

パルス計数装置の高速化について

中富 葆造・武石 泰亮・川原浩一郎

(受理 昭和 39 年 6 月 16 日)

STUDY OF SPEEDING UP IN COUNTER CIRCUIT

Hōzō NAKATOMI, Taisuke TAKEISHI
and Kōichirō KAWAHARA

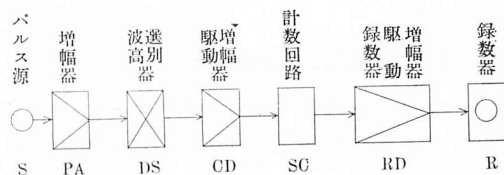
Sytudy of speeding up of pulse-counting apparatus is divided into two main methods: the developing new superior scaling unit of circuit and how transfer pulses exactly and speedily from one unit to the following without bad influence and disturbance. The paper treats a connection between a pulse height analyzer and a driving amplifire for scaling circuit, and points out that in approach of the limit of counting speed, the pulse height analyzer loses its own essential purpose and the scaling circuit may be act as a pulse height analyzer with its triggering level, if the incomming pulse height slightly over the triggering level of a Schmitt trigger circuit. And for dampning, germanium diode is more excellent than silicon ones if inserted at heigher repeated frequency: heigher than 10 M.C.

1. は し が き

パルス計数装置の計数速度を向上させる上で基本的な進み方は大きく二つの内容に分けられる。一つは装置を構成している各ブロックの個々の回路（以下単位回路と呼ぶ）の性能を向上させることと、他の一つはそれ等の各ブロック間を如何に有効に信号を速かに正確に伝送するかという二つである。勿論、この両者は全く無関係のことではない。単位回路の高速化が可能だとしても、その出力を良好な動作状態の下で取り出し、次段に効果的に送りこむことができないならば装置としての高速化は成功しない。前段と後段との結合が互の回路の動作機構を充分考慮せずに結合されることは、高性能の単位回路の機能を低下させることになりかねないからである。本報告では計数速度の高速化を目的とした研究の中の特に波高選別器として使用されるシュミットトリガ回路と次段の計数回路駆動用段増幅器との結合について行なつた実験結果を報告する。

2. 計数装置の構成と二つの実験について

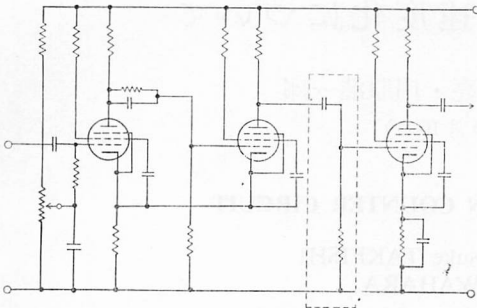
計数装置は一般に第 1 図のような各ブロックで構成されている（DS の波高選別整形回路にはシュミットトリガ回路が使用される）。この中でパルス源から波高選別整形回路 DS の入力端まではパルス源の波形に比例した波高のパルスが伝送されねばならないが、そ



第 1 図

の出力端以降は次段をトリガするに適当に整形された一定の波形が伝送されねばならない。そのような波形変換回路は第 2 図のシュミットトリガ回路が適しているので使用される。この回路はよく知られているように V_1 の格子電位がある電位以下であると V_1 遮断、 V_2 導通、ある電位以下であると V_1 導通、 V_2 遮断となる。その二状態間を転移する時間は一般に無視し得る程極めて短い時間であると仮定する。そのため V_2 の陽極電位は V_2 が導通であるか、遮断であるかによつて二つの値をとる。従つて V_1 の格子電位を転移値以下にセットして置いてパルス入力を重量させると、パルスが転移値とセット値間の差より大なる間だけ V_2 が遮断される。もし V_2 の陽極回路に分布容量がないと仮定すると V_2 の陽極電位のように矩形波電圧で変化する。その持続時間は一定繰返し周期をもつた相似の定振幅の波形を入力端子に与えたときは一定となるが、各パルス間に相似性がないときや、振幅が一定でないときは持続時間は一定値にならない。

