

オートバランス位相反転回路

Ayumi's Lab.

2007年11月15日

Revised 2007年11月17日

目次

1	オートバランス位相反転回路	1
2	等価回路	2
3	ゲインの計算	2
4	両相のバランスを取るための定数	4
5	入力インピーダンス	4
6	出力インピーダンス	5
7	$R_3 \rightarrow \infty$ のとき	5
8	シミュレーション例	5
8.1	R_3 がある回路	5
8.2	R_3 がない回路	7

概要

オートバランス位相反転回路の反転側の正確な利得と、入力インピーダンスを求めました。
また、両相の利得を揃えるための抵抗値の計算方法も示します。

1 オートバランス位相反転回路

オートバランス位相反転回路を、図1に示します。図1(a)の回路は、当初RCAから発表された回路で、通常、 $R_1 = R_2 \leq R_3$ とします。V1にとって、ほぼ R_1 が負荷となるため、この値をあまり小さくすることはできません。出力管にとっては、 $R_1 + 2R_3$ がグリッド抵抗となるので、 R_1 の値を通常のグリッド抵抗の許容値の1/3にしなければなりません。

図1(b)の回路は、後に使われるようになったもので、 R_g として通常のグリッド抵抗を使い、V2への入力としては、比較的高い(1M Ω 程度)の抵抗を使うことによって、前述の問題を回避しています。

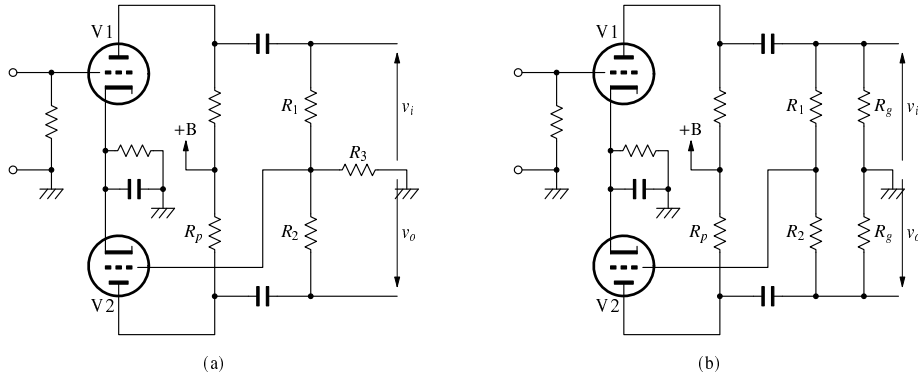


図 1: オートバランス位相反転回路

これらの位相反転回路では、V1 は通常のカソード接地増幅器として動作しています。V2 には、 R_2 を通して、P-G 帰還がかかっています。ここでは、V2 に注目し、その利得を計算することになります。

2 等価回路

これら 2 つの回路の等価回路は、図 2 のように同じ回路で表されます。図 1 (a) の場合、単に

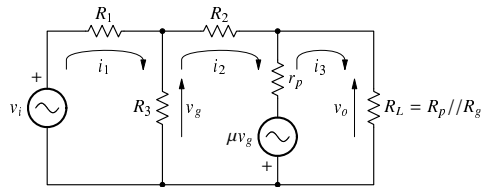


図 2: オートバランス位相反転回路の等価回路

$R_L = R_p$ です。図 1 (b) の場合、 $R_3 = \infty$ とします。

等価回路より、次の関係が成り立ちます。

$$v_i = i_1 R_1 + (i_1 - i_2) R_3 \quad (1)$$

$$v_g = (i_1 - i_2) R_3 \quad (2)$$

$$\mu v_g = (i_2 - i_1) R_3 + i_2 R_2 + (i_2 - i_3) r_p \quad (3)$$

$$\mu v_g = (i_2 - i_3) r_p - i_3 R_L \quad (4)$$

$$v_o = i_3 R_L \quad (5)$$

3 ゲインの計算

式 (1) より、

$$\begin{aligned} v_i &= i_1 (R_1 + R_3) - i_2 R_3 \\ i_1 &= \frac{v_i + i_2 R_3}{R_1 + R_3} \end{aligned} \quad (6)$$

