

アナログ演算器の基本動作解析

松 山 潔*

(昭和41年10月29日受理)

1. は し が き

筆者は嘗つて“See-Saw Circuit について”¹⁾なる題目で加算器について解析した結果だけを講演発表した。その後この種の回路に関連した研究発表が多くの人によってなされ、製品としても優れたものが作られている。このような現状に対し敢えて本論文を報告するのは主としてつぎの理由による。

(1) 解析の基本的な考え方は東工大栗屋教授の未定稿“Negative Feed Back について”によるもので、この考え方はこの種の実回路解析に可なり一般性を持って便利に適用されるものと考えられる。

(2) 得られた解析結果も端子網論的な二、三のパラメーター（端子網論的に物理的意義を明確に定義され、測定し易い）でまず表示されるので、この種の演算回路を構成（設計）、保守調整する時の基本式として利用するのに便利な形式であると考えられる。

(3) 前記講演発表は解析結果だけを加算器について述べたものである²⁾ので、その解析手順の詳細を報告し、符号変換器、倍率器、積分器等への例証的適用と参考文献の結果との対比を附加する。

2. 基 本 解 析

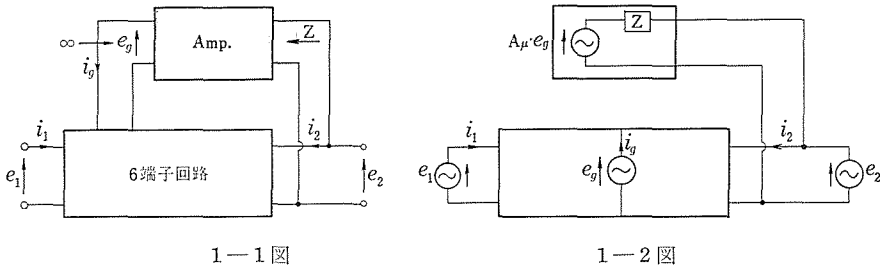
まず一般的な Feed Back Amplifier Circuits を、6 端子回路網があってその中の適当な 4 端子間に増幅器が結合されていると眺め、以下主として 6 端子回路網の入出力電圧電流に着目して解析を進めようとするものである。

このような基本的な考え方で一般的な F. B. Amp. Circuits のブロック図を書くと第 1.1 図のようになる。第 1.1 図で各端子の電圧、電流を $e_1, e_2, e_g, i_1, i_2, i_g$ 、また増幅器単独の増幅度を A_μ とし、その入力インピーダンスは 6 端子回路に含めて考え、Amp. の入力インピーダンスは無大、またその出力内部インピーダンスを Z とすると第 1.1 図の等価回路は第 1.2 図のように示される。第 1.2 図について一般に次式が成立つ、

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= a \cdot e_1 + d \cdot e_2 + f \cdot e_g \\ i_2 &= d' \cdot e_1 + b \cdot e_2 + h \cdot e_g \\ i_g &= f' \cdot e_1 + h' \cdot e_2 + c \cdot e_g \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

この 6 端子回路方程式を出発点として解析を進めて行くのであるが、その際に考慮す

* 精密工学教室、教授



べき起電力が色々あるので、これをどのように組分けて取扱うかにより種々の取扱い方が生じる。ここではその中の一つの方法により解析する。すなわち e_g 電圧端子を開放として考える（そこには起電力源が存在しないと考える）。さきの設定により、 $i_g = 0$ とすると (1.1) 式から

$$e_g = -f'/c \cdot e_1 - h'/c \cdot e_2, \quad \alpha = -f'/c,$$

$\beta = h'/c$ とおくと

$$e_g = \alpha \cdot e_1 - \beta \cdot e_2 \tag{1.3}$$

となる。

(i) 総合増幅度 A_β の計算

開放出力端電圧 e_2 を計算するのに第 1.2 図を第 1.3 図のように分解して考えると、

$$e_2' = k' \cdot e_1, \quad e_2'' = A' \cdot e_g \tag{1.4}$$

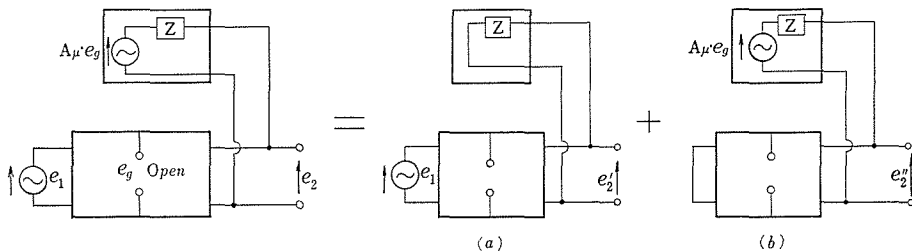
とおき (1.3) と併せて、

$$A_\beta = e_2/e_1 = (e_2' + e_2'')/e_1 = (\alpha \cdot A' + k')/(1 + \beta \cdot A') \tag{1.5}$$

