

デジタル計算機による電子回路の自動解析 (第一報)

土井 政則*・田中 護*・山口 幸雄**・玉田 厚***

Computer Aided Analysis of Electronic Circuits(NO. 1)

Masanori DOI・Mamoru TANAKA・Yukio YAMAGUCHI・Atsushi TAMADA

Abstract

Many programs for the analysis of the electronic circuits have been developed using the graph theory. One of the authors intends to make the students use the digital computers for designing or analyzing the circuits in their experiments. But those programs are inadequate to the student uses because those are developed for the industrial uses and are too large in scale of programs to be adopted in the small scale computers. As the first step of the plan authors tried to analyze a simple circuit with a transistor using the computer with the core memories of 8KW and the disc memories of 2400KW. It became clear that too long time was necessary to compute.

1. ま え が き

近年になって、CAD 技術が盛んに開発され、応用されるようになったのは、設計対象の大規模化、複雑化につれて、設計の精密性、迅速性が要求されるようになり、それにこたえるためには、計算機を使って設計者の能力を高めなければならないということがあげられる。従って CAD では、必ずしも計算機利用技術に習熟していない技術者が、手軽に計算機を利用して、迅速に、かつ設計仕様に対して十分な精密さと信頼性をもって設計できるということが必要となる。そのためには、設計(解析)言語の確立、素子の適確なモデルの確立、精密に解析し設計するための理論の確立が必要となり、それらに対して発表されているものは多い⁽¹⁾。今日、すでに、ECAP⁽²⁾、ECAP-II⁽³⁾、NET-I⁽³⁾、SCEPTRE⁽²⁾、CIRCUS⁽²⁾、CALAHAN⁽³⁾、CIRCAL⁽²⁾、CSS-G⁽⁴⁾などや、ミニコン用の POLCA-45⁽⁵⁾ など主として解析用プログラムが国内外で計算機メーカーを中心として多く発表されている。一方、教育の場においても、計算機を利用することが盛んに論じられているが、一部で CAI の試行がされている程度で、CAD 的な使い方はされていないようである。電子回路の学生実験の場合、設計を主体とした内容の実験にする第一歩として、まず、自動解析の機能を身近にもつ必要がある。

本校に導入された計算機は主メモリが8Kで、既存のプログラムをそのまま利用できない。

本文では、最も簡単なトランジスタ一段増巾回路についての試行の一部を述べる。

2. 計算モデル

図1のような、理想電圧源、理想電流源、アドミッタンスの組み合わせを枝路とし、その両端を節点とすれば回路はこの枝路と節点によって表わされ、節点電圧、枝路電流は次のように行列を用いて表現される。

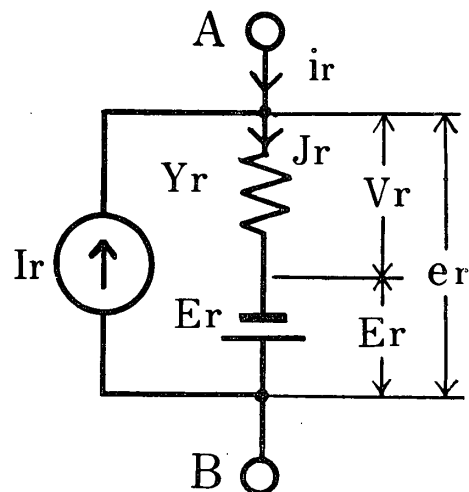


図1 r 番目の枝路

* 宇部工業高等専門学校電気工学教室

** 現在 日本無線株式会社

*** 現在 立石電機株式会社

$$e' = (A^t \cdot Y \cdot A)^{-1} \cdot A^t \cdot (I - Y \cdot E) \dots\dots(1)$$

$$i = Y \cdot (E + e) - I \dots\dots\dots(2)$$

- 但し、 e' : 節点電圧 e : 枝路電圧
 i : 枝路電流 Y : アドミタンス
 A : 枝路の接続状態を表わす接続行列
 A^t : A の転置行列
 I : 電流源電流 E : 電圧源電圧

本文では、(1), (2) 式を用いて、図2のトランジスタ一段増幅回路の解析を計算機により行なっている。

ここで、回路に含まれている非線形素子の取りあつかいが問題であるが、図1のような枝路に置きかえ、図3

のように線形の等価回路にして、解析した。

図3から接続行列は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & -1 & 0 & +1 & 0 & 0 & +1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