式 (2) を式 (3), (4) に代入して,

$$\begin{aligned}\mu(i_1 - i_2)R_3 &= -i_1R_3 + i_2(r_p + R_2 + R_3) - i_3r_p \\ (1 + \mu)i_1R_3 &= i_2\{r_p + R_2 + (1 + \mu)R_3\} - i_3r_p\end{aligned}\quad (7)$$

$$\begin{aligned}\mu(i_1 - i_2)R_3 &= i_2r_p - i_3(r_p + R_L) \\ \mu i_1R_3 &= i_2(r_p + \mu R_3) - i_3(r_p + R_L)\end{aligned}\quad (8)$$

これらの式に式 (6) を代入して,

$$\begin{aligned}(1 + \mu)\frac{v_i + i_2R_3}{R_1 + R_3}R_3 &= i_2\{r_p + R_2 + (1 + \mu)R_3\} - i_3r_p \\ (1 + \mu)\frac{R_3}{R_1 + R_3}v_i &= i_2\left\{r_p + R_2 + (1 + \mu)\left(1 - \frac{R_3}{R_1 + R_3}\right)R_3\right\} - i_3r_p \\ (1 + \mu)\frac{R_3}{R_1 + R_3}v_i &= i_2\left\{r_p + R_2 + (1 + \mu)\frac{R_1R_3}{R_1 + R_3}\right\} - i_3r_p \\ (1 + \mu)\frac{R_3}{R_1 + R_3}v_i &= i_2\{r_p + R_2 + (1 + \mu)(R_1//R_3)\} - i_3r_p \\ i_2 &= \frac{(1 + \mu)\frac{R_3}{R_1 + R_3}v_i + i_3r_p}{r_p + R_2 + (1 + \mu)(R_1//R_3)}\end{aligned}\quad (9)$$

$$\begin{aligned}\mu\frac{v_i + i_2R_3}{R_1 + R_3}R_3 &= i_2(r_p + \mu R_3) - i_3(r_p + R_L) \\ \mu\frac{R_3}{R_1 + R_3}v_i &= i_2\left\{r_p + \mu\left(1 - \frac{R_3}{R_1 + R_3}\right)R_3\right\} - i_3(r_p + R_L) \\ \mu\frac{R_3}{R_1 + R_3}v_i &= i_2\left\{r_p + \mu\frac{R_1}{R_1 + R_3}R_3\right\} - i_3(r_p + R_L) \\ \mu\frac{R_3}{R_1 + R_3}v_i &= i_2\{r_p + \mu(R_1//R_3)\} - i_3(r_p + R_L)\end{aligned}\quad (10)$$

式 (9) を式 (10) に代入して,

$$\begin{aligned}\mu\frac{R_3}{R_1 + R_3}v_i &= \frac{(1 + \mu)\frac{R_3}{R_1 + R_3}v_i + i_3r_p}{r_p + R_2 + (1 + \mu)(R_1//R_3)}\{r_p + \mu(R_1//R_3)\} - i_3(r_p + R_L) \\ \mu\frac{R_3}{R_1 + R_3}v_i &= \frac{r_p + \mu(R_1//R_3)}{r_p + R_2 + (1 + \mu)(R_1//R_3)}\left\{(1 + \mu)\frac{R_3}{R_1 + R_3}v_i + i_3r_p\right\} - i_3(r_p + R_L)\end{aligned}$$

$x = \frac{r_p + \mu(R_1//R_3)}{r_p + R_2 + (1 + \mu)(R_1//R_3)}$ とおくと,

$$\begin{aligned}\mu\frac{R_3}{R_1 + R_3}v_i &= x\left\{(1 + \mu)\frac{R_3}{R_1 + R_3}v_i + i_3r_p\right\} - i_3(r_p + R_L) \\ i_3\{(1 - x)r_p + R_L\} &= -\{\mu - x(1 + \mu)\}\frac{R_3}{R_1 + R_3}v_i \\ i_3 &= -\frac{\{\mu - x(1 + \mu)\}\frac{R_3}{R_1 + R_3}}{(1 - x)r_p + R_L}v_i \\ i_3 &= -\frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot \frac{\mu - x(1 + \mu)}{(1 - x)r_p + R_L}v_i\end{aligned}\quad (11)$$

したがって,

$$v_o = i_3R_L = -\frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot \frac{\{\mu - x(1 + \mu)\}R_L}{(1 - x)r_p + R_L}v_i\quad (12)$$

$$A = -\frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot \frac{\{\mu - x(1 + \mu)\}R_L}{(1 - x)r_p + R_L}\quad (13)$$