すなわち総合増幅度 A_β は、

k' = 増幅回路を通らずに 6 端子回路を素通りする電圧伝送率

A' = 増幅回路の入力端子を 6 端子回路から取外して独立に e_g を加えた時の電圧増幅度 (6 端子回路の入力端子は短絡)



1-3 図

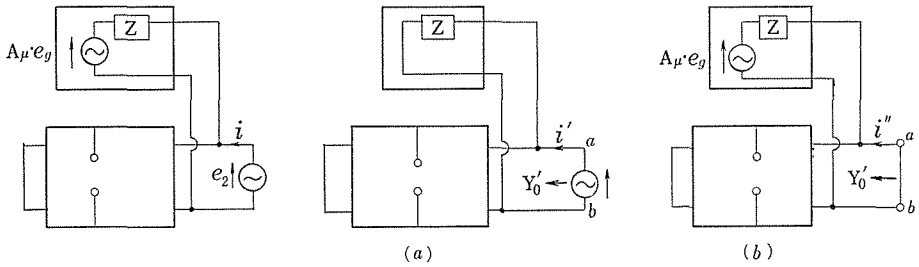
$\alpha = 6$ 端子回路入力端 (出力端は短絡) より増幅回路入力端までの電圧伝送率

$\beta = 6$ 端子回路出力端 (入力端は短絡) より増幅回路入力端までの電圧伝送率 (負
饋還率)

の6端子回路で定まる3つのパラメーターと増幅回路で定まる1つのパラメーターとによつて(1.5)式のような形式で表示される。このことはこの解析法の特長で、この種の回路を構成(設計)、保守調整するのに便利であると考えられる。

(ii) 出力内部インピーダンス Z_β の計算

第1.3図で6端子回路入力端を短絡して第1.4図のように分解する。



1-4図

(1.3)式より

$$e_g = -\beta \cdot e_2 \tag{1.6}$$

また第1.4図(a)で

$$i' = Y_0' \cdot e_2 \tag{1.7}$$

ここに Y_0' は第1.4図に示す通りである。また第1.4図(b)の i'' は(1.4)式で定まる a, b 端の開放電圧 e'' と上記 Y_0' とでつぎのように計算される。

$$e'' = A' \cdot e_g \quad \therefore i'' = -Y_0' \cdot e'' = -Y_0' \cdot A' \cdot e_g \tag{1.8}$$

(1.6), (1.7), (1.8) 式より

$$i = i' + i'' = Y_0'(1 + \beta \cdot A')e_2$$

故に

$$Y_\beta = 1/Z_\beta = Y_0'(1 + \beta \cdot A') \tag{1.9}$$

(iii) 入力内部インピーダンス Z_{inp} の計算

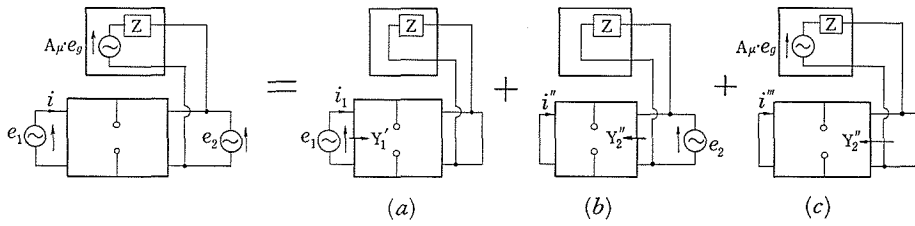
第1.5図で出力端子に負荷 Z_l を接続した時の出力電圧 e_{2l} は

$$e_{2l} = Z_l / (Z_l + Y_\beta^{-1}) \cdot A_\beta \cdot e_1 = Y_\beta \cdot Z_l / (1 + Y_\beta \cdot Z_l) \cdot A_\beta \cdot e_1 \tag{1.10}$$

第1.5図の分解された(a), (b), (c) について、

$$i' = Y_1' \cdot e_1, \quad i'' = -Y_2'' \cdot e_{2l}, \quad i''' \equiv 0 \tag{1.11}$$

(1.10), (1.11) を併せて、



1-5 図

$$i = i' + i'' + i''' = \{Y_1' - Y_2'' \cdot Y_\beta \cdot Z_l / (1 + Y_\beta \cdot Z_l) \cdot A_\beta\} e_1$$

