トランジスタ化パルスクランプ回路の設計法

NHK 技術研究所 石 田 順 一
藤 村 安 志

トランジスタクランプ回路の動作を解析し、ハム改善率、低域過渡特性、水平周期サグの3条件から回路の実用的設計方式を求め、真空管式と同等の性能が得られることを示した。動作原理は回路のインピーダンスが真空管式にくらべ、ほぼ1/200であるほかは本質的に同じであるが、トランジスタ回路固有の問題があり、それらを十分考慮した設計が必要である。

最近トランジスタ化テレビ映像機器は数多く実用化されつつあるが、クランプ回路についてはまだ真空管式にくらべて劣るとされ、とくにトランジスタの低インピーダンス特性のため低域の過渡ひずみが問題である。クランプ回路の解析はすでに内外で行なわれているが¹⁾²⁾、本稿ではまずトランジスタの諸特性を考慮に入れた動作解析を行ない、設計条件を明らかにして実用上問題のない回路が得られることを明らかにする。

1. クランプ回路の動作

1. 直流分再生回路

第1図は、よく知られた直流分再生の原理を示すもので¹⁾あって、 $R_i \gg R_s$ で周期 T 、幅 τ のパルス入力に対し負信号のとき S が R_s 側に倒れるものとする。平衡状態においては、1周期内に C に出入りする電荷量は等しいから

$$\int_0^\tau \frac{E_1}{R_s} dt = \int_\tau^T \frac{E_2}{R_i} dt$$

が成立する。 $T \gg \tau$, $CR_i \gg T$, $CR_s \gg \tau$ とすると

$$\frac{R_i}{R_s} = \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{T}{\tau} \quad (1)$$

第1図 直流分再生の原理

"Design of Transistorized Pulse Clamp Circuit" by Junichi Ishida and Yasushi Fujimura.

$E_1/E_2=1\%$, $T/\tau=63.5/2.5 \div 25$ とすると R_i/R_s は2500 必要になる。以上は平衡状態についてであり、実際には動特性をよくするため、後にのべるように 10^4 以上の値が要求される。

2. クランプ回路の動特性

トランジスタクランプ回路は真空管式とほぼ同じく第2図(a)の等価回路で表わせる。 R_i は被クランプ段の入力抵抗、 R_0 は信号源出力抵抗、 R_s はスイッチングトランジスタの飽和抵抗である。真空管式にくらべて R_s を無視できないため、 C 、 R_i 結合回路により入力波形 e_i と非クランプ時のA点の波形が異なってくるので、クランプ動作は非クランプ時のA点の波形に対して考える。A点に現われた電位は S が閉じられたとき $C(R_s + R_0)$ の時定数でクランプされるべき電位へ近づく。 $\delta = \exp -\tau/(C(R_s + R_0))$ が1回のクランプによる減衰率で、これを第3図左側に示す。

ここで τ は S の閉じている期間、すなわちキーイングパルス幅である。非クランプ時にA点に勾配 α の Rump (定傾斜) 入力に加えられたとする。 S を開閉してクランプを行なうとA点の波形は第2図(c)のようになる。クランプされる直前の電位は

$$\Delta E_i = \Delta E_{i-1} \cdot \delta + \alpha H = \alpha H (1 + \delta + \delta^2 + \dots + \delta^{i-1})$$

$$i=1, 2, 3, \dots$$

ただし H はクランプ周期であり、 $H \gg \tau$ とする平衡状態では

$$\Delta E_n = \alpha H \frac{1 - \delta^n}{1 - \delta} \div \alpha H \frac{1}{1 - \delta}$$

$$\delta < 1, n \gg 1 \quad (2)$$

またクランプ回路は一種の差分回路であり、入力信号の変化に対してクランプ周期が十分短かければ微分回路で近似でき²⁾、その時定数は(2)式より $H/(1-\delta)$ とする。