4 両相のバランスを取るための定数

両相のバランスを取るためには、式(13)の値が -1 となるような定数を用いればよいのです。したがって、両相のバランスがとれる x の値を x^* とすれば、

$$\begin{aligned}
 (1-x^*)r_p + R_L &= \frac{R_3}{R_1+R_3}\{\mu-x^*(1+\mu)\}R_L \\
 r_p + R_L - r_p x^* &= \mu \frac{R_3}{R_1+R_3} R_L - (1+\mu) \frac{R_3}{R_1+R_3} R_L x^* \\
 \left\{ (1+\mu) \frac{R_3}{R_1+R_3} R_L - r_p \right\} x^* &= \mu \frac{R_3}{R_1+R_3} R_L - R_L - r_p \\
 x^* &= \frac{(\mu \frac{R_3}{R_1+R_3} - 1)R_L - r_p}{(1+\mu) \frac{R_3}{R_1+R_3} R_L - r_p} \tag{14}
 \end{aligned}$$

両相のバランスがとれる R_2 の値を R_2^* とすれば、

$$\begin{aligned}
 x^* &= \frac{r_p + \mu(R_1//R_3)}{r_p + R_2^* + (1+\mu)(R_1//R_3)} \\
 \{r_p + R_2^* + (1+\mu)(R_1//R_3)\}x^* &= r_p + \mu(R_1//R_3) \\
 x(1+\mu)(R_1//R_3)\}x^* R_2^* &= (1-x^*)r_p + \{\mu-x(1+\mu)\}(R_1//R_3) \\
 R_2^* &= \left(\frac{1}{x^*} - 1\right)r_p + \left\{\left(\frac{1}{x^*} - 1\right)\mu - 1\right\}(R_1//R_3) \\
 &= \left(\frac{1}{x^*} - 1\right)\{r_p + \mu(R_1//R_3)\} - (R_1//R_3) \tag{15}
 \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{x^*} - 1 &= \frac{(1+\mu) \frac{R_3}{R_1+R_3} R_L - r_p}{(\mu \frac{R_3}{R_1+R_3} - 1)R_L - r_p} - 1 \\
 &= \frac{(1+\mu) \frac{R_3}{R_1+R_3} R_L - r_p - \mu \frac{R_3}{R_1+R_3} R_L + R_L + r_p}{(\mu \frac{R_3}{R_1+R_3} - 1)R_L - r_p} \\
 &= \frac{(1 + \frac{R_3}{R_1+R_3})R_L}{(\mu \frac{R_3}{R_1+R_3} - 1)R_L - r_p}
 \end{aligned}$$

より、

$$R_2^* = \frac{(1 + \frac{R_3}{R_1+R_3})R_L\{r_p + \mu(R_1//R_3)\}}{(\mu \frac{R_3}{R_1+R_3} - 1)R_L - r_p} - (R_1//R_3) \tag{16}$$

5 入力インピーダンス

重ねの理より、

$$\begin{aligned}
 v_g &= \frac{R_2//R_3}{R_1 + R_2//R_3} v_i + \frac{R_1//R_3}{R_2 + R_1//R_3} v_o \\
 &= \frac{R_2//R_3}{R_1 + R_2//R_3} v_i + \frac{R_1//R_3}{R_2 + R_1//R_3} A v_i \\
 i_1 &= \frac{v_i - v_g}{R_1} = \frac{1 - \frac{R_2//R_3}{R_1+R_2//R_3} - \frac{R_1//R_3}{R_2+R_1//R_3} A}{R_1} v_i \\
 Z_i &= \frac{v_i}{i_1} = \frac{R_1}{1 - \frac{R_2//R_3}{R_1+R_2//R_3} - \frac{R_1//R_3}{R_2+R_1//R_3} A} \tag{17}
 \end{aligned}$$

6 出力インピーダンス

出力から見て、グラウンドに電流が流れる経路は、 $R_2 + R_1 // R_3$, R_L , 真空管の3つがあります。出力に加える電圧を v 、真空管に流れる電流を i とすれば、 R_2 と $R_1 // R_3$ によって分圧されたものが真空管のグリッドに加わるので、

$$\begin{aligned} v + \mu \frac{R_1 // R_3}{R_2 + R_1 // R_3} v &= i r_p \\ i &= \frac{1 + \mu \frac{R_1 // R_3}{R_2 + R_1 // R_3}}{r_p} e \end{aligned}$$