一定持続時間のパルスを得るにはこの定波高不定持



第2図

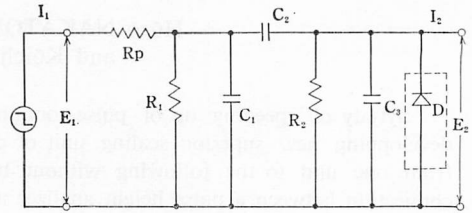
続時間のパルス電圧を矩形波の持続時間より遙かに短い時定数の微分回路に導いて微分出力をとると一定波形となる。又この微分回路を V_2 の内部抵抗と L なる負荷インダクタンスでも行なうことができる。

しかし極間容量が影響するような短い時定数の程度になると CR 微分回路は次第に積分回路の傾向を帯びてくる。又 L 負荷回路においては LC の共振回路が構成される。

3. CR 微分形結合回路の特性

パルス計数の高速度化を行なうにはシュミットトリガ回路では V_2 の極間容量、各素子の対地分布容量、

V_3 の格子陰極間容量、格子陽極間容量によるミラー効果等で可成り大きい分布容量が存在しているので第3図の等価回路によらねばならない。シュミットトリガ回路の内部抵抗は回路の性質上相当に高い値を有している。従つて V_2 に流れる陽極電流は定電流と考えられる。第3図の等価回路の入出力の関係を求めると



第3図 結合回路の等価回路

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (1)$$

ここで $I_1 = -\frac{I_0}{p}$, $I_2 = 0$ とすると

$$E_2 = \frac{I_1}{C} = -\frac{I_0}{p} \cdot \frac{1}{C} \quad \dots\dots (2)$$

そこで四端子定数を求めると

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{pC_2R_2} \{ p^2(C_1C_2 + C_2C_3 + C_3C_1)R_2R_p + p[(C_1 + C_2)R_p + (C_2 + C_3)R_2] + 1 \} & \frac{p(C_1 + C_2)R_1R_p + R_1 + R_p}{pC_2R_1} \\ \frac{1}{pC_2R_1R_2} \{ p^2(C_1C_2 + C_2C_3 + C_3C_1)R_1R_2 + p[(C_1 + C_2)R_1 + (C_2 + C_3)R_2] + 1 \} & -\frac{p(C_1 + C_2)R_1 + 1}{pC_2R_1} \end{bmatrix} \\ \therefore E_2 &= \frac{-I_0}{p} \frac{pC_2R_1R_2}{p^2(C_1C_2 + C_2C_3 + C_3C_1)R_1R_2 + p[(C_1 + C_2)R_1 + (C_2 + C_3)R_2] + 1} \\ &= -I_0R_1 \times \frac{C_2R_2}{p^2(C_1C_2 + C_2C_3 + C_3C_1)R_1R_2 + p[(C_1 + C_2)R_1 + (C_2 + C_3)R_2] + 1} \quad \dots\dots (3) \end{aligned}$$

(3) 式の極を求めると

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{-\alpha + \beta}{A} \\ &= \frac{-[(C_1 + C_2)R_1 + (C_2 + C_3)R_2] + \sqrt{[(C_1 + C_2)R_1 + (C_2 + C_3)R_2]^2 - 4(C_1C_2 + C_2C_3 + C_3C_1)R_1R_2}}{2(C_1C_2 + C_2C_3 + C_3C_1)R_1R_2} \\ p_2 &= \frac{-\alpha - \beta}{A} \\ &= \frac{-[(C_1 + C_2)R_1 + (C_2 + C_3)R_2] - \sqrt{[(C_1 + C_2)R_1 + (C_2 + C_3)R_2]^2 - 4(C_1C_2 + C_2C_3 + C_3C_1)R_1R_2}}{2(C_1C_2 + C_2C_3 + C_3C_1)R_1R_2} \end{aligned}$$

