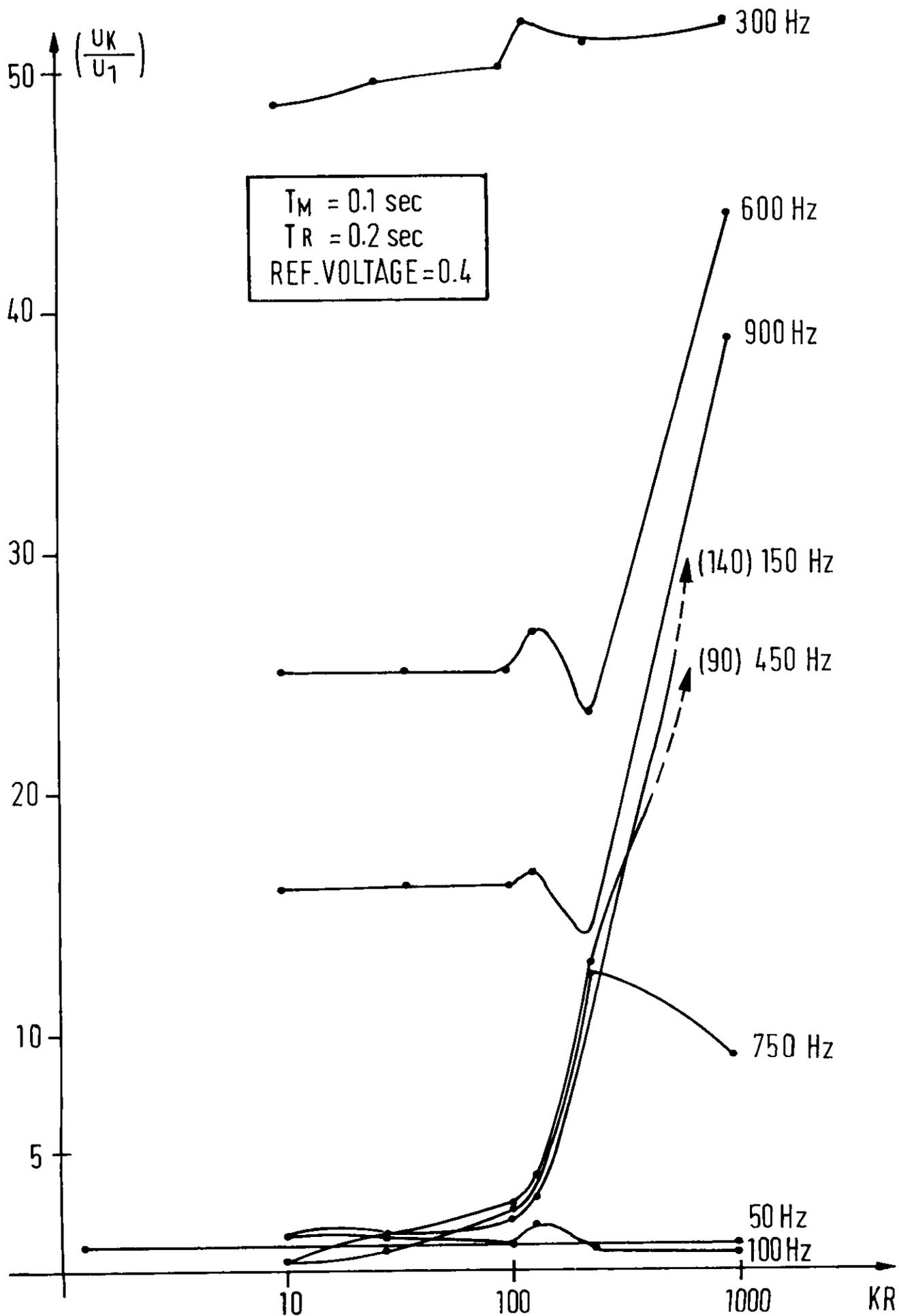


Fig. 13

