Baxandall tone control 回路をエクセルでシミュレーションする（1C バージョン）

1)回路図

図-1 は低音用(Bass)、高音用(Treble)にそれぞれ一つのコンデンサを用いた方式の Baxandall トーンコントロール回路です。

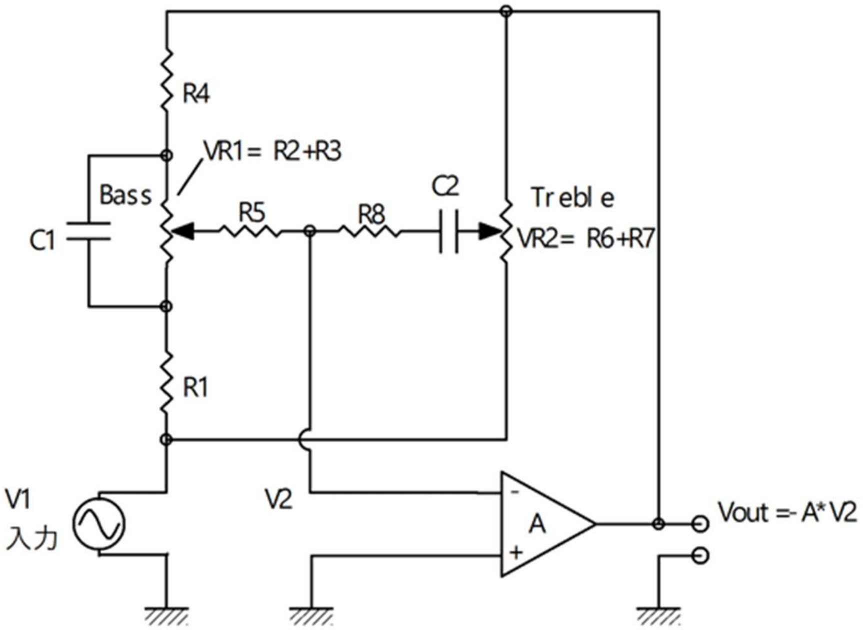

図-1

2)回路図を変形しインピーダンスのブロックに分ける

計算のために図-1 の CR 回路の部分を抜き出して表現を変えたのが図-2 です。

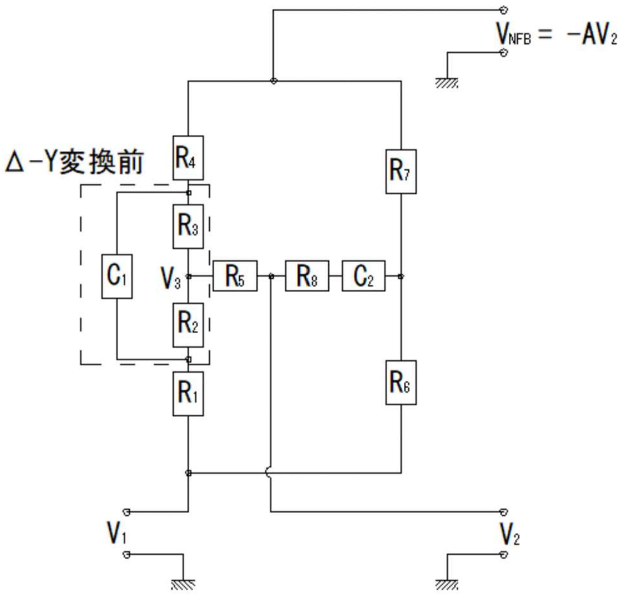

図-2

この回路図では、帰還回路のインピーダンスの計算が難しいため、図-2 の破線で囲んだ部分にΔ-Y変換を適用して回路を変形します。(図-3) この変形の結果、図-4 のように回路の要素を分割することができます。