ここで図3の R_{14} , R_6 , R_{13} はトランジスタの能動、飽和、遮断状態に応じて、次に述べるような値をとるスイッチ素子である。

トランジスタを図4(a)のように直線で近似し、(b)のように三つの状態に対応した等価回路を考える。この状態のきりかえは図5で示す方法で行なう。

過渡解析を行なう場合のキャパシタンスとインダクタンスは次のようにとりあつかう。図6はキャパシタンスに急に直流電圧を印加した場合の過渡応答で、次のように示される。

$$i = C \frac{d}{dt} (v_m - v_n) \dots\dots\dots(3)$$

これを Δt で分割すると、

$$\Delta v = \frac{i^{j+1}}{C} \Delta t \dots\dots\dots(4)$$

$$v_m^{j+1} - v_n^{j+1} = v_m^j - v_n^j + \Delta v \dots\dots\dots(5)$$

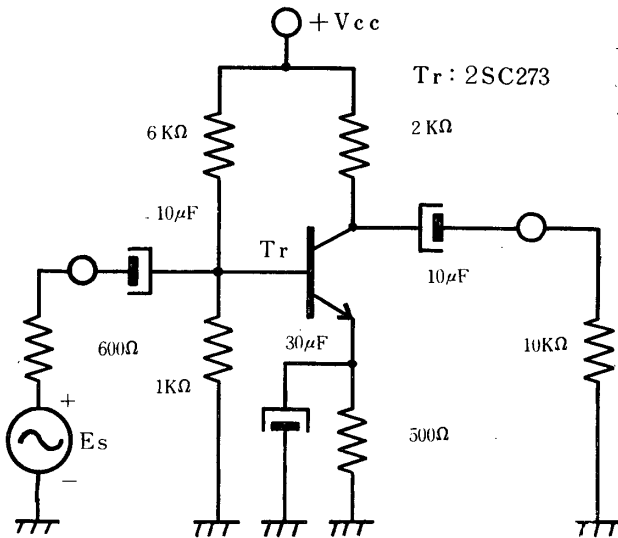


図 2 一段増幅回路

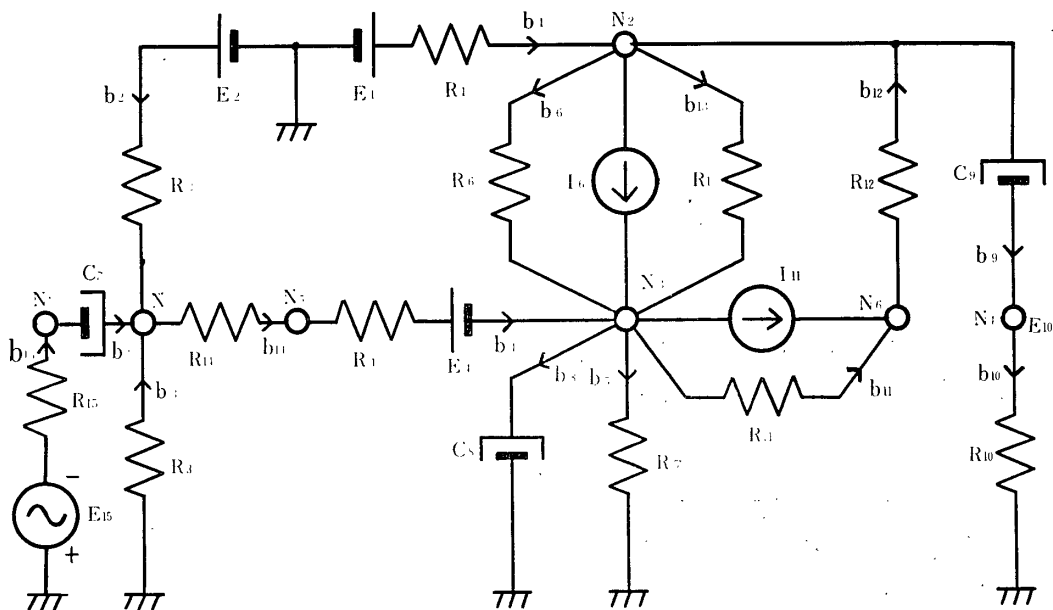
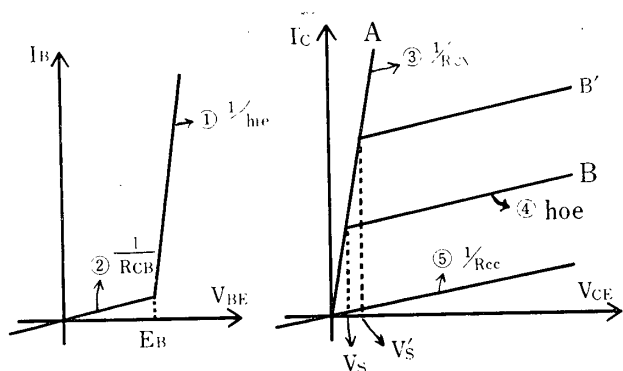
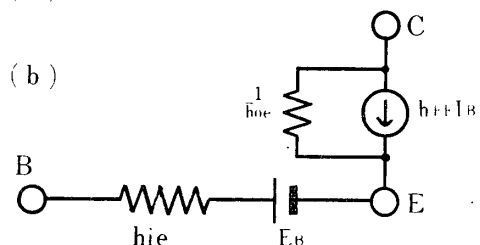