但し

$$\alpha = \frac{[(C_1 + C_2)R_1 + (C_2 + C_3)R_2]}{A}$$

$$\beta = \frac{\sqrt{[(C_1+C_2)R_1+(C_2+C_3)R_2]^2-4(C_1C_2+C_2C_3+C_3C_1)R_1R_2}}{A}$$

$$A = 2(C_1C_2+C_2C_3+C_3C_1)R_1R_2$$

これを用いると

$$\begin{aligned} E_2(t) &= \frac{-2I_0R_1 \times C_2R_2}{A} \cdot \frac{e^{p_2t} - e^{p_1t}}{p_2 - p_1} \\ &= \frac{-I_0R_1 \times C_2R_2}{\beta} \cdot \exp\left[-\frac{\alpha}{A}t\right] \cdot \left\{ \exp\left[\frac{\beta}{A}t\right] - \exp\left[-\frac{\beta}{A}t\right] \right\} \\ &= \frac{-2I_0R_1 \times C_2R_2}{\beta} \cdot \exp\left[-\frac{\alpha}{A}t\right] \cdot \sinh\left[\frac{\beta}{A}t\right] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

β の値は以下のように実数値をとる.

$$\begin{aligned} &[(C_1+C_2)R_1+(C_2+C_3)R_2]^2-4(C_1C_2+C_2C_3+C_3C_1)R_1R_2 \\ &= [(C_1+C_2)R_1-(C_2+C_3)R_2]^2+4C_2^2R_1R_2 > 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$\alpha\beta A$ の 3 者間には

$$\beta^2 = \alpha^2 - 2/A, \quad A > 0, \quad \alpha > 0, \quad \beta > 0$$

従つて

$$\alpha > \beta \quad \dots\dots\dots (6)$$

このことから (4) 式は潜動となる.

(4) 式の最大値 (波高値) は

として

$$t_1 = \frac{1}{p_2 - p_1} \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{A}{\beta} \tanh^{-1} \frac{\beta}{\alpha} \quad \dots (7)$$

のときに得られる. 従つて (7) 式を (4) 式に代入し

$$\begin{aligned} E_{2\max} = E_2(t_1) &= \frac{2I_0R_1 \times C_2R_2}{\beta} \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{-\frac{\alpha}{A(p_1-p_2)}} \cdot \sinh\left[\frac{\beta}{A} \frac{1}{p_2 - p_1} \ln \frac{p_1}{p_2}\right] \\ &= \frac{I_0R \times C_2R_2}{\beta} \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\alpha}{A(p_1-p_2)}} \left\{ \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\beta}{A(p_2-p_1)}} - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{-\beta}{A(p_2-p_1)}} \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

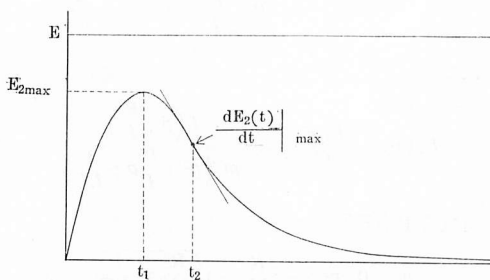
変曲点を求めると

$$t_2 = \frac{2}{p_2 - p_1} \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{2A}{\beta} \tanh^{-1} \frac{\beta}{\alpha} \quad \dots (9)$$

$$\frac{d^2E_2(t)}{dt^2} = \frac{2I_0R_1 \times C_2R_2}{A} \cdot \frac{p_2^2 e^{p_2t} - p_1^2 e^{p_1t}}{p_2 - p_1} = 0$$

従つて尖頭値の時間 t_1 の 2 倍の時間で最大立下りをもちその値は

$$\left. \frac{dE_2(t)}{dt} \right|_{t=t_2} = \frac{2I_0R_1 \times C_2R_2}{A(p_2-p_1)} \left\{ p_2 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{2p_2}{p_2-p_1}} - p_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{2p_1}{p_2-p_1}} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$



第 4 図 出力パルス波形

この曲線を図示すると第 4 図のようになる.