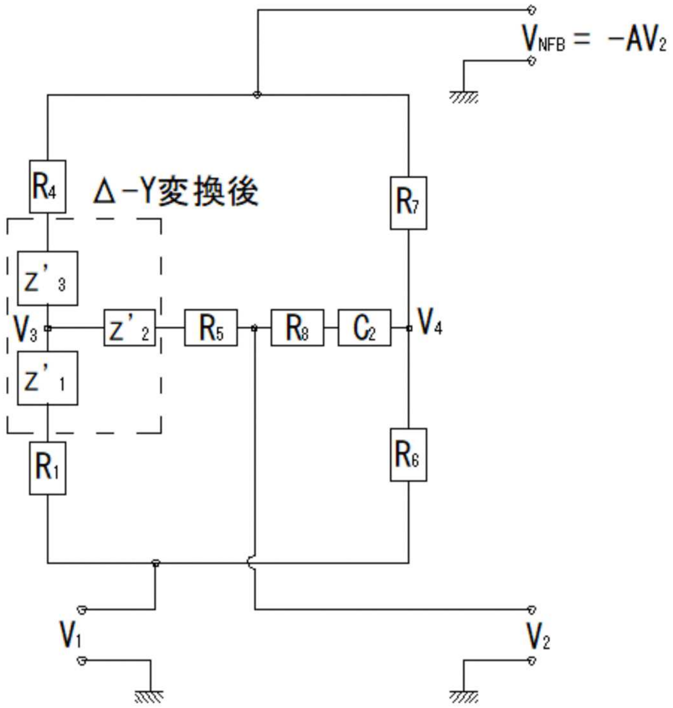

図-3

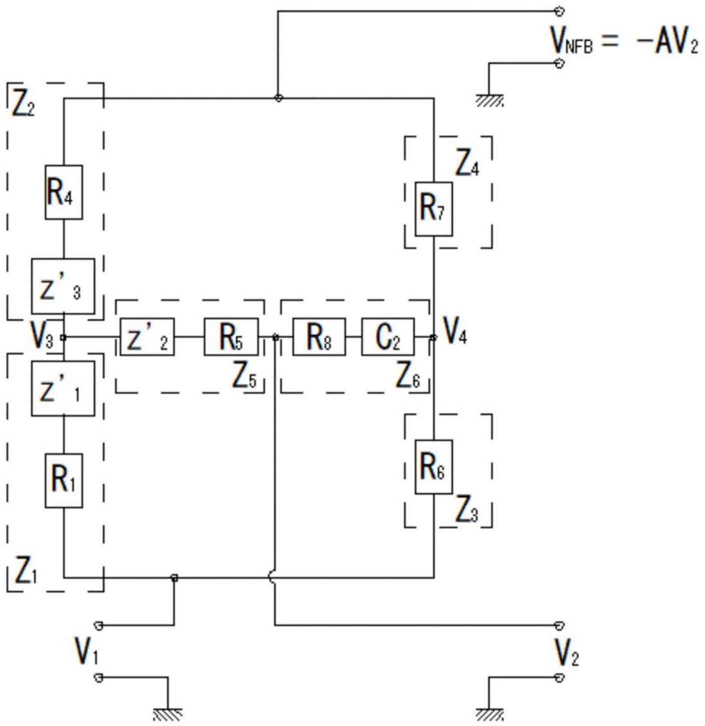

図-4

図-4 の回路を大きくまとめて、Z1 から Z6 に分けて計算を行います。
まず、z'1 z'2 z'3 を算出します。

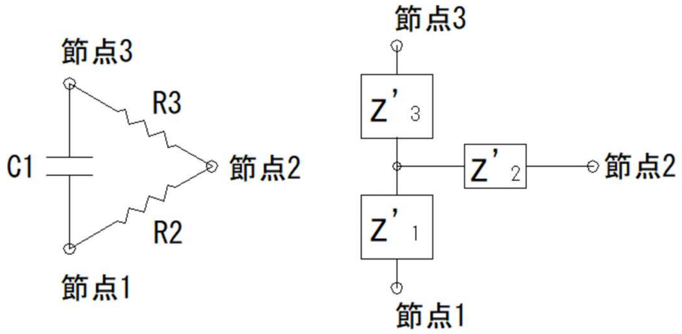

図-5

Δ-Y 変換の公式により

$$z'_1 = \frac{R_2 \frac{1}{j\omega C_1}}{R_2 + R_3 + \frac{1}{j\omega C_1}}$$

$$z'_2 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3 + \frac{1}{j\omega C_1}}$$

