

小型サーボ機構動特性試験装置

Test Equipment for Dynamic Characteristics of Small Size Servomechanisms

不破 康 博* 猪 瀬 武*
Yasuhiro Fuwa Takeshi Inose

内 容 梗 概

小型サーボ機構の計画や設計において必要な制御要素や制御対象の動特性を正確かつ能率的に測定する装置を試作した。この装置は非線型特性を含んでいる系の周波数特性を測定することのできる相関を用いた周波数特性測定装置と、小型電動機の回転力特性測定装置からなっている。これらの装置を用いた測定例から、これらを用いることにより小型サーボ機構の各要素の動特性を正確かつ能率的に測定できるために小型サーボ機構の計画や設計が著しく容易になることがわかった。

1. 緒 言

平衡型計器やサーボ計算機などに用いられる小型のサーボ機構は制御要素として一般に数ワットの電動機と増幅器を用いる。この種のサーボ機構の設計は過渡応答や周波数応答による閉ループ系を取り扱うことである。過渡応答そのものを計算してサーボ機構の各定数を決定するにはアナログ計算機を用いる方法が最も簡便である。しかしながらアナログ計算機を用いるためには各制御要素の伝達関数をあらかじめ測定することが必要である。周波数応答によりサーボ機構の設計を行うにも各制御要素の周波数伝達関数を測定することが必要である。さらにこの種のサーボ機構の各部分には無視できない程度の飽和、バックラッシュや不感帯などの非線型性を含んでいる。したがってこの種のサーボ機構を設計したり計画したりするには各制御要素について非線型特性を考慮した周波数伝達特性を測定することが重要な問題になる。またこのような小型サーボ機構ではサーボ電動機が系の特性を支配する場合が多い。したがってサーボ電動機の特性を測定することもしばしば必要である。サーボ電動機はその回転力および速度特性により動特性が左右される。

筆者は以上の目的から、小型サーボ機構の動特性を測定する装置として、非線型特性を含む制御要素あるいは制御系の周波数伝達特性を測定するための相関型サーボアナライザと、サーボ電動機の特性を測定するための回転力測定装置を試作したのでその概略を報告する。

2. サーボ系の特性表示とその測定装置

2.1 サーボ系の特性表示

サーボ系の設計には制御対象と制御要素の特性を表示する方法として、線型の場合には周波数伝達関数⁽¹⁾を用いる方法が合理的な手段であるとされている。これは制御系の周波数特性を利用と位相ずれについて表示するも

のである。系に非線型特性を含むものでは、出力の基本波成分について線型と同様に取り扱う等価周波数伝達関数あるいは記述関数⁽²⁾と称せられる方法が用いられる。

2.2 測定装置の原理

一般にサーボ系の周波数伝達特性は入力信号 $a \sin \omega t$ に対して出力には歪波 x を生じる。この波形をフーリエ級数で表わすと

$$x = b_0 + b_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \dots + b_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \dots \dots \dots (1)$$

となる。系が線型であれば出力には基本波成分のみとなるから、入力信号の周波数を変えて出力の振幅 b_1 と位相ずれ φ_1 を測定することにより周波数伝達関数が得られる。非線型の系の場合には(1)式中で基本波成分を分離したうえで線型の場合と同様に振幅 b_1 と位相ずれ φ_1 を測定すれば記述関数が得られる。しかしながら出力の歪波から基本波成分を分離するのに、基本波成分にはなんら影響を与えないような超低周波の帯域濾波器を作るとは通常の LC 回路網では困難であると考えられる。これに対し通信の S/N 比改善に用いられるものと同様な相関器を用いると上述の問題は簡単に解決される。