パルス波の電圧が V_2 を遮断できないような値に下ると V_2 は再び導通状態に帰る. このとき V_2 が遮断になつて充分時間が経過すれば, 第 4 図の波形の値も零に近い値となつてはゐるはずである. 従つて V_2 が導通状態に戻るときの応答は

$$I_1 = + \frac{I_0}{p}$$

なる入力を第 3 図 (点線部を除く) の回路に与えたときの出力波形として得られる. これに従つて次式のように (8) 式の符号を変えたものになる.

$$E_{2\max}^1 = \frac{2I_0 R_1 \times C_2 R_2}{\beta} \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{-\frac{\alpha}{d(p_2-p_1)}} \cdot \sinh \left[\frac{\beta}{d} \frac{1}{p_2-p_1} \ln \frac{p_1}{p_2} \right]$$

$$= \frac{I_0 R_1 \times C_2 R_2}{\beta} \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\alpha}{d(p_2-p_1)}} \left\{ \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\beta}{d(p_2-p_1)}} - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{-\beta}{d(p_2-p_1)}} \right\}$$

もし第3図(点線部)のようにこのボックスパイクをクリップするダイオードをつけるとすると $R_2 \doteq 0$ となつて

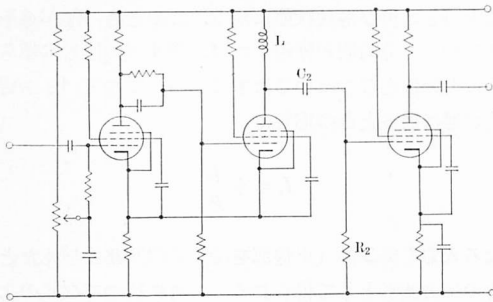
$$E_{2\max}^1 \doteq 0$$

が得られる。

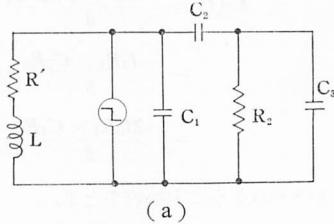
以上は充分なパルス幅(持続時間)があるときについて解析したものであるが、繰返し周波数が高くなると第6図の波形の値が相当大きいとき、又はパルスの前縁において V_2 が導通に転移することが考えられる。このような場合の解析は大変複雑になるが、 $E_2(t)$ の値が立上り始める前に C_2 に電荷がなければ $E_2(t)$ は(4)式に従つて変化し、 $t=\tau$ (V_2 が遮断した時間)になつて V_2 が遮断に戻ると、その瞬間の各 C_1 , C_2 , C_3 上の電荷を初期条件として(4)式と重ねて得られる。もし $t < t_1$ なる値に τ の値がなつてくると、一次近似として $E_2(t) \propto \tau$ なる関係になる。従つて $\tau < t_1$ となると得られるパルスの波高は τ の函数となるので好ましくない。この他 $E_2(t)$ の波高値に影響を与えるものとしては $E_2(t)$ の立上り前に C_2 に電荷があつたとすると $E_2(t)$ の値は小さくなる。ダイオードをつけて立下りの $R_2=0$ とすることは C_2 の電荷を速く零にする作用があることは既に知られる通りであるが、 R_1 が零でない限り C_2 の電荷は直ちに零に戻ることはない。

4. L 負荷結合回路の特性

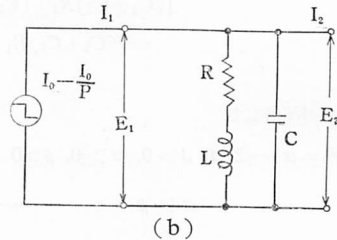
シュミットトリガ回路の出力負荷として第5図のように R_1 の代りに L なるインダクタンスを入れたときは、第6図(a)の等価回路が得られる。 $C_2 \gg C_3$ に選