故に

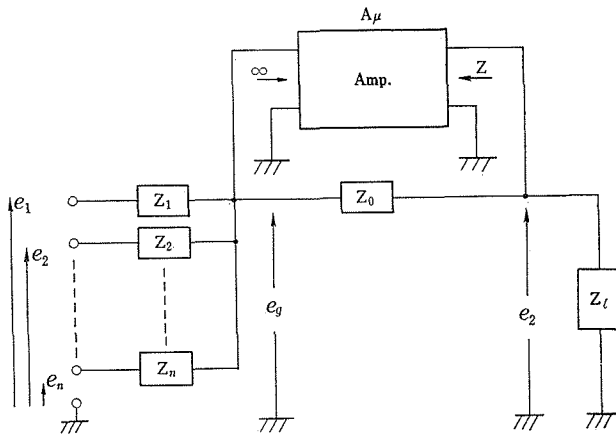
$$1/Z_{inp} = Y_{inp} = Y_1' - Y_2'' \cdot Y_\beta \cdot Z_l / (1 + Y_\beta \cdot Z_l) \cdot A_\beta$$

$$= Y_1' - Y_2'' \cdot A_\beta \quad (\text{無負荷の時}) \tag{1.12}$$

ここに Y_1' , Y_2'' は第1.5図に示す通りである。これら(1.9), (1.12)式も(1.5)式と同様に可なり一般性を持った便利な表示と考えられる。

3. n 個の入力電圧を加算する See-Saw Circuit¹⁾の解析

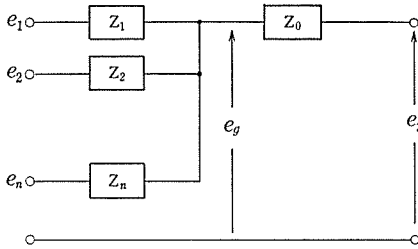
つぎに上述の基本解析を第1.6図に示すような n 個の入力電圧を加算する See-Saw Circuit に適用する。



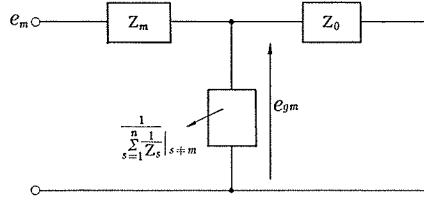
1-6 図

(i) α , β の計算

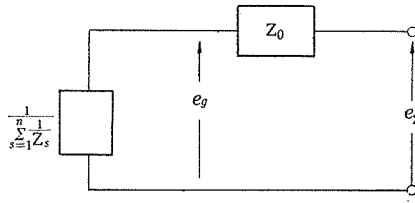
第1.6図から増幅回路を取外した第1.7図から α を求めるには第1.8図を参照して、



1-7 図



1-8 図



1-9 図

$$e_{gm} = \left\{ Z_0^{-1} + \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} \Big|_{s \neq m} \right\}^{-1} / \left[Z_m + \left\{ Z_0^{-1} + \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} \Big|_{s \neq m} \right\}^{-1} \right] \cdot e_m$$

$$= 1 / \left\{ Z_m \cdot \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} \right\} \cdot e_m$$

故に m 番目の入力電圧に対する α として α_m とおくと,

$$\alpha_m = e_{gm} / e_m = 1 / \left\{ Z_m \cdot \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} \right\} \tag{1.13}$$

また β を求めるには第 1.9 図を参照して,

$$e_g = \left\{ \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} \right\}^{-1} / \left[Z_0 + \left\{ \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} \right\}^{-1} \right] \cdot e_2 = 1 / \left\{ Z_0 \cdot \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} + 1 \right\} \cdot e_2$$

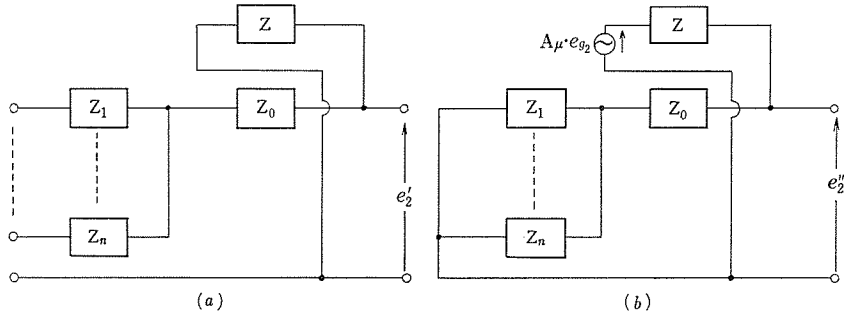
故に,

$$\beta = -e_g / e_2 = -1 / \left\{ Z_0 \cdot \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} + 1 \right\} \tag{1.14}$$

(ii) 総合増幅度 A_β の計算

この場合において第 1.3 図に対応するものとして第 1.10 図(a), (b), さらに m 番目の入力電圧に対する k' として k'_m とおいたものを求めるために第 1.10 図(a)をさらに分解した第 1.11 図をそれぞれ考える。第 1.11 図から,

$$e_{2m'} = e_m / \left[Z_m + \left\{ \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} \Big|_{s \neq m} + (Z_0 + Z)^{-1} \right\}^{-1} \right]$$



