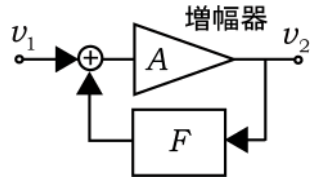


第 12 回講義メモ

今回は帰還についての説明を行う。



上の様に、増幅器の出力の一部を入力側に戻して、もう一回入れてやることを帰還 (Feedback) と呼ぶ。

ただし、ここで A, F は
入力インピーダンス無限大 (電圧が変化しても電流が変化しない。→電流流れない)、
出力インピーダンス 0 (電流が変化しても電圧が変化しない 電圧源として理想的)
という条件で考える。

$$v_2 = A(v_1 + Fv_2)$$

$$(1 - AF)v_2 = Av_1$$

$$G(j\omega) = \frac{v_2}{v_1} = \frac{A}{1 - AF} \quad \text{ここで } AF > 0 \text{ の時を正帰還、} AF < 0 \text{ の時を負帰還 と呼ぶ。}$$

ここで AF をループ利得と呼ぶ。

A は増幅器で作るが、高くすることは出来るが、バラツキや温度、バイアスのずれなどで変動しやすい。従って正確なある一定の増幅を得ることは難しい。

もし $|AF| \gg 1$ なら、 $G(j\omega) = \frac{v_2}{v_1} = \frac{A}{1 - AF} \rightarrow -\frac{1}{F}$ F は抵抗分圧などを比に基づいて作ればそこそこ正確に作れる。

帰還回路の周波数特性

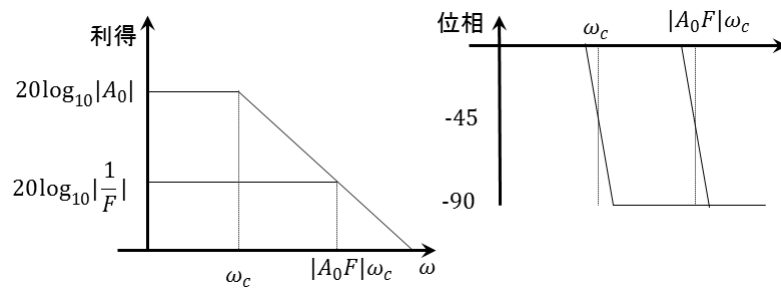
はじめに増幅器の周波数特性は $A(j\omega) = \frac{A_0}{1 + \frac{j\omega}{\omega_c}}$ としよう。 $A_0 < 0$ とする。

$$G(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 - A(j\omega)F} = \frac{\frac{A_0}{1 + \frac{j\omega}{\omega_c}}}{1 - \frac{A_0}{1 + \frac{j\omega}{\omega_c}}F} \quad \text{ただし } \omega_c' = (1 - A_0F)\omega_c \text{ である。}$$

$$= \frac{A_0}{1 - A_0F + \frac{j\omega}{\omega_c}} = \frac{A_0}{1 - A_0F} \cdot \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_c'}}$$

$|AF| \gg 1$ の時

$$G(j\omega) = -\frac{1}{F} \cdot \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_c'}} \quad \omega_0' \rightarrow |A_0F|\omega_c$$



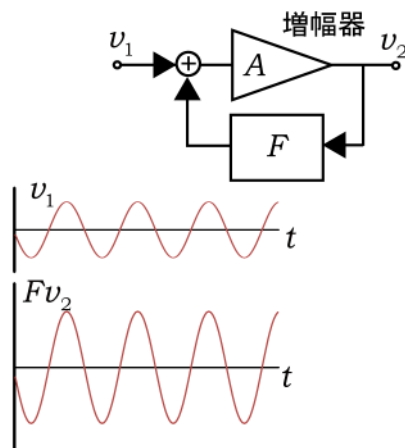
利得は、 $A_0 \rightarrow -\frac{1}{F}$ と低下するが、遮断周波数は、 $\omega_c \rightarrow |A_0 F| \omega_c$ と高くなり、利得が安定し、かつ一定になる周波数が広がったということになる。

帰還の安定性

$$G(j\omega) = \frac{v_2}{v_1} = \frac{A}{1 - AF}$$

この式を見ると、 $AF = 1$ で $G(j\omega) \rightarrow \infty$

たとえ小さなノイズが入ってもそれが無限大まで増幅されてしまう。
→ なにも入力しないのに（電源などで決められる最大値の）出力が出る。→ 発振する。



同位相で、入力したよりも大きな信号が帰還して戻ってきて、再度増幅される。

発振の条件

同位相でもどる為には同位相であるために $\angle AF(j\omega) = 0$ および $|AF(j\omega)| \geq 1$

$$\begin{aligned} \angle AF(j\omega) &= \tan^{-1} \frac{\text{Im}[AF(j\omega)]}{\text{Re}[AF(j\omega)]} = 0 & |AF(j\omega)| &= \sqrt{\text{Re}[AF(j\omega)]^2 + \text{Im}[AF(j\omega)]^2} \\ & & &= \sqrt{\text{Re}[AF(j\omega)]^2} \geq 1 \end{aligned}$$