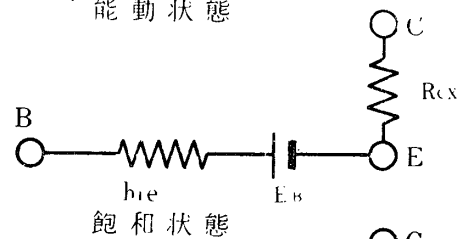
図 3 等 価 回 路



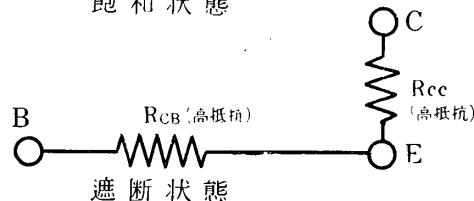
(a)



能動状態



飽和状態



遮断状態

図4 トランジスタの動作状態別等価回路

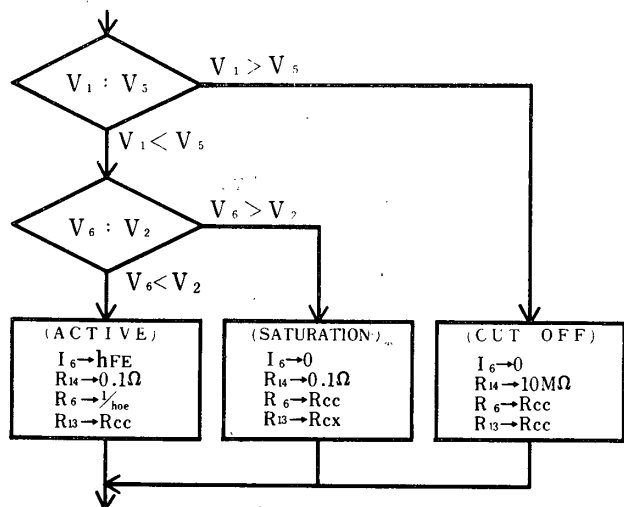


図5 トランジスタの動作切り換え

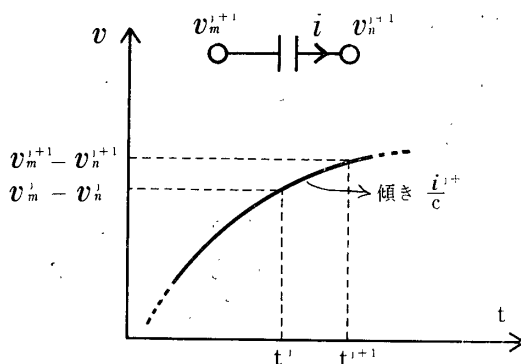
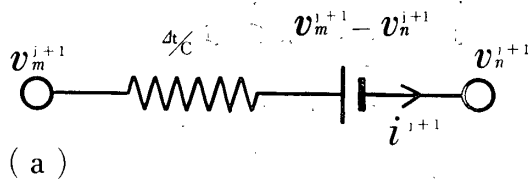
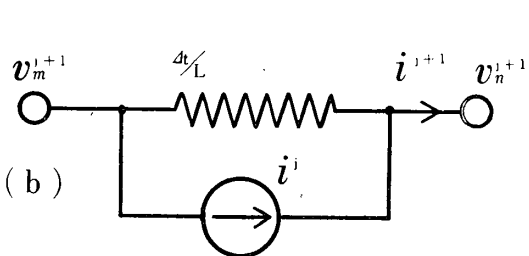