1-10図

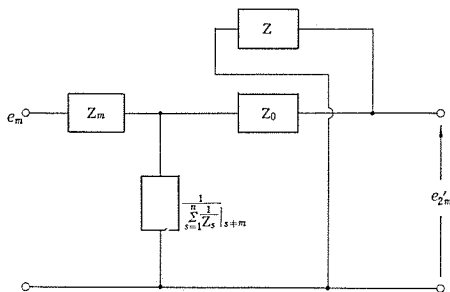
$$\begin{aligned} & \times Z \cdot \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} |_{s \neq m} / \left\{ \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} |_{s \neq m} + Z_0 + Z \right\}^{-1} \\ & = Z \cdot (Z_0 + Z)^{-1} / \left\{ Z_m \cdot \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} + Z_m (Z_0 + Z)^{-1} \right\} \cdot e_m \end{aligned}$$

故に $k_m' = e_{2m}' / e_m = Z \cdot (Z_0 + Z)^{-1} / \left\{ Z_m \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} + Z_m (Z_0 + Z)^{-1} \right\}$ (1.15)

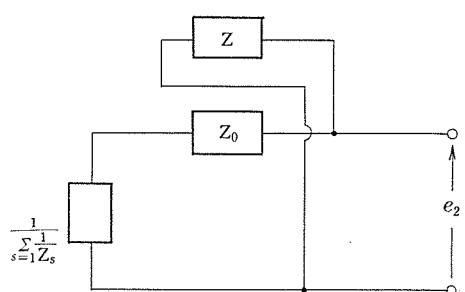
また第1.10図(b)から,

$$\begin{aligned} e_{2m}'' & = A_\mu \cdot e_{gs} / \left[\left\{ \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} \right\}^{-1} + Z_0 + Z \right] \cdot \left[Z_0 + \left\{ \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} \right\}^{-1} \right] \\ & = A_\mu \cdot (Z_0 \cdot \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} + 1) / \left\{ (Z_0 + Z) \cdot \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} + 1 \right\} \cdot e_{gs} \end{aligned}$$

故に $A' = e_{2m}'' / e_{gs} = A_\mu \cdot (Z_0 \cdot \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} + 1) / \left\{ (Z_0 + Z) \cdot \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} + 1 \right\}$ (1.16)



1-11図



1-12図

m 番目の入力電圧 e_m だけ (その他の入力電圧は短絡) に対する出力端開放電圧 e_{mout} は上述までの結果を利用して, $e_{mout} = K_m \cdot e_m$, ここに

$$K_m = (k_m' + \alpha_m \cdot A') / (1 + \beta \cdot A') \quad (1.17)$$

となる。

従って n 個の入力電圧に対する開放端全出力電圧 e_2 は $e_2 = \sum_{m=1}^n e_{mout}$ となり (1.17) を代入して,

$$e_2 = \sum_{m=1}^n \left\{ (k_m' + \alpha_m \cdot A') \cdot e_m / (1 + \beta \cdot A') \right\}$$

上式と (1.13) ~ (1.16) とから,

$$\begin{aligned} A_\beta &= e_2 / \sum_{s=1}^n e_s = \sum_{m=1}^n \left\{ (k_m' + \alpha_m \cdot A') \cdot e_m \right\} / \left\{ (1 + \beta \cdot A') \cdot \sum_{s=1}^n e_s \right\} \\ &= \sum_{m=1}^n \left[\left\{ Z(Z_0 + Z)^{-1} \cdot \left\{ Z_m \cdot \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} + Z_m(Z_0 + Z)^{-1} \right\}^{-1} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left\{ Z_m \cdot \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} + Z_m \cdot Z_0^{-1} \right\}^{-1} \cdot A_\mu \cdot \left\{ Z_0 \cdot \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} + 1 \right\} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times (Z + Z_0) \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} + 1 \right\}^{-1} \right] \cdot e_m \\ &\quad \times \left[1 - A_\mu \cdot \left\{ (Z + Z_0) \cdot \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} + 1 \right\}^{-1} \cdot \sum_{s=1}^n e_s \right]^{-1} \end{aligned} \quad (1.18)$$

(ii) 出力内部インピーダンス Z_β (全入力端短絡) の計算
第1.4図(a)に対応する第1.12図から

$$i' = \left[Z^{-1} + \left\{ Z + \left(\sum_{s=1}^n Z_s^{-1} \right)^{-1} \right\} \right] \cdot e_2$$

$$\text{故に } Y_0' = i' / e_2 = Z^{-1} + \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} \cdot (Z_0 \cdot \sum_{s=0}^n Z_s^{-1}) \quad (1.19)$$