これより、真空管部分のインピーダンス Z'_o は、

$$Z'_o = \frac{v}{i} = \frac{r_p}{1 + \mu \frac{R_1 // R_3}{R_2 + R_1 // R_3}} \quad (18)$$

したがって、回路全体の出力インピーダンス Z_o は、

$$Z_o = (R_2 + R_1 // R_3) // R_L // \frac{r_p}{1 + \mu \frac{R_1 // R_3}{R_2 + R_1 // R_3}} \quad (19)$$

となります。

7 $R_3 \rightarrow \infty$ のとき

ゲイン [式 (13)]、両相のバランスを取る抵抗 R_2^* [式 (16)]、入力インピーダンス [式 (17)] 等は、以下ようになります。

$$x = \frac{r_p + \mu R_1}{r_p + R_2 + (1 + \mu)R_1} \quad (20)$$

$$A = \frac{\{\mu - x(1 + \mu)\}R_L}{(1 - x)r_p + R_L} \quad (21)$$

$$R_2^* = \frac{2R_L(r_p + \mu R_1)}{(\mu - 1)R_L - r_p} - R_1 \quad (22)$$

$$\begin{aligned} Z_i &= \frac{R_1}{1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_1}{R_2 + R_1} A} \\ &= \frac{R_1 + R_2}{1 - A} \end{aligned} \quad (23)$$

$$Z_o = (R_1 + R_2) // R_L // \frac{r_p}{1 + \mu \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \quad (24)$$

8 シミュレーション例

8.1 R_3 がある回路

シミュレーションの回路図は、図 3 のようになります。Vo と Vg の周波数特性は、図 4 のようになり、ゲインは 0.8829 となります。入力インピーダンスの周波数特性は、図 5 のようになり、 $Z_i = 260.2 \text{ k}\Omega$ となります。出力インピーダンスの周波数特性は、図 6 のようになり、 $Z_o = 2.588 \text{ k}\Omega$ となります。