図6 コンデンサ過渡応答



(a)



(b)

図7 コンデンサ、インダクタンスの等価回路

この(4)、(5)式から過渡解析におけるキャパシタンスの等価回路を図7(a)のように表現できる。まず、 $v_m^j - v_n^j$ に初期電圧を与え、 $t=0$ の時の $v_m^{j+1} - v_n^{j+1}$ を求め、次からは t を Δt ごとに変化させて、くり返し計算を行なう。

インダクタンスはコンデンサと双対関係にあるので、図7(b)のように表現できる。

3. 等価回路の定数の決定

使用したトランジスタ 2SC 273 の特性をカーブトレーサで測定し、次の定数を得た。

$$hFE=72, \quad R_4=500[\Omega], \quad R_6=100[K\Omega], \\ R_{13}=80[\Omega], \quad E_B=0.69[V]$$

逆バイアス時の R_6, R_{12}, R_{14} の値は、かなり大きい値であると予想されるが、他の回路に影響しないように $30M\Omega$ とした。 R_{12} も同様に考えて、 $30M\Omega$ とした。

他の回路定数はブリッジで測定した。

測定した回路定数は次の通りで、これをデータとして

計算に入力する。

直流電位 〔V〕	V _{CC}	V _C	V _E	V _B
	20.0	11.6	2.05	2.75
枝路番号	回路定数			
1	R ₁ =2077〔Ω〕	E ₁ =20〔V〕		
2	R ₂ =6091〔Ω〕	E ₂ =20〔V〕		
3	R ₃ =987.6〔Ω〕			
4	R ₄ =500.0〔Ω〕	E ₄ =0.69〔V〕		
5	R ₅ =494.0〔Ω〕			
6	R ₆ =100〔KΩ〕,	30〔MΩ〕	β=72.	
7	C ₇ =12.4〔μF〕			
8	C ₈ =47.5〔μF〕			
9	C ₉ =13.1〔μF〕			
10	R ₁₀ =10.19〔KΩ〕			
11	R ₁₁ =80.0〔Ω〕			
12	R ₁₂ =30〔MΩ〕			
13	R ₁₃ =30〔MΩ〕,	80.0〔Ω〕		
14	R ₁₄ =0.1〔Ω〕,	30〔MΩ〕		
15	R ₁₅ =610.0〔Ω〕	E ₁₅ =V _{in}		

4. 過渡解析プログラム

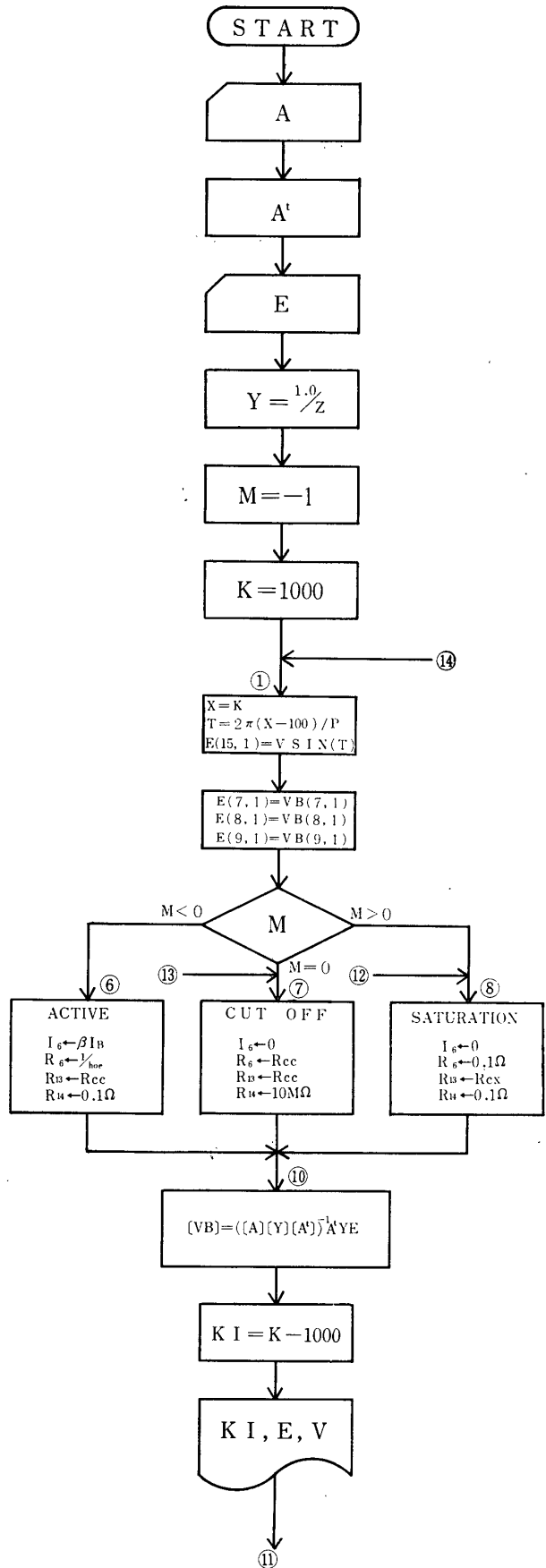
図3のように枝路、節点の関係を定め、(1)式によって各節点電位を計算する。図8にそのフローチャートを示し、プログラムは附録に示す。