第5図



(a)



(b)

第6図

べば同(b)図のように簡略化される。実際に R は小さい値であるが L の巻数が多くなると幾分その影響が大きくなると推察される。実際のシュミット回路の動作において I_1 は常時定電流が流れていて、パルスが到来すると遮断になる。これを電流波形で表示する。その変化分を式で示すと

$$I_1(p) = -\frac{I_0}{p}$$

第6図(b)の回路の四端子定数は

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{C(p^2 + \frac{R}{L} + \frac{1}{LC})}{P + \frac{R}{L}} & 1 \end{bmatrix}$$

従つて

$$E_2(p) = \frac{I_1(p)}{C} = -\frac{I_0(p + \frac{R}{L})}{pC(p^2 + \frac{R}{L} + \frac{1}{LC})}$$

留数を求めると

$$p_0 = 0, \quad p_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$

$$p_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$

t 関数に変換すると

$$\begin{aligned}
 E_2(t) &= -\frac{I_0}{C} \left\{ \frac{R}{p_1 \cdot p_2} + \frac{(p_1 + R)}{p_1(p_1 - p_2)} \cdot \varepsilon^{p_1 t} + \frac{(p_2 + R)}{p_2(p_2 - p_1)} \cdot \varepsilon^{p_2 t} \right\} \\
 &= -I_0 R - I_0 R \cdot \varepsilon^{-\frac{R}{2L}t} \cosh\left(\sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \cdot t\right) \\
 &\quad - \left(\frac{R^2}{2L^2} - \frac{1}{LC}\right) \frac{I_0 L}{\sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}} \cdot \varepsilon^{-\frac{R}{2L}t} \sinh\left(\sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \cdot t\right) \quad \dots\dots\dots(11)
 \end{aligned}$$

(11) 式は根号の中の符号により潜動，臨界，振動の三つの解が得られるが，ここでは振動となる条件を利用する．第1項，第2項は R を係数としているが， R はできるだけ小にとどめ，又実際上無視し得るので(11) 式は

$$\frac{R^2}{2L^2} \ll \frac{1}{LC}$$

なる関係も考慮に入れて次のようになる．

$$\begin{aligned}
 E_2(t) &= -I_0 L \left(\frac{R^2}{2L^2} - \frac{1}{LC} \right) \sin\left(\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \cdot t\right) \\
 &\approx -I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin \frac{t}{\sqrt{LC}} \quad \dots\dots\dots(12)
 \end{aligned}$$

(12) は連続振動となるので 第一波後はダイオードでクリップして消去する． V_2 が導通に入るときはこのクリッピングダイオードの効果により L に電流が流れないので振動は発生しない．