$$z'_3 = \frac{R_3 \frac{1}{j\omega C_1}}{R_2 + R_3 + \frac{1}{j\omega C_1}}$$

従って、

$$Z_1 = z'_1 + R_1$$

$$Z_2 = z'_3 + R_4$$

$$Z_3 = R_6$$

$$Z_4 = R_7$$

$$Z_5 = z'_2 + R_5$$

$$Z_6 = \frac{1}{j\omega C_2} + R_8$$

以下では計算を簡単にするために、Z（インピーダンス）の代わりにその逆数であるY（アドミタンス）を用います。

$$Y_1 = \frac{1}{Z_1}\ ,\ Y_2 = \frac{1}{Z_2}\ ,\ Y_3 = \frac{1}{Z_3}\ ,\ Y_4 = \frac{1}{Z_4}\ ,\ Y_5 = \frac{1}{Z_5}\ ,\ Y_6 = \frac{1}{Z_6}$$

3)トーンコントロール回路のゲインを求めるために$\boldsymbol{V_1}$と$\boldsymbol{V_{out}}$の関係を式に表す。

図-1 をアドミタンスの表記したのが図-6 です。各部の電流に着目しキルヒホッフの電流則を P,Q,R の各節点について適用することで、回路の方程式をたてます。

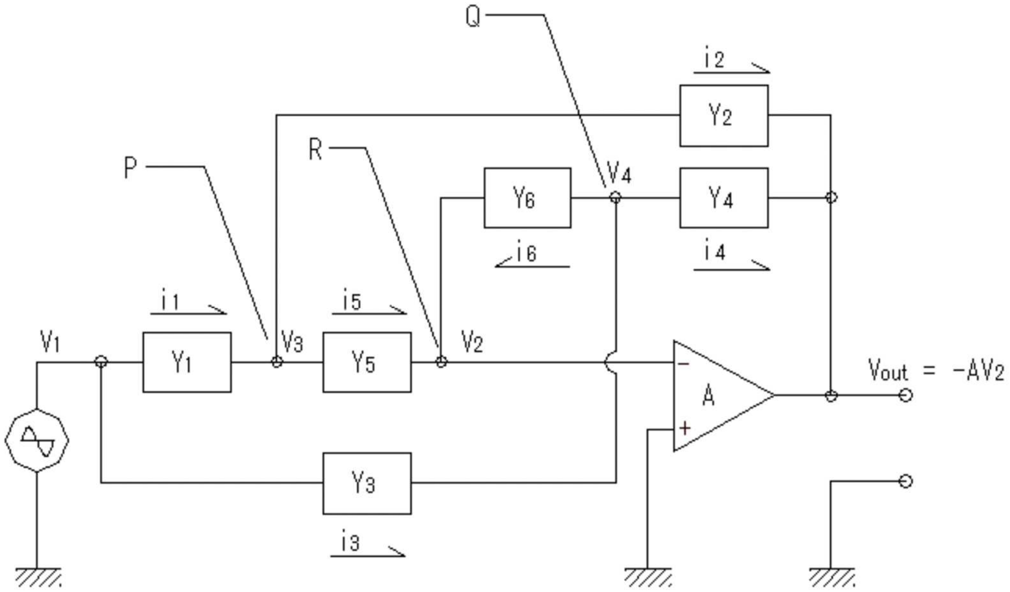

図-6

$i_1 = Y_1(V_1 - V_3)$ ・・・①

$i_2 = Y_2(V_3 - (-AV_2)) = Y_2(V_3 + AV_2)$ ・・・②

$i_3 = Y_3(V_1 - V_4)$ ・・・③

$i_4 = Y_4(V_4 - (-AV_2)) = Y_4(V_4 + AV_2)$ ・・・④

$i_5 = Y_5(V_3 - V_2)$ ・・・⑤

$i_6 = Y_6(V_4 - V_2)$ ・・・⑥

節点 P について、キルヒホッフの電流則を適用

i_1-i_2-$i_5 = 0$ ・・・⑦

同様に節点 Q について、キルヒホッフの電流則を適用

i_3-i_4-$i_6 = 0$ ・・・⑧

同様に節点 R について、キルヒホッフの電流則を適用

$$i_5+i_6=0 \qquad ・・・⑨$$

未知数がi_1からi_6とV_2, V_3, V_4 の合計 9 個ですので上記の九つの式から解を得られるはずです。

⑦に①②⑤を代入する

$$Y_1(V_1-V_3)-Y_2(V_3+AV_2)-Y_5(V_3-V_2)=0 \quad ・・・⑩$$

⑧に③④⑥を代入

$$Y_3(V_1-V_4)-Y_4(V_4+AV_2)-Y_6(V_4-V_2)=0 \quad ・・・⑪$$

⑨に⑤⑥を代入

$$Y_5(V_3-V_2)+\ Y_6(V_4-V_2)=0 \quad ・・・⑫$$

⑫を変形