この計算の手続きは、まずデータとして、接続行列、アドミタンス行列、電源の行列の各要素を入力すると、 $t=0$ において、トランジスタの動作が能動であると仮定して計算を始める。その結果から、トランジスタの動作状態を判定して、再度 $t=0$ から計算し、各節点電位を出力する。ここで、 $t=0$ のときにトランジスタの動作が能動であると仮定したが、他の動作状態を仮定しても結果は同じである。また、コンデンサは、 $t=0$ のとき開放として DC 解析を行なわせ、トランジスタの動作状態を判定させた後に初期値を与え、過渡解析を行なう。

5. 実験結果とその検討

図9に計算機による計算結果と実際の回路の実測値を示す。この図で、最後の1周期のみ実測値を記入してあるのは、実測値は定常値をシンクロスコープで観測したからである。

同じ入力電圧について比較すると、大振幅入力時にお



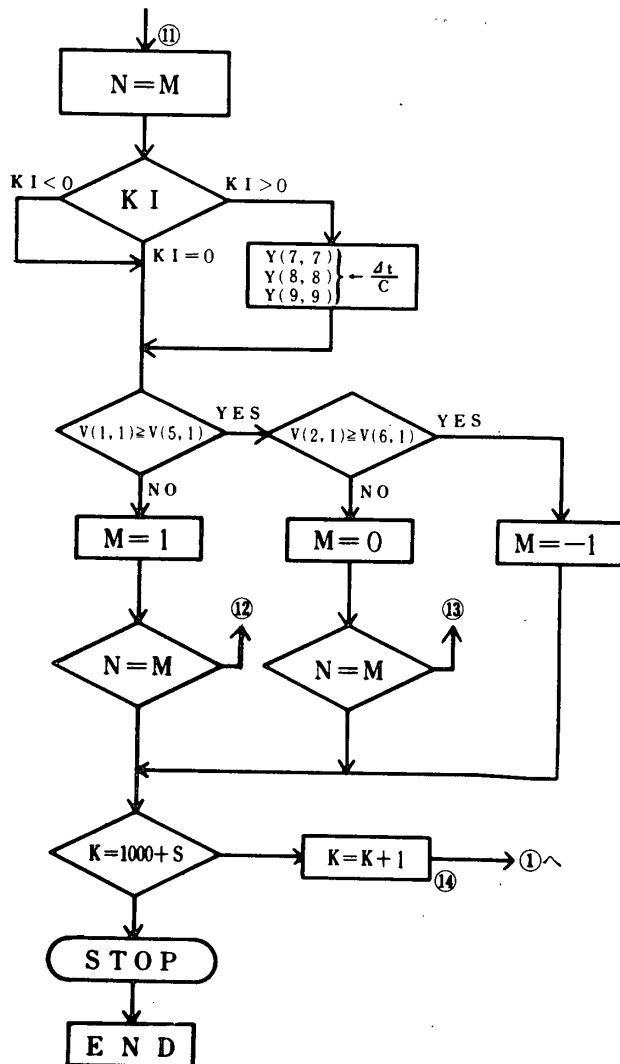


図8 フローチャート

いて、波形が少しずれている。まず、飽和状態と遮断状態において、実測では丸味をもち、かつ半周期ごとの波形が対称でないのに対して、計算ですごくクリップしている。等価回路では、2本の折線で近似したが、実際の回路においてはベース電流の大きさにより、電流増幅率と飽和電圧が異なることからくるものである。