なので、 $\text{Im}[AF(j\omega)] = 0$ $\text{Re}[AF(j\omega)] \geq 1$ なら発振する。

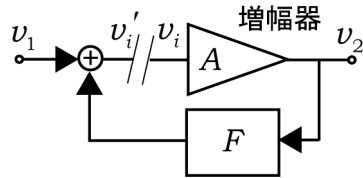
$A_0 F > 0$ 正帰還は発振しやすいので、通常使われない。

$A_0 F < 0$ 負帰還も、場合に因っては発振する。

$AF(j\omega)$ の周波数特性を考えると、位相が -180 度遅れると、負帰還の 180 度分と合わせて 360 度になり、正帰還と同じになる。

発振は $G(j\omega) = \frac{A}{1-AF}$ ではなく、ループ利得 $AF(j\omega)$ で判定すべきである。

正帰還でも負帰還でも、 $\text{Im}[AF(j\omega)] = 0$ $\text{Re}[AF(j\omega)] \geq 1$ なら発振する。

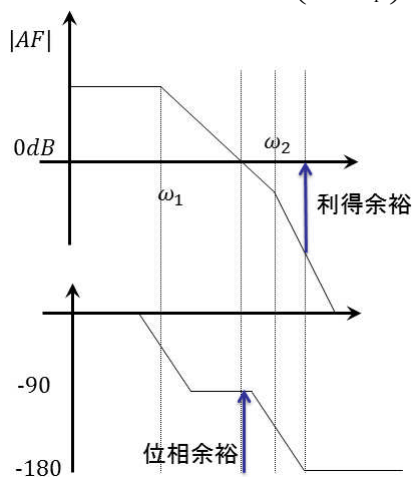


増幅器の入力で切って、ループ利得を求める。(入力インピーダンス無限大なので切っても利得は変化しない。)

位相余裕 利得余裕

発振しないための余裕

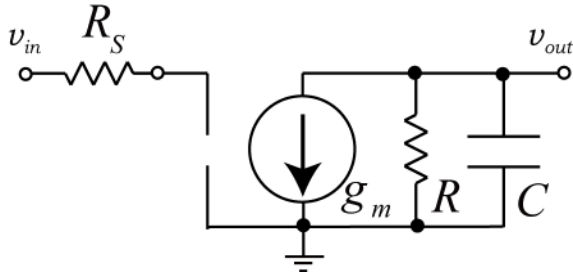
例えば $G(j\omega) = -\frac{1}{F} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{j\omega}{\omega_1}\right)\left(1 + \frac{j\omega}{\omega_2}\right)}$ という回路を考えよう。



位相は ω_2 を超えると -180 度回ってしまう。 180 度回ったところ (骨格ボード図の考えでは $5\omega_2$) において $\text{Re}[AF(j\omega)] < 1$ でなければならない。利得の図では $-20\log[AF(j\omega)] < 0\text{dB}$ となるべきであり、これが利得余裕である。

一方位相余裕は $-20\log[AF(j\omega)] = 0\text{dB}$ となるところにおける位相 $\angle AF(j\omega) + 180$ 度で考える。この位相余裕は 60 度以上有る (図では -120 度まで) であることが目安となる。