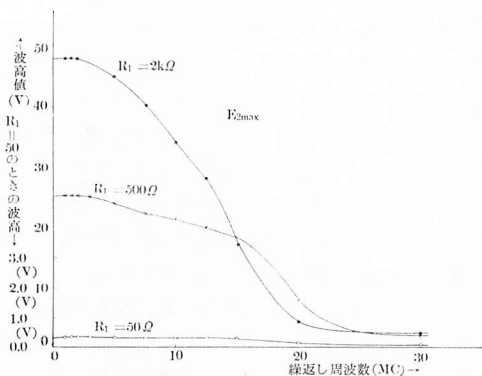
5. 実験方法及び結果

CR 結合方式では第2図の入力端子に発振器により正弦波を印加して R_1 , R_2 , C_2 の値を特に低い方に色

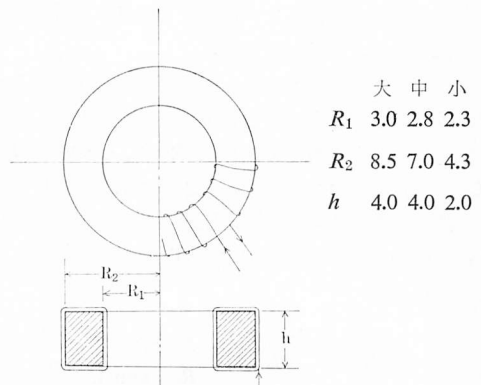
々変えながら出力波形を観測した．シンクロスコープの入力容量の影響が無視できないので V_3 の格子電位を直接観測することは避けて，陽極側に低い負荷抵抗を入れてその電圧変化を観測するようにした．シンクロスコープは岩崎製で帯域幅は 100 MC であり，この程度の実験では忠実と考えられる．繰返し周波数とパルス高との関係は第7図となる．この図より R_1 , R_2 , C_2 を極く低い値に選ぶと可成り高い周波数まで平坦な出力パルス高特性が得られる．しかし，こうすると波高値が非常に小さいので後段で増幅利得を大きくしなければならない．

L 負荷の実験には第8図に示すような3種類のサイズのダストコアに 0.2φ の PVC 電線を必要回数だけ巻いたものを使用した．このとき C_2 , R_2 の値は微分特性の必要はないので結合容量として適当に選んだ．L 負荷による結合では第9図の特性が得られた．図よりわかるように出力電圧波高値は負荷インダクタンスの巻数に比例している．このことは以下に述べるようにインダクタンスの平方根に出力電圧が比例することと一致するものである．

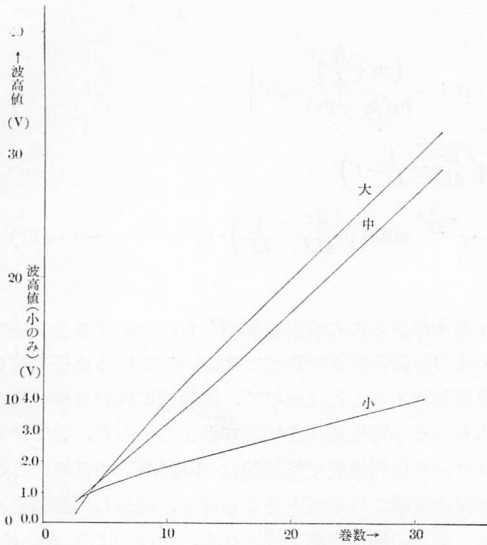
矩形断面を持った第8図のようなトロイダルコイルのインダクタンスは次の式で表わされる．



第7図 繰返し周波数と波高値との関係



第8図 ダストコア



第9図 (a) 波高値と巻数の関係

$$L = \frac{\mu h N^2}{2\pi} \log \frac{R_2}{R_1} = k^2 N^2 \quad \dots\dots(13)$$

但し $k^2 = \frac{\mu h}{2\pi} \log \frac{R_2}{R_1}$

μ は材料の実効透磁率

従つてインダクタンスは巻数の自乗に比例する。

今コイルを変えても分布容量は変わらないものとする
と、パルスによつて起る振動の周波数はほぼ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2k\pi N\sqrt{C}} \quad \dots\dots(14)$$

但し $C = C_1 + C_2$

実際にシンクロスコープ面でダイオードを除いて観測した波形より算出した周波数とこの式より算出した値を比較するとほぼ一致する。

なお L の巻数が3回のときは振動が発生しなかつた。5回巻きのときは大のコアのみに発生した。留数の根号内の値と巻数との関係は $R \propto N$, $L \propto N^2$ で $R^2/4L^2$ も $1/LC$ も共に N^2 に逆比例する。すると μ の値の変化とも考えられるが、圧粉鉄芯の実効透磁率は比較的低い値であり、励磁の AT は小であるから、これはむしろ

$$\frac{R^2}{4L^2} = \frac{(R_N + R_C)}{4L^2} \quad R_N \propto N \quad R_C = \text{const.}$$