次に位相のずれが生じているが、これは定常状態を実測しているのに対し、計算の過渡解析が定常状態に達していないからである。この図では5周期の計算結果を示しているが、約1時間の計算時間であった。

小振幅入力時、すなわちトランジスタが能動状態だけで動作しているときは、実測値と計算値がほぼ一致している。

6. む す び

本文に述べたように、簡単な回路でも約1時間の計算時間を要したが、教育用としては、学生1人に長い計算機占有時間は与えられないので、計算時間の短縮をはからなければならない。本文では過渡解析を行なったが、直流解析、定常交流解析を適宜組み合わせる使用することによって、時間短縮を試みてゆきたい。少し複雑な回路になってくると主メモリが少ないことから、外部メモリ(磁気ディスク)に頼らざるを得なくなるが、その場合例えば、オーバーレイの機能を使えば当然計算時間が長くなるが、回路の複雑化と計算時間の短縮をどう調和させるか目下検討中である。

なお、使用した計算機は、本校に導入された TOSB-AC-3400 TOPS-XI VERSION-3 である。

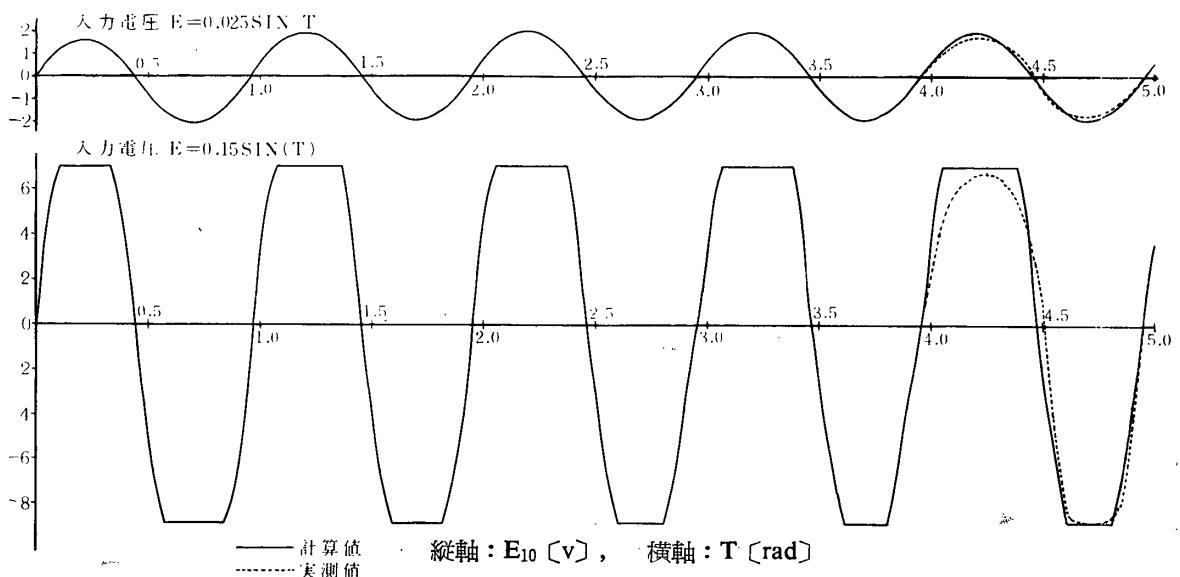


図9 解析結果と実測値の比較

参 考 文 献

- 1) F. F. Kuo, et al, "Computer Oriented Circuit Design," Computer Applications in Electrical Engineering Series, Prentice Hall, 1969.
- 2) G. W. Zobrist, "Network Computer Analysis," Boston Technical Publishers, 1969.
- 3) F. H. Branin, et al, "ECAP—II A New Electrical Circuit Analysis Program," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. SC—6, No. 4, 1971.
- 4) 木村, 他, "会話型回路解析システムの構成例" 松山, 他, "会話型回路解析システムの解析機能と解析制御に関する一考察," 電子通信学会全国大会 (1972)
- 5) 椎野 努, 他, "ミニコンによる汎用電子回路網解析—POLCA—45," 電子通信学会全国大会 (1972).