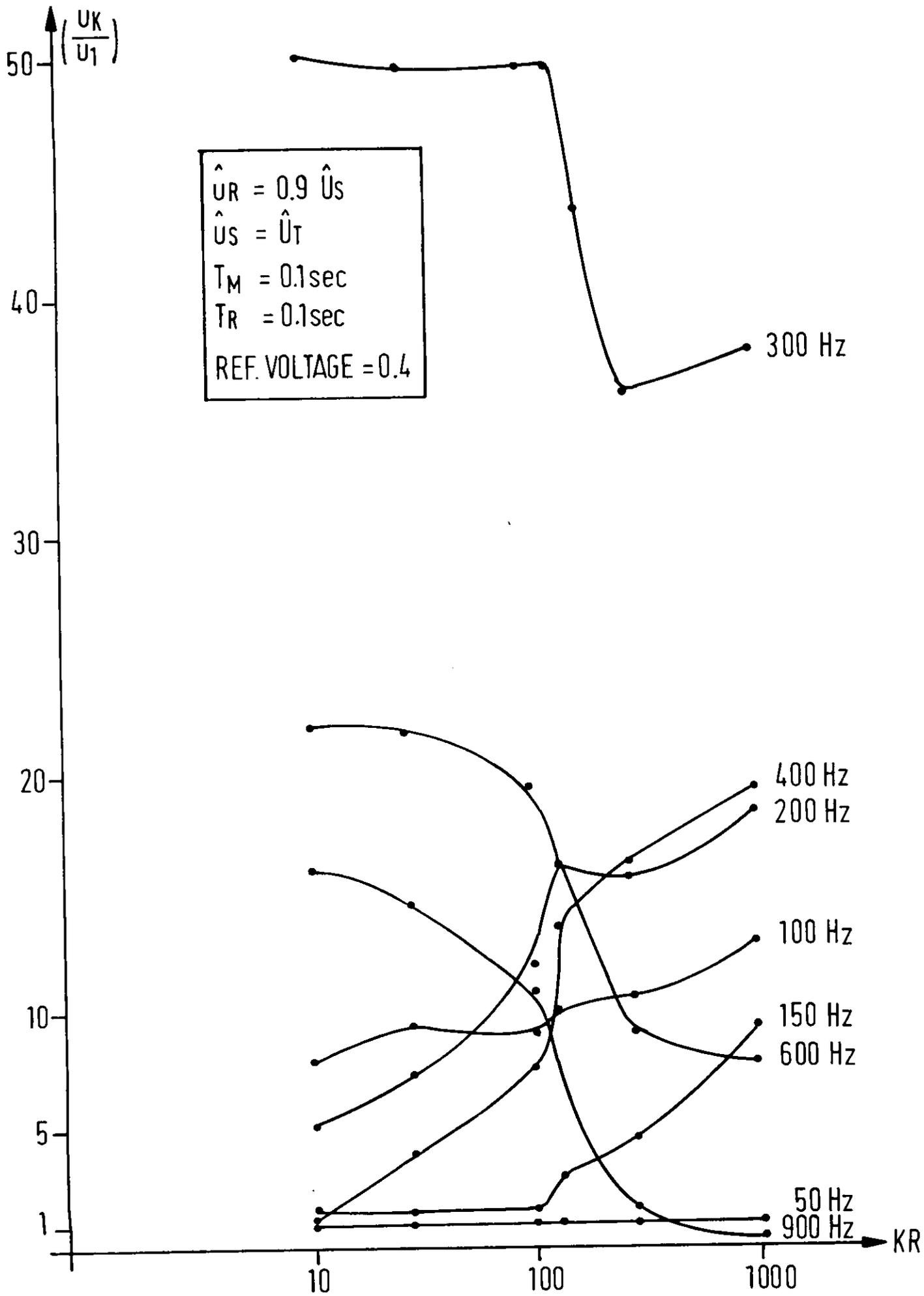


Fig-14