2. 諸特性と設計条件

1. ハム改善率

上にのべたようにクランプ回路は一種の微分回路であるから、ハム波形を加えた場合、出力ハムの最大値は非クランプ波形の最大傾斜部に生じ、その位相は 90° 進む。角周波数 ω_h の単位振幅のハムの最大傾斜部の勾配は ω_h であり、その付近ではほぼ一定であると考えることができるから、これを上にのべた Rump 入力と考えて、(2) 式よりハム改善率は

$$\Delta_h \doteq \omega_h H \frac{1}{1-\delta} \quad (3)$$

となる。 $\omega_h = 2\pi \times 50$ の場合の δ と Δ_h の関係を第3図右側に示す。以上は入力波形を第2図(a)のA点で考えたが、実際の入力波形 e_i に対しての改善率は $C R_i$ 結合回路のハムに対する減衰分だけ上記の値よりよくなる。

2. 低域過渡ひずみ

クランプ期間の直後から第2図(a)のA点の電位は、 $C(R_0 + R_i)$ 回路を通しての放電によって、アース電位へ向かう傾斜を生ずる。この傾斜は、A点の初期電圧に比例し、第4図(a)のような電位関係にあるとすると $R_i \gg R_0$ であるので、 R_0 を無視して傾斜の始まり付近においては

白レベルで $(E_r + E_v)/CR_i$

(a) 等価回路

(b) 非クランプ時A点波形

(c) クランプ時A点波形

第2図 Rump 入力に対するクランプ回路の動作

第3図 クランプ回路の時定数とハム改善率の関係

第4図 低域過渡ひずみ波形

黒レベルで E_r/CR_i

となる。このような傾斜入力に対して、ブランキングのクランプされる電位は白レベルと黒レベルについて、おのおの

$$\Delta E_{rw} = \frac{(E_r + E_v) K_h}{CR_i} H \cdot \frac{\delta}{1-\delta}$$

$$\Delta E_{rb} = \frac{E_r}{CR_i} H \cdot \frac{\delta}{1-\delta}$$

[第2図(c) 参照]

だけ正確なクランプ電位と異なる。ただし、 K_h は水平の有効走査率で、 $CR_i \gg H$ とする。このクランプ電位の差のために黒レベル(白レベル)から白レベル(黒レベル)へ変化したとき第4図(b)のような過渡ひずみがおきる。このひずみ率は

$$\Delta_t = \frac{\Delta E_{rw} - \Delta E_{rb}}{E_v} = \frac{H \cdot K_h}{CR_i} \cdot \frac{\delta}{1-\delta} \quad (4)$$

で与えられる。

クランプ前段において低域サグがある場合は、その傾斜を加えて計算しなければならないが、一般にそれらの結合回路の時定数は CR_i より大きいと考えられ、その

第5図 コレクタ接地増幅回路

影響を無視してさしつかえない。

3. 水平周期サグ

上記の CR_i による電位傾斜は水平周期のサグとなり、サグの映像 p-p 値に対する量は (第4図(b)参照)

$$\Delta_s = \frac{(E_r + E_v) K_h}{E_v} \cdot \frac{H}{CR_i} \quad (5)$$

で与えられる。

4. 設計条件

以上の3つの特性から、クランプ回路設計の条件が得られる。

- 1) ハム改善率については $\delta = \text{小}$ ($\tau = \text{大}$, $R_s + R_0 = \text{小}$, $C = \text{小}$)
- 2) 低域過渡ひずみについては $\delta = \text{小}$, $R_i = \text{大}$
- 3) 水平周期サグについては $CR_i = \text{大}$

この3つの条件に含まれるパラメータのうち、 τ はブランキング波形によって制限され、 C についての条件は相反するので妥協点として求めるよりほかになく、結局、 $R_i \rightarrow \text{大}$, $R_s + R_0 \rightarrow \text{小}$ が回路に要求される必要条件となる。

3. トランジスタ回路

1. コレクタ接地増幅回路の入出力抵抗

上にのべたような高い入力抵抗、低い出力抵抗を得るには、コレクタ接地とすればよい。第5図の回路の入力および出力抵抗は

$$R_i = r_{bb'} + (r_b + R_e)(1 + h_{fe}) \doteq R_e h_{fe} \quad (6)$$

$$R_o = \frac{R_g + r_{bb'}}{h_{fe}} + r_d \doteq \frac{R_g}{h_{fe}} + \frac{26}{I_e} \quad (7)$$