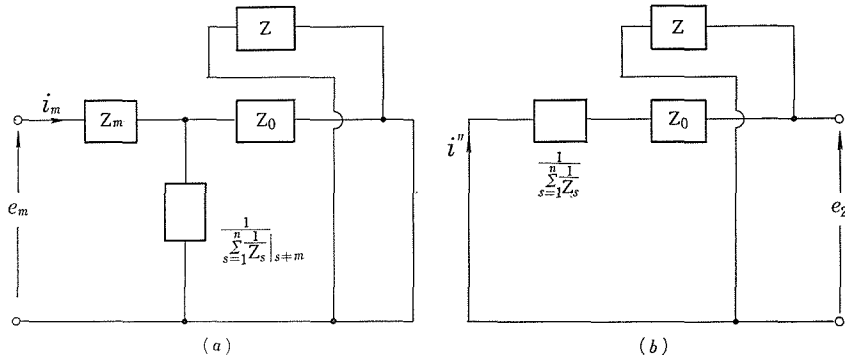
(1.19), (1.14), (1.16) 式を併せて,

$$\begin{aligned} Y_\beta &= 1 / Z_\beta = Y_0' (1 + \beta \cdot A') \\ &= \left\{ (Z + Z_0) \cdot \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} + 1 - A_\mu \right\} / \left\{ Z \cdot Z_0 \cdot \sum_{s=0}^n Z_s^{-1} \right\} \end{aligned} \quad (1.20)$$

(iii) 入力内部インピーダンス Z_{inp} の計算

第1.5図の(a), (b)に対応するものとして第1.13図(a), (b)を考慮して Y_1' , Y_2'' を求める。
第1.13図(a)から,

$$i_m' = e_m / \left[Z_m + \left\{ Z_0^{-1} + \sum_{s=1}^n Z_s^{-1} \right\}^{-1} \right],$$



1-13図

$$i' = \sum_{m=1}^n i_m' = \sum_{m=1}^n i_m' / \sum_{s=1}^n e_s \cdot \sum_{s=1}^n e_s,$$

$$\text{故に } Y_1' = i' / \sum_{s=1}^n e_s = \sum_{m=1}^n \left[\left\{ Z_m + \left(\sum_{s=0}^n Z_s^{-1} \Big|_{s \neq m} \right)^{-1} \right\}^{-1} \cdot e_m \cdot \left(\sum_{s=1}^n e_s \right)^{-1} \right] \quad (1.21)$$

つぎに第1.13図(b)から,

$$i'' = -e_2 / \left\{ Z_0 + \left(\sum_{s=1}^n Z_s^{-1} \right)^{-1} \right\},$$

$$\text{故に } Y_2'' = -i'' / e_2 = 1 / \left\{ Z_0 + \left(\sum_{s=1}^n Z_s^{-1} \right)^{-1} \right\} \quad (1.22)$$

(1.12), (1.21), (1.22)を併せて,

$$\begin{aligned} 1/Z_{inp} = Y_{inp} = & \sum_{m=1}^n \left[\left\{ Z_m + \left(\sum_{s=0}^n Z_s^{-1} \Big|_{s \neq m} \right)^{-1} \right\}^{-1} \cdot e_m \cdot \left(\sum_{s=1}^n e_s \right)^{-1} \right] \\ & - A_\beta \left\{ Z_0 + \left(\sum_{s=1}^n Z_s^{-1} \right)^{-1} \right\}^{-1} \cdot Y_\beta \cdot Z_l \cdot (1 + Y_\beta \cdot Z_l)^{-1} \end{aligned} \quad (1.23)$$

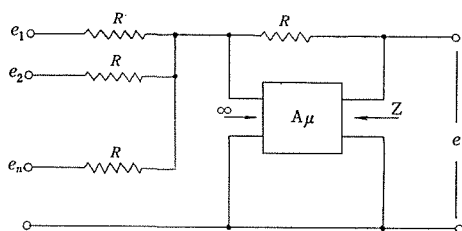
(iv) 加算点インピーダンス Z_{grid}

ここで Z_{grid} とは全入力端短絡, 出力端に Z_l を負荷した時に e_g 電圧端子から見たインピーダンスを称するもので, これも上述までと同様な計算手順によって求められる。その結果は,

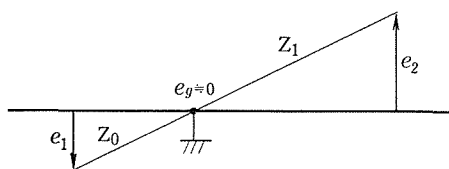
$$1/Z_{grid} = \sum_{s=0}^n Z_s^{-1} - Z_0^{-1} \cdot (Z + A_\mu \cdot Z_0) \cdot Z_l \cdot \left\{ Z \cdot Z_0 + Z_l (Z + Z_0) \right\}^{-1} \quad (1.24)$$

4. 解析結果の考察

上述までに得られた諸結果は可成りの一般性を持って See-Saw Circuit を原理とす



1-14図



1-15図

る各種の演算回路等の基本的動作を知る上に利用出来る。ここでは現在能く使われている加算器，符号変換器，積分器等につき例証的に解析結果を適用して見る。

(i). 加算器

第1.6図で加算インピーダンス $Z_i=R$ ($i=0, 1, 2, \dots, n$) とした第1.14図の場合が多い。この時(1.18)式は $A_\beta = (Z \cdot R^{-1} + A_\mu) / \{n(1 + Z \cdot R^{-1}) + 1 - A_\mu\}$ となり， $A_\mu \rightarrow \infty$ とすれば $A_\beta \doteq -1$ ，すなわち $e_2 = -\sum_{s=1}^n e_s$ なる加算を行うことは能く知られている通りである。然し乍ら，たとえば精度等を問題とする時には上記の A_β の基本式について充分吟味せねばならない。