$$Y_5V_3-Y_5V_2+Y_6V_4-Y_6V_2=0$$

$$Y_6V_4=Y_6V_2+Y_5V_2-Y_5V_3$$

$$V_4=\frac{Y_6V_2+Y_5V_2-Y_5V_3}{Y_6}$$

$$V_4=\frac{(Y_5+Y_6)V_2-Y_5V_3}{Y_6} \quad ・・・⑬$$

⑩を変形

$$Y_1(V_1-V_3)-Y_2(V_3+AV_2)-Y_5(V_3-V_2)=0$$

$$Y_1V_1-Y_1V_3-Y_2V_3-AY_2V_2-Y_5V_3+Y_5V_2=0$$

$$Y_1V_1+(-AY_2+Y_5)V_2-(Y_1+Y_2+Y_5)V_3=0$$

$$V_3=\frac{Y_1V_1+(-AY_2+Y_5)V_2}{Y_1+Y_2+Y_5} \quad ・・・⑭$$

⑪を変形

$$Y_3(V_1-V_4)-Y_4(V_4+AV_2)-Y_6(V_4-V_2)=0$$

$$Y_3V_1-AY_4V_2+Y_6V_2-Y_3V_4-Y_4V_4-Y_6V_4=0$$

$$Y_3V_1+(-AY_4+Y_6)V_2-(Y_3+Y_4+Y_6)V_4=0$$

$$V_4=\frac{Y_3V_1+(-AY_4+Y_6)V_2}{Y_3+Y_4+Y_6}\quad\cdot\cdot\cdot ⑮$$

⑮に⑬を代入してV_4を消去

$$\frac{(Y_5+Y_6)V_2-Y_5V_3}{Y_6}=\frac{Y_3V_1+(-AY_4+Y_6)V_2}{Y_3+Y_4+Y_6}$$

$$\frac{Y_5+Y_6}{Y_6}V_2-\frac{Y_5}{Y_6}V_3=\frac{Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}V_1+\frac{-AY_4+Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}V_2$$

$$\frac{Y_5}{Y_6}V_3=\frac{-Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}V_1+\frac{Y_5+Y_6}{Y_6}V_2-\frac{-AY_4+Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}V_2$$

$$V_3=\frac{Y_6}{Y_5}\left\{\frac{-Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}V_1+\left(\frac{Y_5+Y_6}{Y_6}-\frac{-AY_4+Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}\right)V_2\right\}\quad\cdot\cdot\cdot ⑯$$