(昭和47年5月1日受理)

附 録

```

1      DIMENSION A (15, 7), B (7, 15), C (7, 15), D (7, 7), E (15, 1),
1      1 F (15, 1), G (7, 15), Y (15, 15), V (7, 1), IND (7), VB (15, 1)
2      DO 1 K=1, 7
3      1 READ (5, 101) (B (K, L), L=1, 15)
4      101 FORMAT (15F3.0)
5      DO 4 I=1, 15
6      DO 4 J=1, 15
7      4 Y (I, J)=0.0
8      DO 2 I=1, 15
9      DO 2 j=1, 7
10     2 A (I, J)=B (J, I)
11     DO 13 I=1, 15
12     13 VB (I, 1)=0.0
13     READ (5, 102) E
14     102 FORMAT (8F6.2)
15     READ (5, 103) (Y (K, K), K=1, 15)
16     103 FORMAT (E9.2)
17     DO 3 K=1, 15
18     3 Y (K, K)=1.0/Y (K, K)
19     READ (5, 103) YA1, YA2, YB1, YB2, YC1, YC2
20     READ (5, 104) A1, A2, B1, B2, C1, C2
21     104 FORMAT (6F5.3)
22     M=-1
23     DO 21 K=1000, 1200
24     X=K
25     T=6.2832*(X-1000.0)/200.0
26     E (15, 1)=0.25*SIN (T)
27     E (7, 1)=VB (7, 1)
28     E (8, 1)=VB (8, 1)
29     E (9, 1)=VB (9, 1)
30     IF (M) 6, 7, 8
31     6 Y (6, 6)=YA1

```

```
32      Y (13, 13)=YB 1
33      Y (14, 14)=YC 1
34      Y (6, 4)=A 1
35      Y (11, 4)=A 2
36      GO TO 10
37  7  Y (6, 6)=YA 2
38      Y (13, 13)=YB 2
39      Y (14, 14)=YC 1
40      Y (6, 4)=B 1
41      Y (11, 4)=B 2
42      GO TO 10
43  8  Y (6, 6)=YA 2
44      Y (13, 13)=YB 1
45      Y (14, 14)=YC 2
46      Y (6, 4)=C 1
47      Y (11, 4)=C 2
48      GO TO 10
49  10 CALL MULT (B, Y, C, 7, 15, 15)
50      CALL MULT (C, A, D, 7, 15, 7)
51      CALL MULT (Y, E, F, 15, 15, 1)
52      CALL MXIN 01 (7, D, G, ISW, IND, 7, 1.0E-09)
53      CALL MULT (D, B, G, 7, 7, 15)
54      CALL MULT (G, F, V, 7, 15, 1)
55      CALL MULT (A, V, VB, 15, 7, 1)
56      KI=K-1000
57      WRITE (6, 107) KI, E(15, 1),V
58  107 FORMAT (1H, I4, F11. 6, 7F13. 8)
59      N=M
60      IF (KI)30, 30, 18
61  18  IF (V (1, 1). GE.V (5, 1)) GO TO 15
62      M=1
63      IF (N. EQ. M) GO TO 16
64      GO TO 8
65  15  IF (V (2, 1). GE. V(6, 1)) GO TO 17
66      M=0
67      IF (N. EQ, M) CO TO 16
68      GO TO 7
69  17  M=-1
70      GO TO 16
71  30  Y (7, 7)=1.24
72      Y (8, 8)=4.75
73      Y (9, 9)=1.31
74      GO TO 18
```

```
75 16 IF (K. EQ. 1200) GO TO 25
76 21 CONTINUE
77 25 STOP
78     END

1     SUBROUTINE MULT (A, B, C, L1, L2, L3)
2     DIMENSION A (L1, L2), B (L2, L3), C (L1, L3)
3     DO 10 I=1, L1
4     DO 10 J=1, L3
5     C (I, J)=0.0
6     DO 10 K=1, L2
7 10  C (I, J)=C (I, J)+A (I, K)*B(K, J)
8     RETURN
9     END
```