(ii). 符号変換器，倍率器

(1.18)式で $n=1$ とすると，

$$A_\beta = (A_\mu \cdot Z_0 + Z) / \{(Z_0 + Z_1 + Z) - A_\mu \cdot Z_1\} \tag{1.25}$$

またこの時(1.24)式は ($Z_i \rightarrow \infty$ として)

$$1/Z_{grid} = 1/Z_0 + 1/Z_1 - Z/Z_0 \{(Z_0 + Z)\} - A_\mu / (Z_0 + Z)$$

さらに $|A_\mu|$ が充分大きい場合はそれぞれ

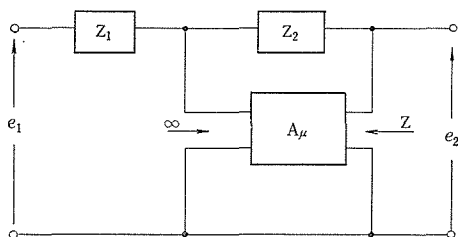
$$A_\beta \doteq -Z_0/Z_1, \quad Z_{grid} \doteq 0 \quad (Z_{in} \doteq Z_1) \tag{1.26}$$

となり，第1.15図に示すように演算アーム Z_0, Z_1 の接合点(加算点)を殆んど零電位の支点として入出力電圧はその比 Z_0/Z_1 でseesawする(See-Saw Circuit 命名の由来)。ここでさらに $Z_1=Z_0=R$ とすれば符号変換器， $Z_0/Z_1=a$ とすれば a 倍の倍率器となることは云うまでもないが，この場合も(1.25)の基本式を時によって考慮せねばならない。

(iii). 積分器

近似式(1.26)で Z_0 をコンデンサー， Z_1 を抵抗した場合で，この場合もより良い積分器とするにはやはり(1.25)の基本式から考えねばならない。以上の何れの演算器もこれらを組合せて使う場合等には，必要に応じて入力，出力，加算点の各インピーダンスの解析結果を利用すればよい。

(iv). 種々な伝達函数の実現



1-16图 .

演算アーム Z_0 , Z_1 を色々な回路素子で組合せることによって種々な伝達函数を具現出来ることもよく知られる通りである。参考までに文献(2), (3)に表示された結果と本論文の解析結果とを対比するために第1.16図の回路につき本論文の解析結果を列記するとつぎの通りで, Z_1 , Z_2 に具体的な回路素子を与えた結果を別表に一括して表示した(本論文の Z_0 を出力アーム Z_2 , A_μ を $-\mu$ として文献の記号に合せた)。

$$\alpha = Z_2/(Z_1+Z_2), \quad \beta = -Z_1/(Z_1+Z_2), \quad k' = Z/(Z+Z_1+Z_2),$$

$$A' = A_\mu \cdot (Z_1+Z_2)/(Z+Z_1+Z_2), \quad A_\beta = (Z+A_\mu \cdot Z_2)/(Z+Z_1+Z_2-A_\mu \cdot Z_1),$$

$$Y_0' = 1/(Z_1+Z_2)+1/Z, \quad Z_\beta = (Z+Z_1+Z_2-A_\mu \cdot Z_1)/\{Z \cdot (Z_1+Z_2)\},$$

$$1/Z_{in\beta} = \{Z+(1-A_\mu) \cdot Z_1\}/\{Z(Z_1+Z_2)+(Z+Z_1+Z_2-A_\mu \cdot Z_1) \cdot Z_1\},$$

$$1/Z_{grid} = 1/Z_1+1/Z_2-(1/Z_2) \cdot Z_1(Z+A_\mu \cdot Z_2)/\{Z \cdot Z_2+Z_1(Z+Z_2)\}$$

5. 結 語

(1) 一般的な Feed Back Amplifier Circuit を6端子網的な考えで取扱い, 総合増幅度, 入力, 出力, 加算点の各インピーダンスを6端子回路網パラメーターを主として含む形式で表示した。

(2) 上記の解析を n 個の入力端子を有する See-Saw Circuit に拡張適用した。

(3) 解析結果を加算器, 符号変換器, 倍率器, 積分器に例証的に適用し, また参考文献の結果と対比した。

以上により得られた諸結果には既発表文献と顕著な本質的差異はないが, 本論文のはしがきにある起稿理由の一端に具体的に答えたものとする次第である。

最後に東工大粟屋教授の御指導と, 卒論の一端として験算の労をとられた仁科陽(現日本光電), 片桐久義(現平和時計)の両君とに厚き感謝の意を表する次第であります。

文 献

- 1) 松山 潔: See-Saw Circuit について; 544, 昭29年 電気三学会連大講演論文集
- 2) 野村民也, 三浦武雄著: アナログ電子計算機; 41頁 第2.1表 (コロナ社)
- 3) 山下英男監修: 電子計算機アナログ計算機編; 56頁 第3.1表 (オーム社)

Summary

Analysis of Analogue Operational Amplifier Circuit

Kiyoshi MATSUYAMA

(Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering)

In this paper the author treats the analytical method of analogue operational amplifier circuit.