⑯に⑭を代入してV_3を消去

$$\frac{Y_1V_1+(-AY_2+Y_5)V_2}{Y_1+Y_2+Y_5}=\frac{Y_6}{Y_5}\left\{\frac{-Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}V_1+\left(\frac{Y_5+Y_6}{Y_6}+\frac{AY_4-Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}\right)V_2\right\}$$

$$\frac{Y_1V_1+(-AY_2+Y_5)V_2}{Y_1+Y_2+Y_5}+\frac{Y_6}{Y_5}\frac{Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}V_1-\frac{Y_6}{Y_5}\left(\frac{Y_5+Y_6}{Y_6}+\frac{AY_4-Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}\right)V_2=0$$

$$\frac{Y_1}{Y_1+Y_2+Y_5}V_1+\frac{-AY_2+Y_5}{Y_1+Y_2+Y_5}V_2+\frac{Y_6}{Y_5}\frac{Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}V_1-\frac{Y_6}{Y_5}\left(\frac{Y_5+Y_6}{Y_6}+\frac{AY_4-Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}\right)V_2=0$$

$$\left(\frac{Y_1}{Y_1+Y_2+Y_5}+\frac{Y_6}{Y_5}\frac{Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}\right)V_1+\left(\frac{-AY_2+Y_5}{Y_1+Y_2+Y_5}-\frac{Y_6}{Y_5}\frac{Y_5+Y_6}{Y_6}+\frac{Y_6}{Y_5}\frac{AY_4-Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}\right)V_2=0$$

$$\left(\frac{Y_1}{Y_1+Y_2+Y_5}+\frac{Y_6}{Y_5}\frac{Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}\right)V_1+\left(\frac{-AY_2+Y_5}{Y_1+Y_2+Y_5}-\frac{Y_5+Y_6}{Y_5}-\frac{Y_6}{Y_5}\frac{AY_4-Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}\right)V_2=0$$

$$\left(\frac{Y_1}{Y_1+Y_2+Y_5}+\frac{Y_6}{Y_5}\frac{Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}\right)V_1=\left(\frac{AY_2-Y_5}{Y_1+Y_2+Y_5}+1+\frac{Y_6}{Y_5}+\frac{Y_6}{Y_5}\frac{AY_4-Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}\right)V_2$$

$$V_2=\frac{\frac{Y_1}{Y_1+Y_2+Y_5}+\frac{Y_6}{Y_5}\frac{Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}}{1+\frac{Y_6}{Y_5}+\frac{AY_2-Y_5}{Y_1+Y_2+Y_5}+\frac{Y_6}{Y_5}\frac{AY_4-Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}}V_1\quad\cdot\cdot\cdot ⑰$$

出力電圧は-AV_2ですので、Vout は以下の式で得られます。

$$V_{out}=-A\frac{\frac{Y_1}{Y_1+Y_2+Y_5}+\frac{Y_6}{Y_5}\frac{Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}}{1+\frac{Y_6}{Y_5}+\frac{AY_2-Y_5}{Y_1+Y_2+Y_5}+\frac{Y_6}{Y_5}\frac{AY_4-Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}}V_1\quad\cdot\cdot\cdot ⑱$$

従ってトーンコントロール回路のゲイン G は以下の式で得られます。

$$G=\left|\frac{V_{out}}{V_1}\right|=\left|-A\frac{\frac{Y_1}{Y_1+Y_2+Y_5}+\frac{Y_6}{Y_5}\frac{Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}}{1+\frac{Y_6}{Y_5}+\frac{AY_2-Y_5}{Y_1+Y_2+Y_5}+\frac{Y_6}{Y_5}\frac{AY_4-Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}}\right| \quad ・・・⑲$$