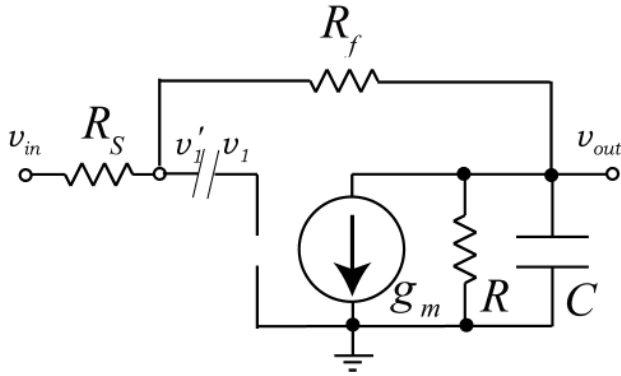
例題 1
まず準備



この回路の $A(j\omega)$ を求めよ。

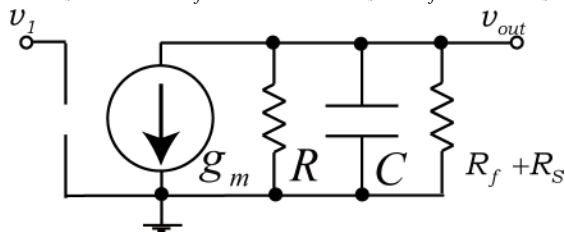
$$g_m v_{gs} + \left(\frac{1}{R} + j\omega C \right) v_{out} = 0 \quad v_{gs} = v_{in} \quad \frac{v_{out}}{v_{in}} = - \frac{g_m}{\frac{1}{R} + j\omega C} = - \frac{g_m R}{1 + j\omega CR}$$

続いて帰還の問題



ループ利得 $AF(j\omega) = \frac{v_1'}{v_1}$ を求めよ。 $v_{in} = 0$ としてよく、 $R_f \gg R$ 、 $R_f \gg R_s$ の近似を用いる。

$$\frac{v_1' - v_{in}}{R_s} = \frac{v_{out} - v_1'}{R_f}, \quad v_1' = \frac{R_s}{R_s + R_f} v_{out} + \frac{R_f}{R_s + R_f} v_{in}, \quad \text{ただし } v_{in} = 0 \text{ としてよく } v_1' = \frac{R_s}{R_s + R_f} v_{out}$$



と見れるので

$$g_m v_1 + \left(\frac{1}{R \parallel (R_s + R_f)} + j\omega C \right) v_{out} = 0 \quad v_1 = - \frac{1}{g_m} \left(\frac{1}{R \parallel (R_s + R_f)} + j\omega C \right) v_{out}$$

$$\text{よって } AF(j\omega) = \frac{v_1'}{v_1} = - \frac{\frac{R_s}{R_s + R_f}}{\frac{1}{g_m} \left(\frac{1}{R \parallel (R_s + R_f)} + j\omega C \right)} = \frac{\frac{g_m R_s}{R_s + R_f} \{ R \parallel (R_s + R_f) \}}{1 + j\omega C \{ R \parallel (R_s + R_f) \}}$$

$R_f \gg R_s$ より $R_s + R_f \simeq R_f$ とでき、 $R_f \gg R$ より、 $R \parallel (R_s + R_f) \simeq R \parallel R_f \approx R$ とできるので、

$$AF(j\omega) \simeq -\frac{g_m R_s R}{R_f} \frac{1}{1+j\omega CR} \quad \text{となる。}$$

$$\text{なお、} A(j\omega) = -\frac{g_m R}{1+j\omega CR} \text{ なので、} F = \frac{R_s}{R_f} \text{ である。}$$

因みに単純に小信号回路として考えるには、 $v_{in} \neq 0$ とし、かつ $v_1' = v_1$ とし、先の近似を使うと

$$v_1 \simeq \frac{R_s}{R_f} v_{out} + v_{in} \quad g_m v_1 + \frac{1}{R} (1+j\omega CR) v_{out} \simeq 0 \quad \text{なので}$$

$$g_m \frac{R_s}{R_f} v_{out} + g_m v_{in} + \frac{1}{R} (1+j\omega CR) v_{out} \simeq 0$$

$$G(j\omega) = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-g_m R}{1 + \frac{g_m R_s R}{R_f} + j\omega CR} = \frac{-g_m R}{1 + g_m R F + j\omega CR}$$

オープンループでの中域利得は $A_0 = -g_m R$ なので

$$|A_0 F| = g_m R F \gg 1 \text{ の時、} G(j\omega) \simeq \frac{-g_m R}{g_m R F + j\omega CR} = -\frac{1}{F} \frac{1}{1 + \frac{j\omega CR}{g_m R F}} = -\frac{1}{F} \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_0'}}$$

$$\omega_0' = \frac{g_m R F}{CR} = |A_0| F \omega_0 \quad \text{ただし、} \omega_0 = \frac{1}{CR}$$

ここでちょっと注意を。

第5回の講義で行ったが、電圧帰還率 $B_v \neq 0$ でないと増幅器は単方向性ではない、ということは帰還が有るということである。すなわち、ゲート接地回路も帰還がある。さらには、ソースディジェネレーション回路の利得低下も帰還の効果である。（ただし、 $B_v=0$ で単方向であり、さらに内側に帰還がある回路である。）

ループを切って、ループ利得を求めるやり方は非常に一般的であるが、単純にループを使って帰還した場合に比べ、このような回路ではループを切るという概念がうまく入れられないことから、ここでは扱わなかった。