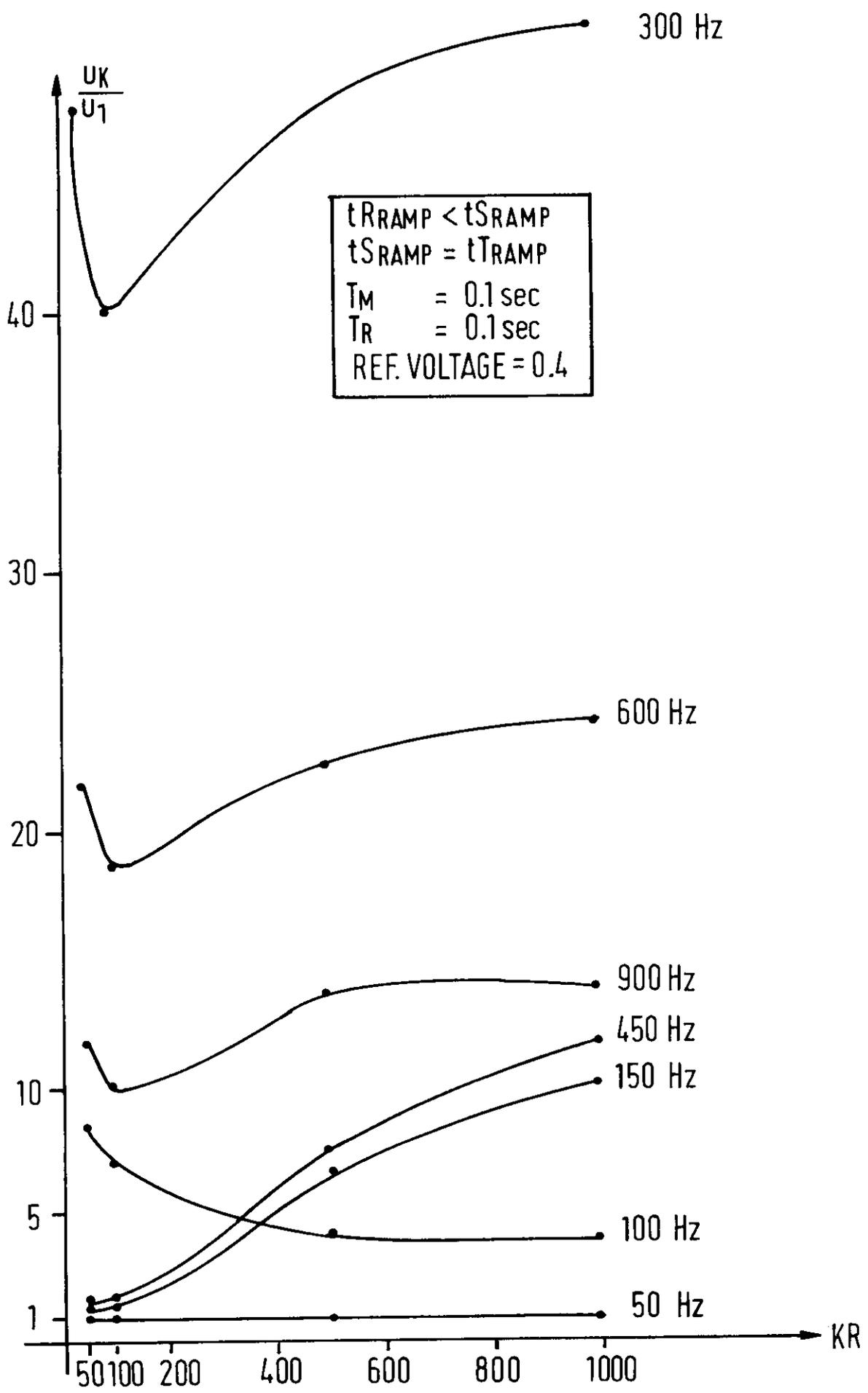


Fig.15