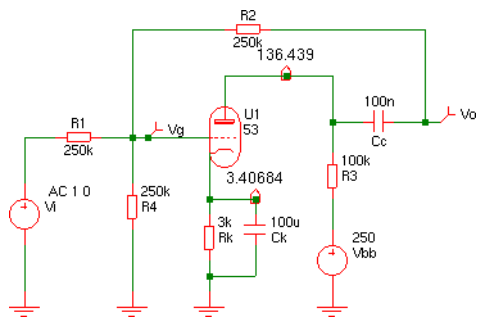


図 3: シミュレーション回路 1

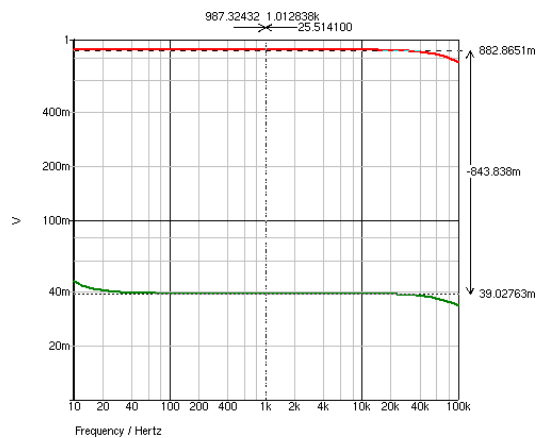


図 4: ゲインの周波数特性 1

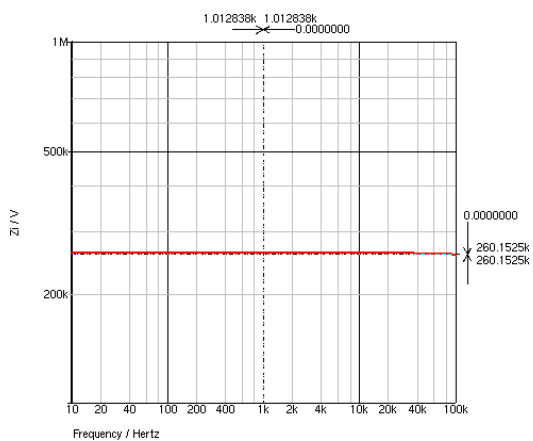


図 5: 入力インピーダンスの周波数特性 1

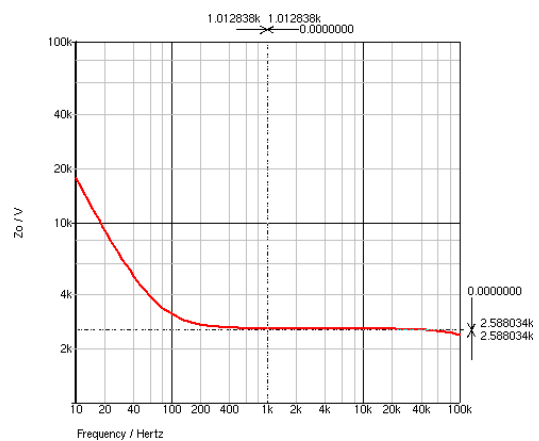


図 6: 出力インピーダンスの周波数特性 1

この回路の動作条件および三定数は，

$$\begin{aligned} E_{p0} &= 133.0312 \text{ V} & \mu &= 32.80366 \\ E_{g0} &= -3.406857 \text{ V} & r_p &= 31.74775 \text{ k}\Omega \\ I_{p0} &= 1.135619 \text{ mA} & g_m &= 1.033259 \text{ mS} \end{aligned}$$

で，

$$\begin{aligned} x &= \frac{r_p + \mu(R_1//R_3)}{r_p + R_2 + (1 + \mu)(R_1//R_3)} \\ &= \frac{31.74775 + 32.80366(250//250)}{31.74775 + 250 + (1 + 32.80366)(250//250)} = 0.9168 \\ A &= -\frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot \frac{\{\mu - x(1 + \mu)\}R_L}{(1 - x)r_p + R_L} \\ &= -\frac{250}{250 + 250} \cdot \frac{\{32.80366 - 0.9168(1 + 32.80366)\}100}{(1 - 0.9168)31.74475 + 100} = -0.8829 \\ x^* &= \frac{(\mu \frac{R_3}{R_1 + R_3} - 1)R_L - r_p}{(1 + \mu)\frac{R_3}{R_1 + R_3}R_L - r_p} \\ &= \frac{(32.80366 \frac{250}{250+250} - 1)100 - 31.74775}{(1 + 32.80366)\frac{250}{250+250}100 - 31.74775} = 0.90955 \\ R_2^* &= \frac{(1 + \frac{R_3}{R_1 + R_3})R_L\{r_p + \mu(R_1//R_3)\}}{(\mu \frac{R_3}{R_1 + R_3} - 1)R_L - r_p} - (R_1//R_3) \\ &= \frac{(1 + \frac{250}{250+250})100\{31.74775 + 32.80366(250//250)\}}{(32.80366 \frac{250}{250+250} - 1)100 - 31.74775} - (250//250) \\ &= 285.9 \text{ [k}\Omega] \\ Z_i &= \frac{R_1}{1 - \frac{R_2//R_3}{R_1 + R_2//R_3} - \frac{R_1//R_3}{R_2 + R_1//R_3}A} \\ &= \frac{250}{1 - \frac{250//250}{250+250//250} + \frac{250//250}{250+250//250}0.8829} = 260.2 \text{ [k}\Omega] \\ Z_o &= (R_2 + R_1//R_3)//R_L//\frac{r_p}{1 + \mu \frac{R_1//R_3}{R_2 + R_1//R_3}} \\ &= (250 + 125)//100//\frac{31.74775}{1 + 32.80366 \frac{125}{250+125}} = 2.573 \text{ [k}\Omega] \end{aligned}$$

8.2 R_3 がない回路

シミュレーションの回路図は，図 7 のようになります． V_o と V_g の周波数特性は，図 8 のようになり，ゲインは 0.9202 となります．入力インピーダンスの周波数特性は，図 9 のようになり， $Z_i = 1041 \text{ k}\Omega$ となります．出力インピーダンスの周波数特性は，図 10 のようになり， $Z_o = 1.824 \text{ k}\Omega$ となります． $R_L = R_p//R_g = 100//500 = 83.333 \text{ k}\Omega$ です．

$$\begin{aligned} x &= \frac{r_p + \mu R_1}{r_p + R_2 + (1 + \mu)R_1} \\ &= \frac{31.74775 + 32.80366 \times 1000}{31.74775 + 1000 + (1 + 32.80366)1000} = 0.94259 \\ A &= -\frac{\{\mu - x(1 + \mu)\}R_L}{(1 - x)r_p + R_L} \end{aligned}$$