This is proceeded as follows :

- (1). The fundamental analysis is based on the Awaya's unpublished paper ; "On Negative Feed Back".
- (2). The results of fundamental analysis are extended to the adder with n input terminals which is composed of See-Saw Circuit.
- (3). The general results finally obtained are applied to adder, sign converter, constant multiplier, integrator, and transfer function generator.

インピーダンス構成	入力アーム Z_1							
	出力アーム Z_2							
α	$\frac{R_2}{R_1+R_2}$	$\frac{C_1}{C_1+C_2}$	$\frac{1}{PR_2C_2+1}$	$\frac{PC_1R_2}{PC_1R_2+1}$	$\frac{R_2}{PR_1R_2C_2+R_1+R_2}$	$\frac{C_1}{PR_1C_2+C_1+C_2}$	$\frac{PR_2C_2+1}{PC_2(R_1+R_2)+1}$	$\frac{PR_1C_1+1}{PR_1(C_1+C_2)+1}$
β	$\frac{-R_1}{R_1+R_2}$	$\frac{-C_2}{C_1+C_2}$	$\frac{-PR_1C_2}{PR_1C_2+1}$	$\frac{-1}{PC_1R_2+1}$	$\frac{-PR_1R_2C_2-R_1}{PR_1R_2C_2+R_1+R_2}$	$\frac{-PR_1C_2-C_2}{PR_1C_2+C_1+C_2}$	$\frac{-PR_1C_2}{PC_2(R_1+R_2)+1}$	$\frac{-PR_1C_2}{PR_1(C_1+C_2)+1}$
h'	$\frac{Z}{R_1+R_2+Z}$	$\frac{PC_1C_2Z}{PC_2Z+C_1+C_2}$	$\frac{PC_2Z}{PC_2(R_1+Z)+1}$	$\frac{PC_1Z}{PC_1(R_2+Z)+1}$	$\frac{(PR_2C_2+1)Z}{PR_2C_2(R_1+Z)+R_1+R_2+Z}$	$\frac{PC_1C_2Z}{PC_2(R_1+Z)+C_1+C_2}$	$\frac{PC_2Z}{PC_2(R_1+R_2+Z)+1}$	$\frac{PC_2(PR_1C_1+1)Z}{PC_2(PR_1C_1+1)Z+PR_1(C_1+C_2)+1}$
A'	$\frac{-\mu(R_1+R_2)}{R_1+R_2+Z}$	$\frac{-\mu(C_1+C_2)}{PC_2Z+C_1+C_2}$	$\frac{-\mu(PR_2C_2+1)}{PC_2(R_1+Z)+1}$	$\frac{-\mu(PC_1R_2+1)}{PC_1(R_2+Z)+1}$	$\frac{-\mu(PR_1R_2C_2+R_1+R_2)}{PR_2C_2(R_1+Z)+R_1+R_2+Z}$	$\frac{-\mu(PR_1C_2+C_1+C_2)}{PC_2(R_1+Z)+C_1+C_2}$	$\frac{-\mu(PC_2(R_1+R_2)+1)}{PC_2(R_1+R_2+Z)+1}$	$\frac{-\mu(PR_1(C_1+C_2)+1)}{PC_2(PR_1C_1+1)Z+PR_1(C_1+C_2)+1}$
A_β	$\frac{Z-\mu R_2}{R_1+R_2+Z+\mu R_1} \Rightarrow \frac{R_2}{R_1}$	$\frac{PC_1C_2Z-\mu C_1}{PC_2Z+C_1+C_2+\mu C_2} \Rightarrow \frac{C_1}{C_2}$	$\frac{PC_2Z-\mu}{PC_2(R_1+Z)+1+\mu PR_1C_2} \Rightarrow \frac{1}{PR_1C_2}$	$\frac{PC_1Z-\mu PC_1R_2}{PC_1(R_2+Z)+1+\mu} \Rightarrow -PC_1R_2$	$\frac{(PR_2C_2+1)Z-\mu R_2}{PR_2C_2(R_1+Z)+R_1+R_2+Z+\mu R_1(PR_2C_2+1)} \Rightarrow \frac{R_2}{R_1(PR_2C_2+1)}$	$\frac{PC_1C_2Z-\mu C_1}{PC_2(R_1+Z)+C_1+C_2+\mu C_1(PR_1C_1+1)} \Rightarrow \frac{C_1}{C_2(PR_1C_1+1)}$	$\frac{PC_2Z-\mu(PR_2C_2+1)}{PC_2(R_1+R_2+Z)+1+\mu PR_1C_2} \Rightarrow \frac{PR_2C_2+1}{PR_1C_2}$	$\frac{PC_2Z(PR_1C_1+1)-\mu(PR_1C_1+1)}{PC_2(PR_1C_1+1)Z+PR_1(C_1+C_2)+1+\mu PR_1C_2} \Rightarrow \frac{PR_1C_1+1}{PR_1C_2}$