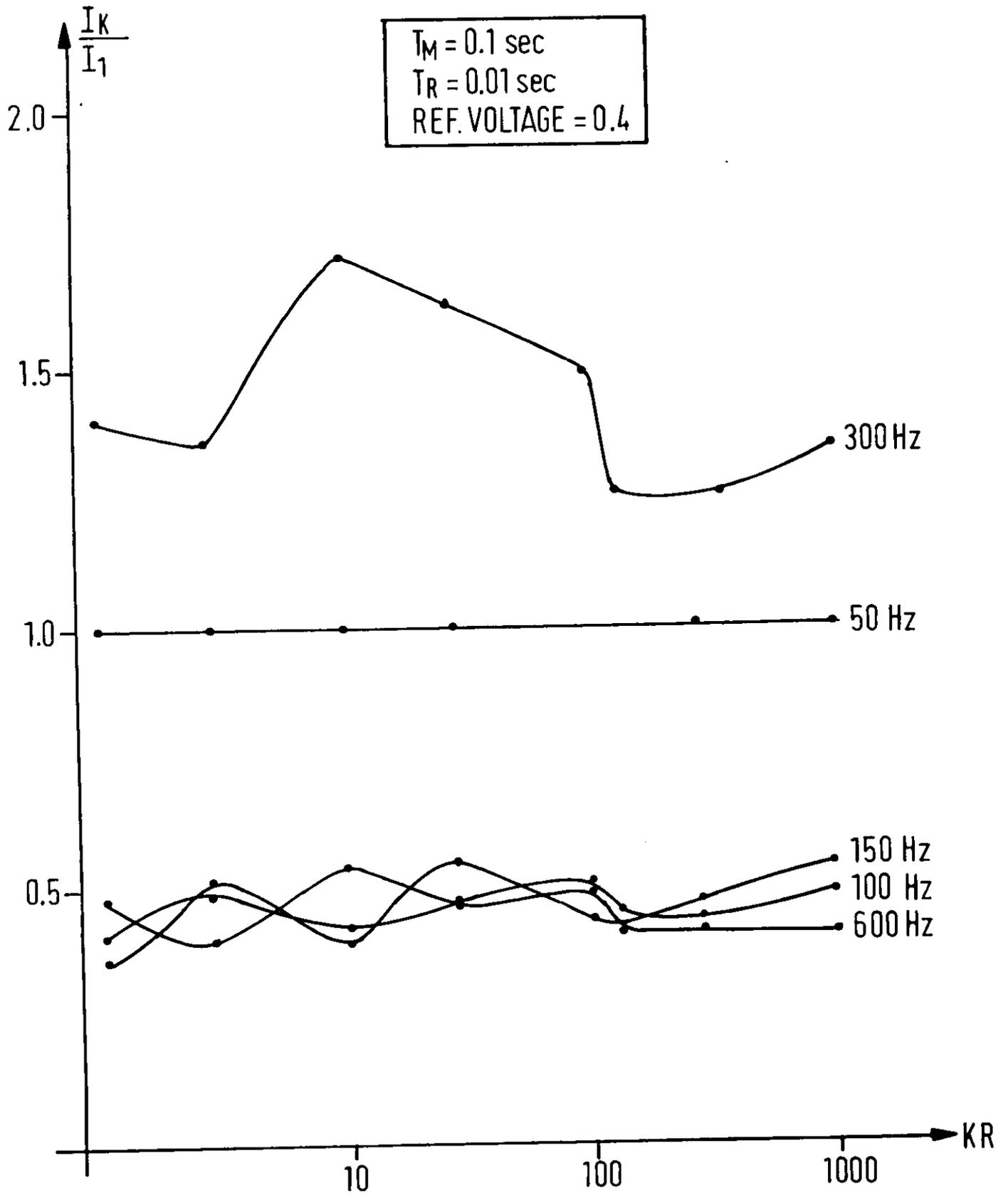


Fig. 16