4)入力インピーダンスを求める

入力インピーダンスZ_{in}は、入力電圧を入力電流で割ればよいので、次の式で求められます。

$Z_{in}=\frac{V_1}{i_1+i_3}$ $\quad |Z_{in}|=\left|\frac{V_1}{i_1+i_3}\right|$

① ③より

$i_1= Y_1(V_1-V_3)$ $\quad i_3=Y_3(V_1-V_4)$

V_{out}計算する過程でV_3, V_4は、すでに得られているので、これらを代入することによりエクセルを用いて容易に Zin を算出することができます。

5)トーンコントロール回路を負荷としてみた場合のインピーダンスZ_Lを求める

図-7 に示すように、オペアンプの出力から見た場合、トーンコントロール回路の抵抗やコンデンサは負荷となります。オペアンプであればあまり問題にならないかもしれませんが、真空管回路での応用を考慮すると負荷としてのインピーダンスが低いと動作に問題が生じる恐れがあります。

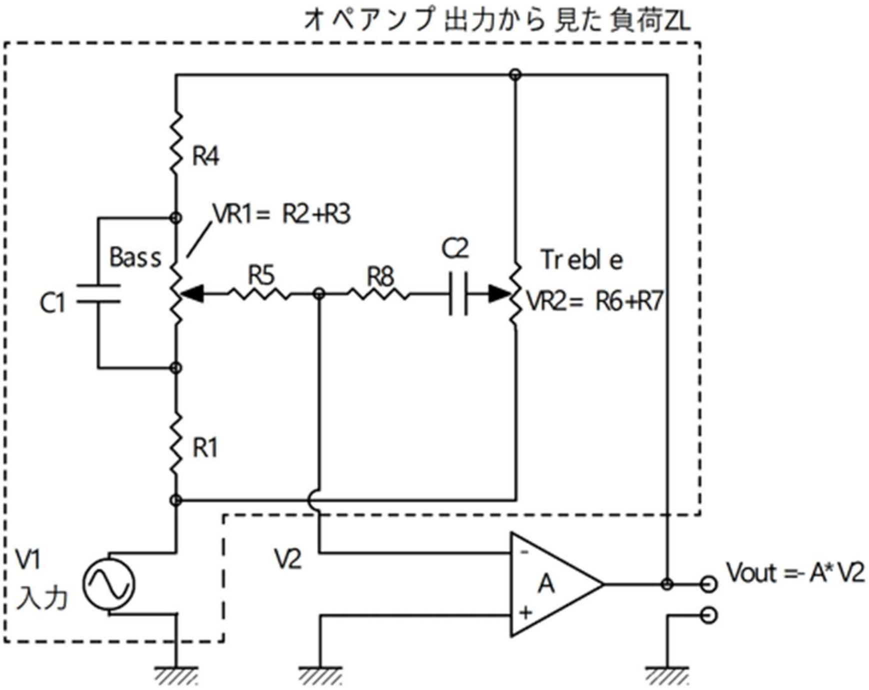

図-7

トーンコントロール回路の負荷としてのインピーダンをZ_Lとおくと、Z_Lは次の式で求められます。

$Z_L = \frac{V_{out}}{i_2 + i_4}$　$|Z_L| = \left|\frac{V_{out}}{i_2 + i_4}\right|$

② ④より

$i_2 = Y_2(V_3 + AV_2)$　　$i_4 = Y_4(V_4 + AV_2)$

Zin と同様に、V_{out}計算する過程でV_2, V_3, V_4はすでに得られているので、これらを代入することによりエクセルを用いて容易に ZL を算出することができます。

6）まとめ

以上のように入力信号の周波数、抵抗とコンデンサの値、増幅回路のオープンゲインを設定すれば計算結果として Baxandall トーンコントロール回路の出力電圧、入力インピーダンスZ_{in}、増幅器の出力側からトーンコントロール回路を負荷として見た場合のインピーダンスZ_Lを得ることができます。周波数ごとに値を得ることができるので、エクセルで 1 行ごとに周波数を変化させて計算すれば、周波数の変化による各種の値の変化を見ることができます。なお、上記の計算式は複素数を扱っているので、エクセルで計算する場合は、複素数の加減乗除の関数を使用する必要があります。

元のページ

https://www.itoharu-tube.com/bax/bax1.html