Excel 用いた CR 型トーンコントロールのシミュレーション

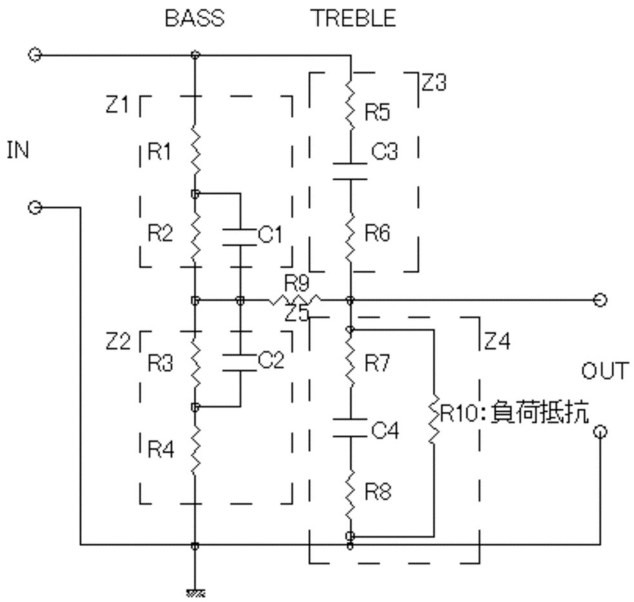


図 1

図 1 の形式の回路について計算する。

回路を Z1 から Z5 までの要素に分け、入力電圧の周波数と出力電圧との関係を調べる。

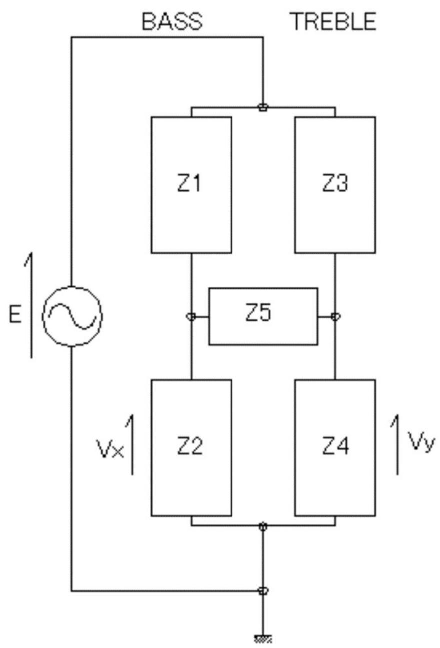


図 2

図２の回路をインピーダンスＺでの表記からアドミタンスＹの表記に書き換える

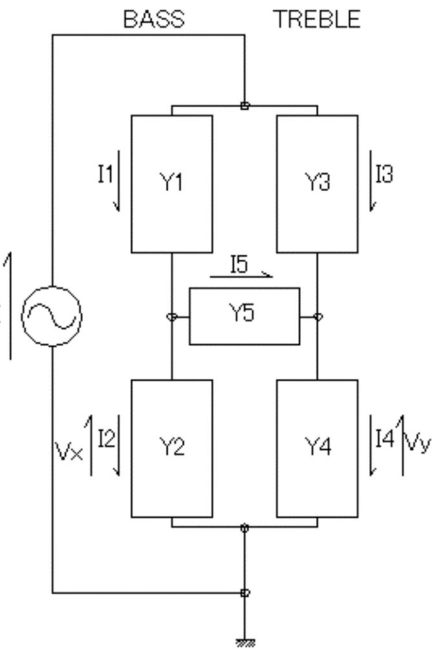


図３

図３の回路について、Y5 の両端についてキルヒホッフの法則により次の式が成り立つ

$I_1 - I_2 - I_5 = 0$・・・①

$I_3 - I_4 + I_5 = 0$・・・②

ここで、$I_1 = Y_1(E - V_x)$　$I_2 = Y_2V_x$　$I_3 = Y_3(E - V_y)$　$I_4 = Y_4V_y$　$I_5 = Y_5(V_x - V_y)$

これらを①と②に代入すると

$Y_1(E - V_x) - Y_2V_x - Y_5(V_x - V_y) = 0$

$Y_3(E - V_y) - Y_4V_y + Y_5(V_x - V_y) = 0$

未知数はV_xとV_yであるので、わかりやすく変形すると

$(Y_1 + Y_2 + Y_5)V_x - Y_5V_y = Y_1E$

$-Y_5V_x + (Y_3 + Y_4 + Y_5)V_y = Y_3E$

式を簡単にするために、$Y_1 + Y_2 + Y_5 = A$　$Y_3 + Y_4 + Y_5 = B$ とおくと、上式は

$AV_x - Y_5V_y = Y_1E$

$-Y_5V_x + BV_y = Y_3E$

これを行列で表記すると

$$\begin{pmatrix} A & -Y_5 \\ -Y_5 & B \end{pmatrix}\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} Y_1E \\ Y_3E \end{pmatrix}$$

$\begin{pmatrix} A & -Y_5 \\ -Y_5 & B \end{pmatrix}$の逆行列は$\frac{1}{AB-{Y_5}^2}\begin{pmatrix} B & Y_5 \\ Y_5 & A \end{pmatrix}$