Y_β ($Y_\beta = \frac{1}{Z_\beta}$)	$\frac{R_1+R_2+Z+\mu R_1}{Z(R_1+R_2)} \Rightarrow \frac{\mu R_1}{Z(R_1+R_2)}$	$\frac{PC_1C_2Z+C_1+C_2+\mu C_2}{Z(C_1+C_2)} \Rightarrow \frac{\mu C_2}{Z(C_1+C_2)}$	$\frac{PC_2(R_1+Z)+1+\mu PR_1C_2}{Z(PR_2C_2+1)} \Rightarrow \frac{\mu PR_1C_2}{Z(PR_2C_2+1)}$	$\frac{PC_1(R_2+Z)+1+\mu}{Z(PC_1R_2+1)} \Rightarrow \frac{\mu}{Z(PC_1R_2+1)}$	$\frac{PR_2C_2(R_1+Z)+R_1+R_2+Z+\mu R_1(PR_2C_2+1)}{Z(PR_1R_2C_2+R_1+R_2)} \Rightarrow \frac{\mu R_1(PR_2C_2+1)}{Z(PR_1R_2C_2+R_1+R_2)}$	$\frac{PC_2C_2(R_1+Z)+C_1+C_2+\mu C_1(PR_1C_1+1)}{Z(PR_1C_2+C_1+C_2)} \Rightarrow \frac{\mu C_2(PR_1C_1+1)}{Z(PR_1C_2+C_1+C_2)}$	$\frac{PC_2(R_1+R_2+Z)+1+\mu PR_1C_2}{Z(PC_2(R_1+R_2)+1)} \Rightarrow \frac{\mu PR_1C_2}{Z(PC_2(R_1+R_2)+1)}$	$\frac{PC_2(PR_1C_1+1)Z+PR_1(C_1+C_2)+1+\mu PR_1C_2}{Z(PR_1(C_1+C_2)+1)} \Rightarrow \frac{(\mu PR_1C_2)}{Z(PR_1(C_1+C_2)+1)}$
$Y_{in\beta}$ ($Y_{in\beta} = \frac{1}{Z_{in\beta}}$)	$\frac{Z+Zl+\mu Zl}{Z(R_1+R_2)+(R_1+R_2+Z+\mu R_1)Zl} \Rightarrow \frac{1}{R_1}$	$\frac{PC_1C_2(Z+Zl+\mu Zl)}{Z(C_1+C_2)+(C_1+C_2+PC_1C_2Z+\mu C_2)Zl} \Rightarrow PC_1$	$\frac{PC_2(Z+Zl+\mu Zl)}{Z(PR_2C_2+1)+(PC_2(R_1+Z)+1+\mu PR_1C_2)Zl} \Rightarrow \frac{1}{R_1}$	$\frac{PC_1(Z+Zl+\mu Zl)}{Z(PC_1R_2+1)+(PC_1(R_2+Z)+1+\mu)Zl} \Rightarrow PC_1$	$\frac{PR_2C_2(Z+Zl)+Z+Zl+\mu(PR_2C_2+1)Zl}{Z(PR_1R_2C_2+R_1+R_2)+(PR_2C_2(R_1+Z)+R_1+R_2+Z+\mu R_1(PR_2C_2+1))Zl} \Rightarrow \frac{1}{R_1}$	$\frac{PC_1C_2(Z+Zl+\mu Zl)}{Z(PR_1C_2+C_1+C_2)+(PC_2C_2(R_1+Z)+C_1+C_2+\mu C_2(PR_1C_1+1))Zl} \Rightarrow \frac{PC_1}{PR_1C_1+1}$	$\frac{PC_2(Z+Zl+\mu Zl)}{Z(PC_2(R_1+R_2)+1)+(PC_2(R_1+R_2+Z)+1+\mu PR_1C_2)Zl} \Rightarrow \frac{1}{R_1}$	$\frac{PC_2(PR_1C_1+1)(Z+Zl+\mu Zl)}{Z(PR_1(C_1+C_2)+1)+(PC_2Z(PR_1C_1+1)+PR_1(C_1+C_2)+1+\mu PR_1C_2)Zl} \Rightarrow \frac{PR_1C_1+1}{R}$
インディシャル応答								

注 本文の Z_0 を Z_2 , 本文の A_μ を $-\mu$ とした。また各欄の近似式が文献(2), (3)に表示されている。

※印の入力信号は の場合

