SRPP 回路の解析

はじめに

最初のきっかけは, 木村哲氏のホームページ[1] に書かれていた, SRPP 回路の実験を見たことでした. SRPP 回路を実測してみると, 予想以上に出力インピーダンスが低い, という点に興味を覚えました. そこで, 簡単な等価回路を用いて計算してみて得られたのがここで述べる結果です.

SRPP 回路は, 広く用いられているにもかかわらず, 現在入手できる本のなかには, きちんとした解析を見つけることはできないようです. （過去には, きちんとした解析があったのだろうと思いますが, 私は見たことがありません. ）製作記事中で用いられている場合でも, ゲインや出力インピーダンスについて予め計算するのではなく, 出たとこ勝負でやっているように思われます. たしかに, SRPP 回路をふつうの増幅回路の組み合わせで（定性的に）理解しようとすると, いささか分かりにくいように思います. しかし, 基本的には単純な回路なので, 定量的に解析することは難しくありません. 真空管の動作を線形に近似して方程式を解けば, 以下に見るようにゲインや出力インピーダンスはきちんと計算できるのです.

得られた公式は, それほど複雑なものではなく, 実用的に用いることができると思います. みなさんのご批判, ご意見を頂きたく, 投稿した次第です.

方程式の導出とその解

SRPP 回路の交流的な等価回路を書いてみると, 図 1 のようになります.

下の真空管を T_1, 上側の真空管を T_2 としましょう. それぞれの真空管 T_1, T_2 の両端の電圧を E_1, E_2, またそれらを流れる電流を I_1, I_2 と書くことにします. そして, カソード抵抗 R の両端の電圧を E_3, そして負荷抵抗 R_L を流れる電流を I_3 と書くことにしましょう. それぞれの真空管ののプレート抵抗を rp_1, rp_2, 相互コンダクタンスを gm_1, gm_2 とします. すると, これらの満たす方程式は,

[1]「情熱の真空管」http://home.highway.ne.jp/teddy/

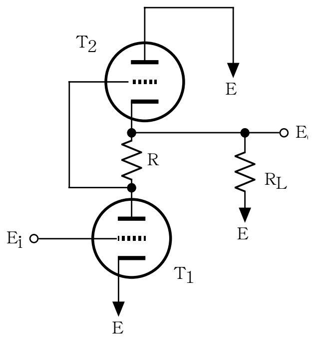

図 1: SRPP 回路の AC 等価回路

$$
\begin{aligned}
&E_1 + E_2 + E_3 = 0, \\
&I_1 + I_3 = I_2, \\
&I_1 = gm_1 E_i + E_1/rp_1, \\
&I_2 = gm_2(-E_3) + E_2/rp_2, \\
&I_3 = \frac{E_1 + E_3}{R_L} = -\frac{E_2}{R_L}, \\
&E_3 = RI_1
\end{aligned}
$$

となります. ただし, E_i は入力電圧, 出力電圧は, $E_o = -E_2$ です. これらの方程式を解いて, E_2 を E_i の関数として表せば, 入力と出力の関係が得られることになります. 変数の数が多くて複雑に見えますが, 実は線形の連立方程式なので, がんばって計算すれば必ず解けます.

途中の計算を省略して結論を書くと,

$$
E_2 = \left\{ (1 + gm_2 R)^{-1} \left(1 + \frac{R}{rp_1} \right) \times \times \left(\frac{1}{rp_2} + \frac{1}{R_L} \right) + \frac{1}{rp_1} \right\}^{-1} gm_1 E_i
$$

となります[2]. ゲインはこれから直ちに分かるわけですが, T_1 の増幅率 $\mu_1 = gm_1 \cdot rp_1$ を用いればもう少し見やすくなって,

$$
A = \left\{ (1 + gm_2 R)^{-1} \left(\frac{rp_1 + R}{rp_2 // R_L} \right) + 1 \right\}^{-1} \mu_1
$$

となります. ここで, $rp_2 // R_L$ は rp_2 と R_L の並列抵抗値 $(1/rp_2 + 1/R_L)^{-1}$ です. 実際に計算す

[2] もし計算に興味が有れば, もう少し詳しい計算が http://www.pp.iij4u.or.jp/~shu-nkmr/SRPP.pdf に書いてあります. 以降の計算についても同様です.