従って

$$\frac{1}{AB-{Y_5}^2}\begin{pmatrix} B & Y_5 \\ Y_5 & A \end{pmatrix}\begin{pmatrix} Y_1V \\ Y_3V \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \end{pmatrix}$$

以上より

$$V_x = \frac{BY_1+Y_3Y_5}{AB-{Y_5}^2}E\cdot\cdot\cdot③$$

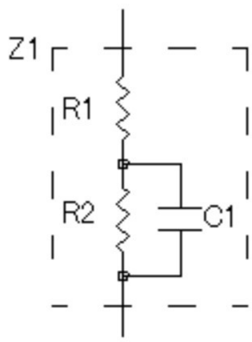
$$V_y = \frac{Y_1Y_5+AY_3}{AB-{Y_5}^2}E\cdot\cdot\cdot④$$

ただし、$Y_1+Y_2+Y_5=A \quad Y_3+Y_4+Y_5=B$

が得られる。

V_x, V_yを求める式が得られたので、実際の回路の R,C の値からY_1～Y_5を及び A.B を求める。

1)Y_1を求める



$$Y_1 = \frac{1}{Z_1}$$

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2}+\frac{1}{\frac{j}{\omega C_1}}}$$

$$= R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2}+\frac{\omega C_1}{j}} = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2}-j\omega C_1}$$

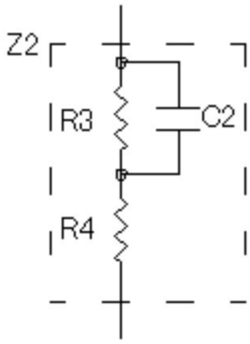
$$= R_1 + \frac{1}{\frac{1-j\omega C_1}{R_2}} = R_1 + \frac{R_2}{1-j\omega C_1R_2}$$

$$= R_1 + \frac{R_2}{1-j\omega C_1R_2} = R_1 + \frac{R_2(1+j\omega C_1R_2)}{1+(\omega C_1R_2)^2}$$

$$Z_1 = R_1 + \frac{R_2}{1+(\omega C_1 R_2)^2} + j\frac{\omega C_1 {R_2}^2}{1+(\omega C_1 R_2)^2}$$

2）Y_2を求める

$$Y_2 = \frac{1}{Z_2}$$



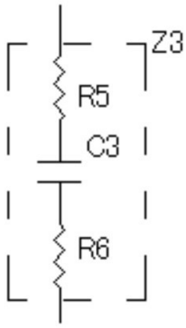
Z_1と同様に

$$Z_2 = R_4 + \frac{R_3}{1+(\omega C_2 R_3)^2} + j\frac{\omega C_2 {R_3}^2}{1+(\omega C_2 R_3)^2}$$

３）Y_3を求める

$$Y_3 = \frac{1}{Z_3}$$

$$Z_3 = R_5 + R_6 + j\frac{1}{\omega C_3}$$



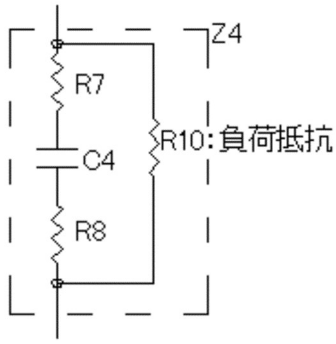
4)Y_4を求める

Y_4については、負荷抵抗R_{10}が並列につながるので、

R_7とC_4とR_8　の直列接続のアドミタンスとR_{10}の

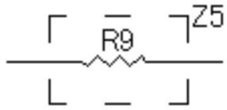
アドミタンスを足し算してY_4を求めるのが簡単

$$Y_4 = \frac{1}{R_7+R_8+j\frac{1}{\omega C_4}} + \frac{1}{R_{10}}$$



5)Y_5を求める

$$Y_5 = \frac{1}{R_9}$$



これらの式を式④に代入することで回路の出力電圧V_yが得られる。式の中に含まれるωは周波数によって変化するので、Vを定数とし周波数とV_yとの関係をグラフ化すれば、トーンコントロール回路の周波数特性が得られる。

併せて計算の過程で回路を流れる電流の値も得られる。回路全体を流れる電流を

Iとすると、入力インピーダンスは V/Iで算出できる。図 3 において

$I = I_2 + I_4$となる。

ここで、$I_2 = Y_2 * V_x \qquad I_4 = Y_4 * V_y$

これらの数値は周波数特性を算出するための Excel の計算表の中で算出できているので、周波数ごとの入力インピーダンスが算出できる。

実際の数値は、Excel によって計算すると簡単に計算できる。ただし Z 及び Y は複素数であるので、エクセルの関数は複素数に対する加減乗除の関数を用いることが必要になる。

複素数 a+bi は、Excel では COMPLEX(a,b)で表す。

複素数の加算：IMSUM（複素数 1 ,複素数 2）

複素数の減算：IMSUB（複素数 1 ,複素数 2）

複素数の乗算：IMPRODUCT（複素数 1 ,複素数 2）

複素数の除算：IMDIV（複素数 1 ,複素数 2）

また、V_yの値はこれらの計算では複素数の形式となっているので、最終的には絶対値を算出して実数に変換する必要がある。

複素数の絶対値を得る：IMABS(複素数)