ただし $r_{bb'}$: ベースひろがり抵抗

r_d : エミッタ拡散抵抗

h_{fe} : エミッタ接地電流増幅率

I_e : エミッタ電流 (mA)

である。

入力抵抗 R_i は直流までも含めて考えなければならないが、 R_e による帰還量が十分大きければ、すべての電圧レベルで一定とみなせる。また、入力抵抗を大きくするため R_e を大きくすると、必然的にトランジスタの動作電流が減少するので、小エミッタ電流で h_{fe} や f_T の大きいトランジスタをえらぶ必要がある。1段で十分な

値がとれないときには、さらに負帰還をかけたり、直列接続にする。

2. スイッチングトランジスタとキーヤ回路

スイッチングトランジスタは、トランジスタの双方向性を利用しているが、飽和抵抗が低いものが必要で、現状では合金形がよい。その飽和抵抗はカーブトレーサによる測定、または δ の実測値より逆算して、数 Ω の程度である。

遮断時のコレクタおよびエミッタ逆電流は

$$I_{CB} = \frac{I_{CO}}{1 - H_{FN}H_{FI}} (1 + H_{FI})$$

$$I_{EB} = \frac{I_{EO}}{1 - H_{FN}H_{FI}} (1 + H_{FN})$$

で与えられる³⁾。

ただし I_{CO} : エミッタ開放時のコレクタ逆電流

I_{EO} : コレクタ開放時のエミッタ逆電流

H_{FN} : 大振幅時の順方向電流増幅率

H_{FI} : 大振幅時の逆方向電流増幅率

である。

一般に $I_{CO} > I_{EO}$, $H_{FN} < H_{FI}$ であるので、 $I_{EB} < I_{CB}$ となる⁴⁾。したがって遮断時の漏洩電流を小さくするため転倒形接続(コレクタとエミッタを入れ換えて用いる)とする。この接続により遮断時の漏洩抵抗は被クランプ段の入力抵抗とくらべて問題にならないくらい大きくできる。

またこの接続により飽和時の内部電圧も低下する。スイッチングトランジスタの飽和抵抗を小さくするには十分なベースドライブが必要である。このためキーヤ回路の出力抵抗は低くする。

キーイングパルスの振幅は、遮断時にコレクタ・ベース接合が映像信号によって導通しないようにきめなければならない。しかし、必要以上の振幅は、クランプ期間の前後のスパイクが大きくなるため、かえってまずい。

スイッチングトランジスタに PNP を用いたとき、被クランプ信号を負極性にとすると、遮断時に映像信号でコレクタ・ベース接合が導通することがないから、キーイングパルス振幅は小さくてすむ。ただし V_s 信号のときは同期信号で導通しないよう注意する。

キーヤとスイッチングトランジスタ間の結合回路の時

第6図 補対称接続クランプ回路

定数は、(1) 式で $E_1=0.3\text{V}$ くらいになるようにえらぶ。ただし (1) 式はパルス源出力抵抗が零の場合で、出力抵抗が有限の場合はパルス先端の短縮がおきるから注意を要する。ここでピーククランプが完全に行なわれすぎるとベース電流が減少して飽和抵抗が上がり、あまり不完全だとそれだけ大きいキーイングパルスが必要となる。

スイッチングトランジスタとアース間に入れるバイアス回路は、十分バイパスをとってインピーダンスを下げておくに要がある。

低レベルでクランプする場合には、スイッチングトランジスタを第 6 図のように補対称接続にするとよい。この特長は、

1) ブリッジ接続によりキーイングパルスの洩れが少なく、トランジスタ内部電圧、漏洩電流やバイアス用抵抗を流れるエミッタ電流を打消し合う。

2) ブリッジ接続によりパラメータの温度変動を打消し合う。

3) 飽和抵抗が 1/2 になる。

ことであるが、その反面キーイングパルスが正負 2 ついるので、回路は少し複雑となる。

4. 設計例

1. バックポーチクランプ

バックポーチ幅は最小 $3.8\mu\text{s}$ であるので、余裕をみてキーイングパルス幅は $2.5\mu\text{s}$ とする。 δ が 0.1 以下ではハム改善率はあまり変化しないので、 $\delta=0.1$ にと