と考え R を R_N なる巻数比例部分と R_C なる巻数に関

しないものの合成と見做した方が実際と合致するようである。以上のように仮定すると巻数の小なところで発振が止ることが了解できる。

L 負荷の場合、減衰振動を消去するには半導体二極管を使用した。CR 結合のときのバックシュートのクリップにも用いた。半導体としてはシリコンとゲルマニウムの2種類について実験を行なつた。その結果シリコン形はいづれも制動作用についてほとんど効果がなくゲルマニウム形が優れていることがわかつた。これは最初静特性曲線の折れ曲り点が零Vより偏倚しているのではないかと推察し、直流特性を測定しバイアスを与えて使用したが効果なかつた。静特性では遙かに劣るゲルマニウムのものの方がずっと優れた消去特性を有している。この程度の実験で全てのシリコン又はゲルマニウムの2極管について断定することは問題があるにしても、その差はあまりに大きく、従つてクリッピング用2極管の選択は充分注意を要すると思われる。

なおバックシュートクリッピングについてはCR微分回路の出力電圧が、その時定数を小さくするにつれて小さくなる。そのとき、正負の波高値間の電圧差も小さくなり負のパルスのクリッピング効果が小さくなる。従つて R_2 の値が小のときはあまり効果がない。

6. 結 論

実験で得られた結果から判断されることは以下のようになる。

波高選別器を前段に備えた計数回路で計数を行なうとき、従来一般に選ばれている C_2 , R_1 , R_2 の値では計数回路駆動用増幅器の入力パルスは前段シュミットトリガ回路入力為不定振幅不定形であると一定波形とはならないで、パルス高と形とに一定の関係を有して分布している。これは特にシュミットトリガ回路の V_2 が遮断する時間が短いところで多くの問題を含んでいるのは従来指摘されている通りであるが、ここで特に注意しなければならないのは、 C_2 , R_1 , R_2 の値を小にして行くと後段の増幅利得を上げなければならないことと、終には転移時間を充分無視できなくなることである。本報告では転移時間を無視しているので難点があつた。従つて、更に高速化を行なうには転移時間について解明を行なわなければならない。このことはL負荷についても全く同様で観測波形や計数可能の上限繰り返し周波数等にも明確な式を得るには到らなかつた。も一つ忘れてならないのは第1図の構成

になる形のパルス計数回路では入力パルス波高がある分布をしたり、分解時間がぎりぎりの近接した二つのパルスを分離したりする場合に得られるパルス計数の波高選別は、波高選別器が行なっているのではなく、計数回路のトリガレベルによるものと思わせざるを得ないことである。これは前述のように限界近くでは駆動増幅器入力がある分布した値であれば、その出力もこれに従って分布してくるので、その波高選別は計数回路自体で行なっていることになる。

CR 結合方式とL 負荷方式の優劣についてはこの程度で立入った結論を出すべきではないと考えるが、L 負荷が高い繰返し周波数になると、比較的高い振動電圧が得られ、これに比して CR 形は急激に波高が下って行つた。実験の範囲内では高繰返し周波数域ではL 負荷が優れていた。ただ L と R の値により振動発生の限界があることに留意せねばならない。

7. あ と が き

前述のように本報告で十分な形で結論を見出すことができなかった。これは本報告に入れる予定にしていた微分変成器を利用した実験についての分を時間の関係から割愛せざるを得なかつたためでもある。その他、解析等についても簡略化し過ぎたのではないかと危惧している。又特に仮定等についても大胆に過ぎるかとも心配している。従つて本報告中の問題点については今後結論を出して報告する予定である。この実験を進めるに当つては本学部電気工学科昭和38年度卒業生肝付英雄、上田浩義両君の協力を感謝する次第である。又技能員松尾至誠君の努力についても厚くお礼申上げたい。なお、この実験を行なう経費については昭和38年度科学研究費の一部を使用させて戴いたことを記して感謝の意を表します。