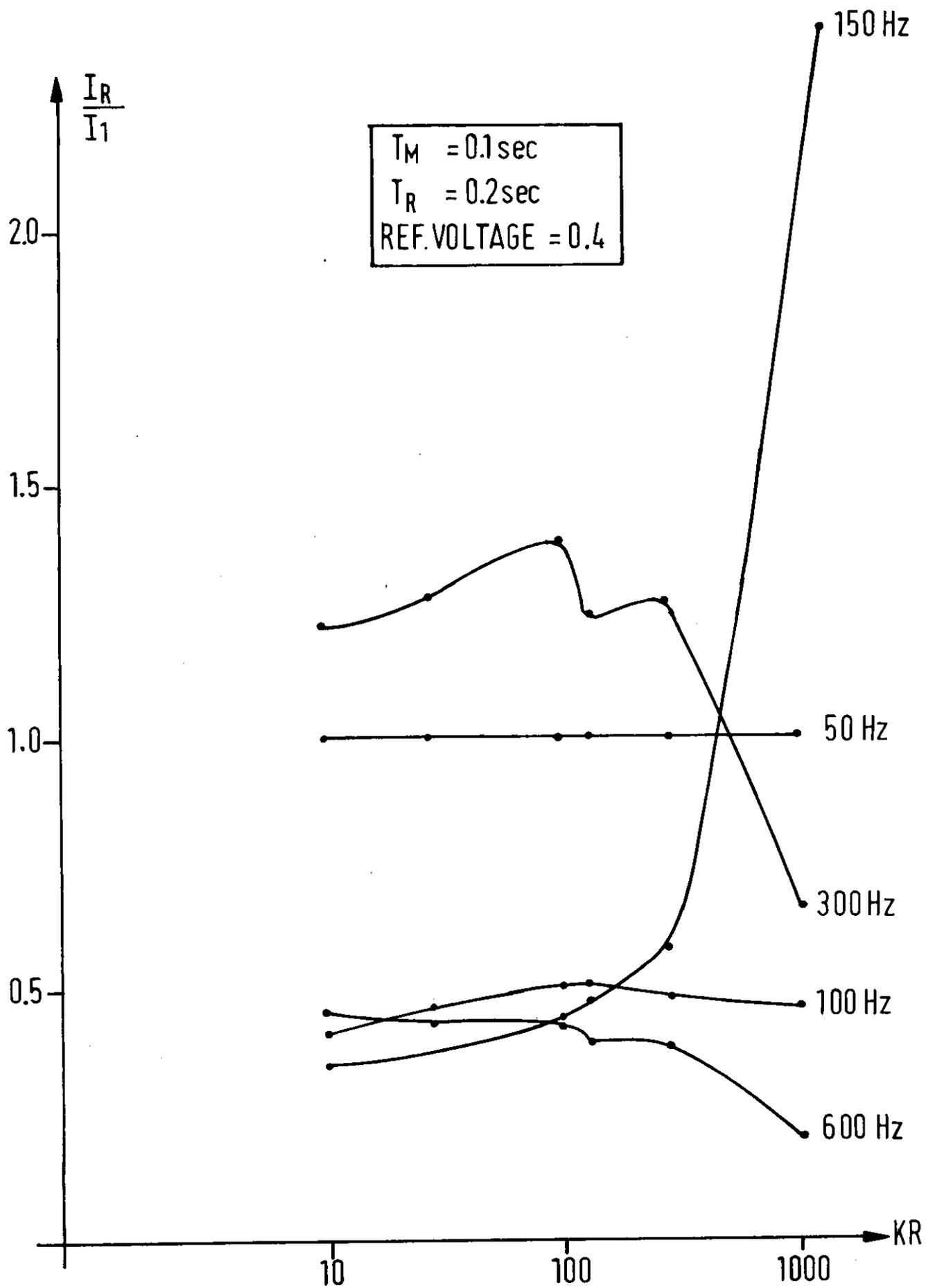


Fig. 17