第 7 図 バックポーチクランプ回路

第 1 表 トランジスタ式と真空管式の比較

	トランジスタ式	真空管式
R_0	4 Ω	1 k Ω
R_s	3 Ω	0.5 k Ω
C	0.15 μF	1500 pF
τ	2.5 μs	2 μs
δ	0.1	0.4
R_i	200 k Ω	50 M Ω
$\frac{R_0+R_s}{R_i}$	3.5×10^{-5}	3×10^{-5}
A_h	33 dB	30 dB
A_i	0.04%	0.09%
A_s	0.18%	0.07%

第 8 図 高入力抵抗回路

り、第 3 図左側より導通時の時定数を読みとると $1.1\mu\text{s}$ となる。クランプ前段の出力抵抗はエミッタフォロウ 2 段を用い、(7) 式より $h_{fe}=50$, $r_{bb'}=30\Omega$ として (第 7 図参照)

1 段目 $R_0' = 10^3/50 + 26/5 = 25\Omega$

2 段目 $R_0 = (25+30)/50 + 26/10 \div 4\Omega$

スイッチングトランジスタの飽和抵抗を 3Ω とすると

$$C = 1/(3+4) \div 0.16\mu\text{F}$$

以下であればよい。このとき、ハム改善率は 33 dB である。

つぎに被クランプ段の入力抵抗はトランジスタの h_{fe} のバラッキを考慮して $h_{fe}=50$ とし (6) 式より

$$R_i = 50 \times 10^3 = 50\text{ k}\Omega$$

水平周期のサグは、被クランプ段のエミッタにリニアクリップを入れればバイアス電圧分は打消されるので、映像 p-p 値分についてのみ考えればよい。映像 p-p 値に対して 1% のサグを許すとする、(5) 式より

$$C = 63.5 \times 10^{-6} \times 0.83/0.01 \times 50 \times 10^3 \div 0.11\mu\text{F6}$$

以上であればよい。

低域過渡ひずみについては、上の水平周期サグに対する値を用いれば、(4) 式より $\delta=0.1$ としても

第9図 ブランキングクランプ回路

$$\Delta i = 1 \times \delta / (1 - \delta) \div 0.1\%$$

となって、問題はない。結局 $0.11 < C < 0.16 \mu\text{F}$ であればよい。

被クランプ段のエミッタにリニアクリップが入らないときには、水平周期サグがバイアス電圧分だけ増加する

写真1 0 dB ハム重畳—入力波形, 0.5V/div.
ハム改善率測定

写真3 H1 本パルス—出力波形, 黒レベル部,
0.05 V/div

写真5 H1 本パルス—出力ラインセレクト波形,
白レベル部 0.05 V/div. 低域特性測定

ので、 R_i をその分大きくしなければならないが、小エミッタ電流で h_{fe} の大きいトランジスタを用い、エミッタ抵抗を大きくして数 $100 \text{ k}\Omega$ の値を得ることができる。第8図に実測例を示す。また、この回路を用いたときの真空管式との計算による比較を第1表に示す。

第7図のスイッチングトランジスタのコレクタ側のバリスタは、被クランプトランジスタの V_{BE} の温度補償用であり、キーヤのコレクタ回路のツェナーダイオードはキーイングパルス振幅制限用である。

2. ブランキングクランプ

カメラのプロセス増幅器の場合を考える。ここではブランキング挿入により低域過渡ひずみが増加する点が問題である。映像 p-p 値の3倍のブランキングを挿入したとすると、映像 p-p 値+ブランキング振幅に対して 0.1% のひずみ率が得られても、ブランキングをクリッ