る上では,

$$A=\left\{\frac{(rp_1+R)(rp_2+R_L)}{rp_2R_L(1+gm_2R)}+1\right\}^{-1}\mu_1$$

と書いた方がいいかもしれません．また, E_2 の式は,

$$\begin{aligned}E_2=&\left\{\left(\frac{1}{rp_2}+\frac{1+gm_2R}{rp_1+R}\right)+\frac{1}{R_L}\right\}^{-1}\times\\&\times(1+gm_2R)(rp_1+R)^{-1}\mu_1E_i\end{aligned}$$

と書き変えられますから, これより出力インピーダンスは

$$\begin{aligned}r_o&=\left(\frac{1}{rp_2}+\frac{1+gm_2R}{rp_1+R}\right)^{-1}\\&=rp_2//\left(\frac{rp_1+R}{1+gm_2R}\right)\end{aligned}$$

であることが読みとれます.

もう少し詳しい解析

ここでは, 実際に回路を設計する上で必要なパラメーターを求めてみましょう. T_1 から見た, 見かけ上の負荷抵抗値は

$$\begin{aligned}R_L^{(1)}&=-E_1/I_1\\&=R+(1+gm_2R)\left(\frac{1}{rp_2}+\frac{1}{R_L}\right)^{-1}\\&=R+(1+gm_2R)(rp_2//R_L)\end{aligned}$$

となります. T_2 のひずみのため, この公式は電圧が大きいときには完全には成立せず, T_1 のロードラインは完全に直線にはなりませんが, 目安にはなります.

同様に, T_2 から見た見かけ上の負荷抵抗値は

$$\begin{aligned}R_L^{(2)}&=-E_2/I_2\\&=\left\{\left(\frac{gm_2R}{1+gm_2R}\right)\left(\frac{1}{rp_2}+\frac{1}{R_L}\right)-\frac{1}{rp_2}\right\}^{-1}\end{aligned}$$

と計算できます．これも, やはりひずみのために電圧が大きいときにはずれてきます．奇妙に見えるのは, $R_L^{(2)}$ の符号が負になり得ることで, 特に出力開放 ($R_L=\infty$) の場合は, 必ず負になります. これは間違いではなく, 出力開放時には T_2 はいわゆる「定電流回路」の動作になりますが, 定電流回路のロードラインを実際に書いてみると右上がりの直線[3]になることから, 見かけ上の負荷抵抗値は負であることが分かります. SRPP 回路の場合は, R_L の値を小さくしていって, だんだん負荷を重くすると, ある点で $R_L^{(2)}$ は無限大となり, このとき本当に定電流動作となります. さらに R_L を小さくしていくと負荷抵抗の値は正になり, T_1 と T_2 はプッシュプル動作をするようになります.

ちなみに, このとき T_2 の入力電圧は

$$\begin{aligned}-E_3&=-RI_1\\&=-\{(rp_1+R)+(1+gm_2R)(rp_2//R_L)\}^{-1}\times\\&\quad\times\mu_1RE_i\end{aligned}$$

です.

プッシュプル動作をする場合

T_1 と T_2 は, 完全に対称的な動作をすることはできません. なぜなら, R が存在することにより, $E_1=-E_2$ は起こり得ないからです. しかし, $I_1=-I_2$ は可能で, このときは殆どプッシュプル動作と考えていいだろうと思います. 最初の方程式にこの条件を代入してやると,

$$R=\frac{1}{gm_2}\left(1+\frac{2R_L}{rp_2}\right)$$

が成立するときに限ってこの条件が満たされることが分かります. つまり, 上下の真空管になるべく対称的な動作をさせて, 出力電圧を大きく取りたいときは, カソード抵抗をこの値に近く取ることになります. しかし, 上下の真空管の動作点は多少異なりますし, 2次ひずみの打ち消しが起こるかどうかは, この計算からは分かりません. 最適なカソード抵抗の値 R は, 当然のことですが, 負荷抵抗の値 R_L によって変わることに注意して下さい.