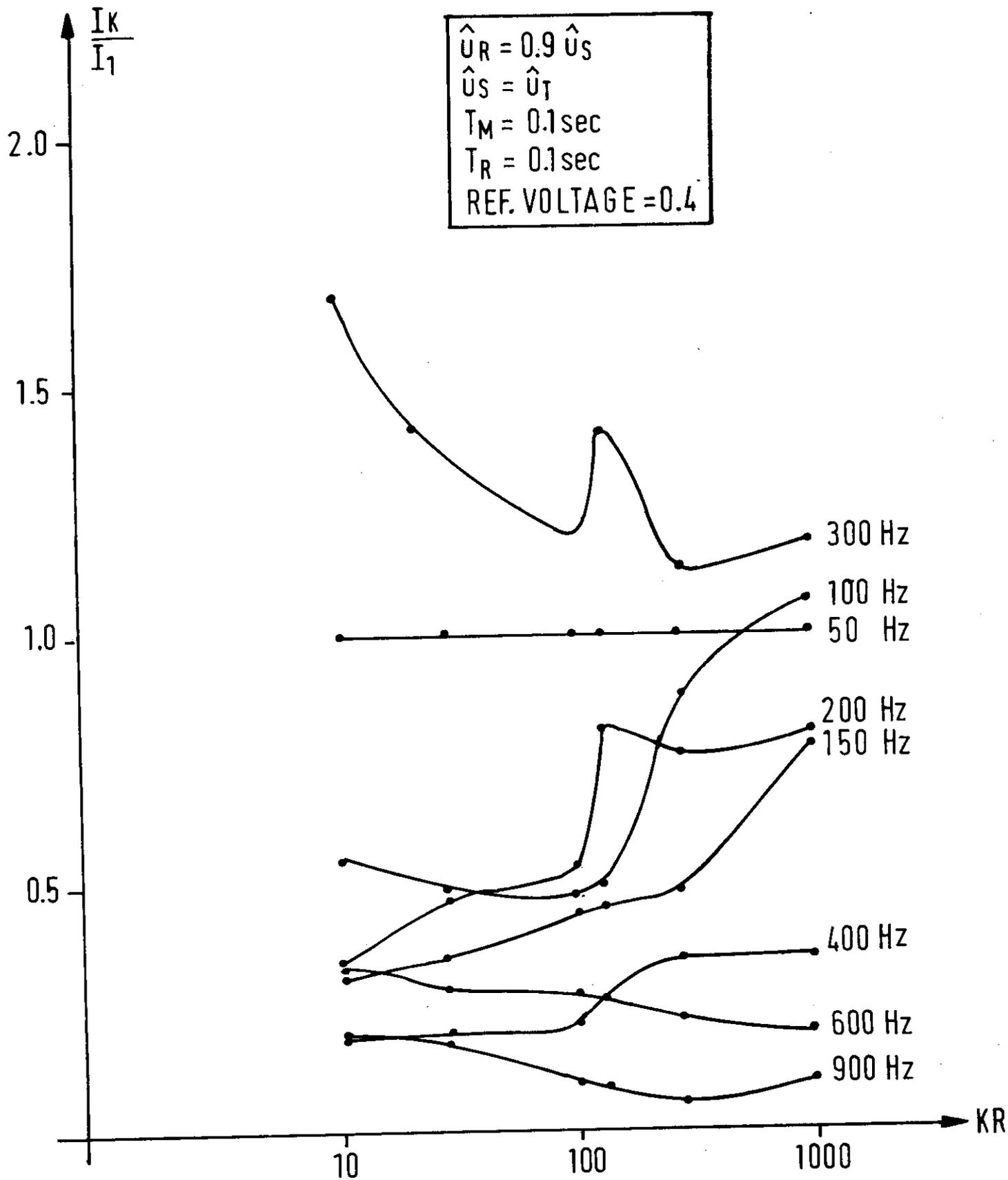


Fig. 18