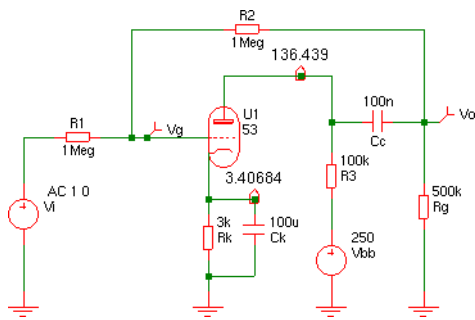


図 7: シミュレーション回路 2

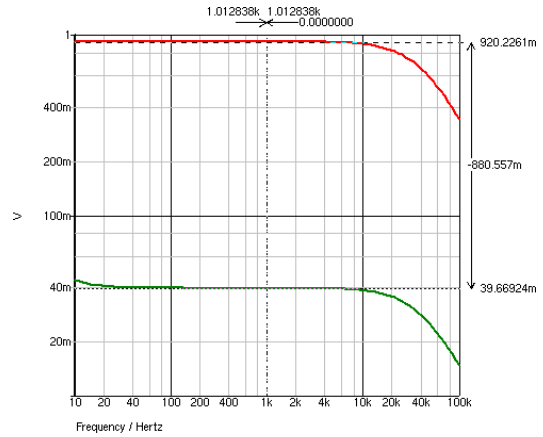


図 8: ゲインの周波数特性 2

$$= -\frac{\{32.80366 - 0.94259(1 + 32.80366)\}83.333}{(1 - 0.94259)31.74775 + 83.333} = -0.9206$$

$$R_2^* = \frac{2R_L(r_p + \mu R_1)}{(\mu - 1)R_L - r_p} - R_1$$

$$= \frac{2 \times 83.333(31.74775 + 32.80366 \times 1000)}{(32.80366 - 1)83.333 - 31.74775} - 1000 = 1090 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

$$Z_i = \frac{R_1 + R_2}{1 - A} = \frac{1000 + 1000}{1 + 0.9206} = 1041 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

$$Z_o = (R_1 + R_2) // R_L // \frac{r_p}{1 + \mu \frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

$$= (1000 + 1000) // 83.333 // \frac{31.74775}{1 + 32.80366 \frac{1000}{1000 + 1000}} = 1.783 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

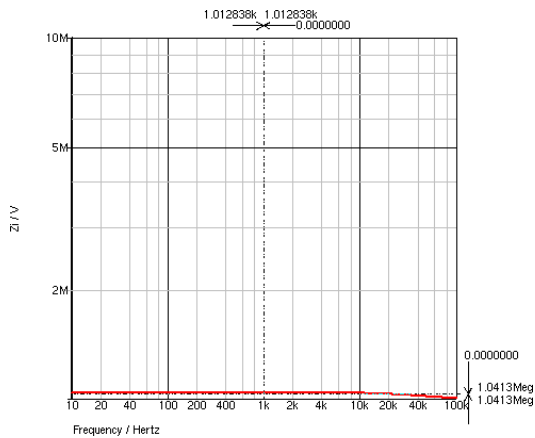


図 9: 入力インピーダンスの周波数特性 2

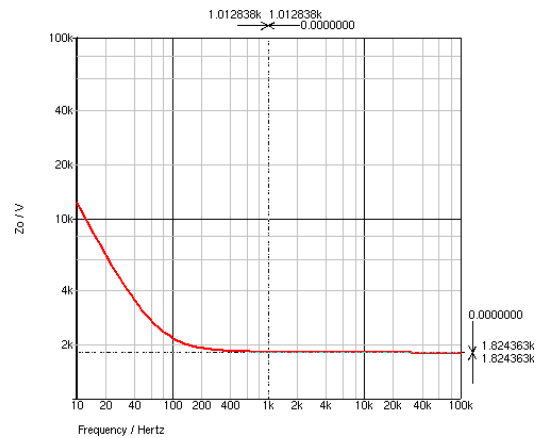


図 10: 出力インピーダンスの周波数特性 2