このとき, 見かけ上の負荷抵抗値は $R_L^{(1)}=R+2R_L$, $R_L^{(2)}=2R_L$ と簡単になります. この結果からも, R が R_L よりも十分小さければ, T_1 と T_2 は対称に近い動作をして, 上下の真空管が同じだけの負荷電流を供給していることが分かります. 上

[3] 本当は, これも T_2 のひずみのために, 直線に近い曲線となります.

で述べた解析により, 出力インピーダンスの値は $rp_1 + R$ と rp_2 の並列抵抗値より小さくなります.

T_1 と T_2 が同種の真空管の場合は, T_2 の入力電圧は $(\frac{\mu}{\mu+1})E_i$ と計算できます. ただし, $\mu = \mu_1 = \mu_2$ です.

T_1 が五極管の場合

T_1 が五極管あるいは FET の場合は, 公式は簡単になります. $rp_1 = \infty$ とおいてよいので,

$$E_2 = \left(\frac{1}{rp_2} + \frac{1}{R_L}\right)^{-1} (1 + gm_2 R) gm_1 E_i$$

となります. これより, 出力解放時のゲインは,

$$A_0 = (1 + gm_2 R) gm_1 rp_2,$$

また, 出力インピーダンスは rp_2 となることが読みとれます. T_2 のグリッド電圧は,

$$-E_3 = -gm_1 R E_i$$

です. この回路は木村哲氏によって実験され, T_2 に低 rp の三極管を起用することにより, 高いゲインと低い出力インピーダンスを合わせ持つ増幅回路となる事が知られています[4].

実例

ここでは, 上の公式を幾つかの場合に当てはめてみましょう. どちらも T_1 と T_2 が同じ場合で, 木村哲氏による実験値[5] との比較を念頭に置いています.

1. **12AX7**：$\mu = 100$, $r_p = 60k\Omega$ で概算します. $R_L = 50k\Omega$ でプッシュプル動作をさせるには, $R = 1.6k\Omega$ とすればよいことになります. $R = 1.5k\Omega$, $R_L = 100k\Omega$ で（おおざっぱに）計算すると,

$$A = 59, \qquad r_o = 13.6k\Omega$$

となります. 実験値ともそこそこに合っているようです. 見かけ上の負荷抵抗値は $101.5k\Omega$ と $100k\Omega$ で, 特に重たい動作ではありません. T_1 と T_2 の入力電圧の比は, 101:100 ですから, ほとんど完全にプッシュプル動作をしています.

2. **6FQ7**：$\mu = 20$, $r_p = 7.7k\Omega$, $R = 2.5k\Omega$ とすると, R_L が約 $20k\Omega$ のときプッシュプル動作となります. このとき,

$$A = 16.1, \qquad r_o = 1.16K\Omega$$

です. ずいぶん出力インピーダンスの低い, 強力なドライブ回路になることが分かります. ここでも, 見かけ上の負荷抵抗値は $42.5k\Omega$ と $40k\Omega$ ですから, 決して重たい動作ではなく, 出力電圧は大きく取れるはずです. （残念ながら, 手元に実験値はありません. ）

まとめ

SRPP 回路は, 別に神秘的な回路ではなく, 上で見たように小信号時の動作はきちんと計算できます. ひずみが大きいときの動作はあまり明らかではなく, 偶数次ひずみのほぼ完全な打ち消しを期待できる SEPP よりは, 大信号時のひずみは大きいのではないかと思われます. また, カソード抵抗値 R が負荷抵抗値 R_L に比べて無視できないほど大きい場合（パワー出力段等）では, SRPP は SEPP より明らかに不利です. いっぽう, SRPP の出力インピーダンスは SEPP 回路の出力インピーダンスである $rp_1 // rp_2$ より有意に小さく, この点では明らかに SEPP より優位です. もちろん, 回路構成は SEPP よりずっと簡単ですし, 電圧増幅段, 特にドライバー段では, 負荷抵抗値をかなり小さく取れることと併せて, 極めて有用な回路のように思われます. この小文の解析が読者のみなさんのお役に立てることを願っております.

[4] このため, 一部では「ぺるけドライブ」と呼ばれているようです.

[5] http://home.highway.ne.jp/teddy/tubes/srpprep1.htm