写真2 0 dB ハム重畳—出力波形, 白レベル部,
0.05 V/div

写真4 H1 本パルス—出力ラインセレクト波形,
0.5 V/div

写真6 H1 本パルス—出力ラインセレクト波形, 黒レベル部 0.05 V/div

ブした後で映像 p-p 値に対するひずみ率は 0.4% となる。

この場合はブランキング幅が $10\ \mu\text{s}$ あるので、キーイングパルス幅を広げて余裕のある設計とする (第 9 図参照)。すなわち $\tau=6\ \mu\text{s}$, $C=0.2\ \mu\text{F}$ にとると、前と同じ特性を得るのに R_i は $30\ \text{k}\Omega$ まで、 R_s+R_0 は $13\ \Omega$ まで許容できる。水平同期サグのバイアス電圧と挿入ブランキングによる分は、クランプ前段に挿入する水平シェーディング補正波形によって打消すことができる。

3. 実測例

写真 1~6 は $R_0=8\ \Omega$, $R_i=56\ \text{k}\Omega$, $C=0.11\ \mu\text{F}$, $\tau=2.5\ \mu\text{s}$, クランプレベル $0\ \text{V}$ のものについての実測例を示すものである。ハム改善率 34 dB, 低域過渡ひずみ 0.5% 以下, 水平周期サグ 1%, また全白信号から全黒信号に変えたときのペダスタル変動は 1% で, 設計値を満足する。

5. む す び

以上のべたように、トランジスタのパラッキを考慮してもハム改善率, 低域過渡ひずみ, 水平周期サグの 3 特性を満足するトランジスタクランプ回路が得られ, さらにトランジスタ (とくに被クランプ段) の十分な選択により真空管式と同等の回路が得られる。

終りに、この研究の機会を与えられた当研究所鈴木テレビ研究部長, 石橋開発部長, および討論していただいた三井職員に感謝の意を表わす。(昭和 37 年 2 月 21 日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) D. A. Levell: The Theory and Application of D. C Restoring Circuit, Electronic Engng. May (1951)
- 2) 深海, 内野: クランプの動特性について, 信学誌 39 (1956) 858~860
- 3) 島: トランジスタ回路, 日刊工業, (1961) 283~284
- 4) Bright: Junction Transistors used as Switches, Comm. & Elect., T. AIEE, March (1955) 116~119

テレビジョン学会雑誌寄稿規定

1. 寄稿者は原則として本会々員に限る。
2. 本会所定の原稿用紙に、別に定める「テレビジョン学会雑誌執筆要領」に従って執筆すること。原稿用紙および執筆要領は申込みにより送付します。
3. 寄稿の種類
(イ) 論文・解説・資料 (長さは原則として刷上り 6 ページ以内, 1 ページは 250 字詰原稿用紙で約 8 枚)
(ロ) 談話室原稿 (刷上り 1 ページ以内), この欄は会員各員の自由な発言の場として寄稿を期待します。たとえば本会誌に掲載された論文などに関する感想, 討論または本会誌内容および本会の運営, 事業などに対する批判, 意見, 研究速報, テレビに関する随筆, 書評, 海外だよりなど。
4. 寄稿の内容はなるべく本会員多数のために理解しやすく, かつ未発表のものに限る。他の著作権を侵した場合は寄稿者の責任とする。

5. 寄稿された原稿は本会編集委員会で査読し不相当と認めたものは掲載しない。この場合, 原稿は寄稿者に返送する。

また, 編集委員会が原稿の一部訂正を適当と認めたときは, そのむね寄稿者に通知, 了解を得て訂正のうえ掲載する。

6. 寄稿が掲載された場合は 1 件につき抜き刷り 10 部を無料で寄稿者に贈呈する。ただし, 原稿料は支払わない。

なお, この他に別刷を希望する場合は, 実費を要す (寄稿のさいに希望部数を明記のこと, 最低 100 部, 例: 4 ページ 100 部で約 3400 円)。

7. 原稿用紙, 執筆要領の申込み, および原稿の送付先

東京都港区芝公園第 20 号地

東京タワービル

社団法人 テレビジョン学会

TEL (431) 7441 (内線 227)