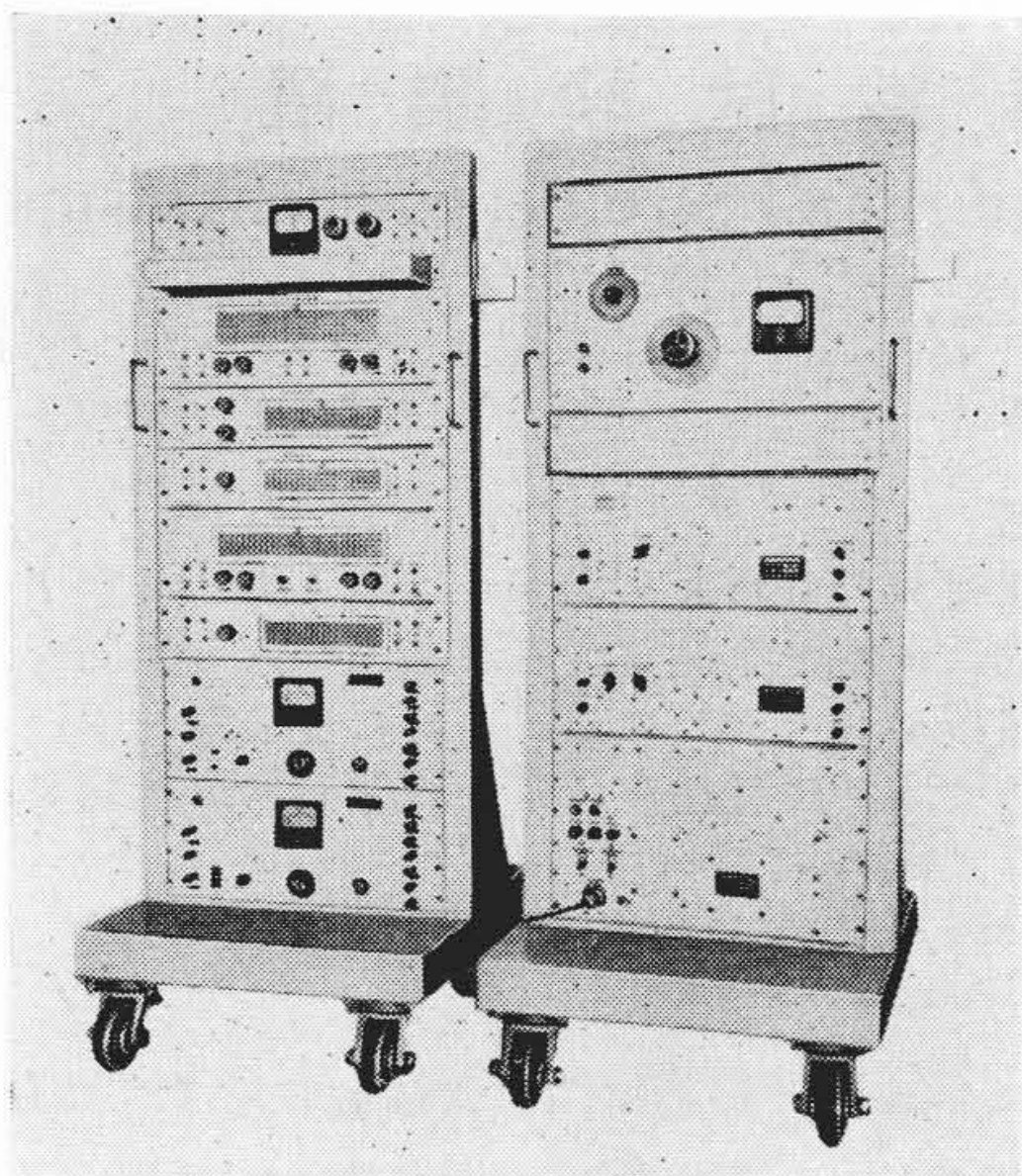
今(1)式で表わされる波と $\sin \omega t$ および $\cos \omega t$ との相関をとれば、周期関数であることを考慮して

$$\frac{2}{T} \int_0^T x \sin \omega t dt = b_1 \cos \varphi_1 \dots \dots \dots (2)$$

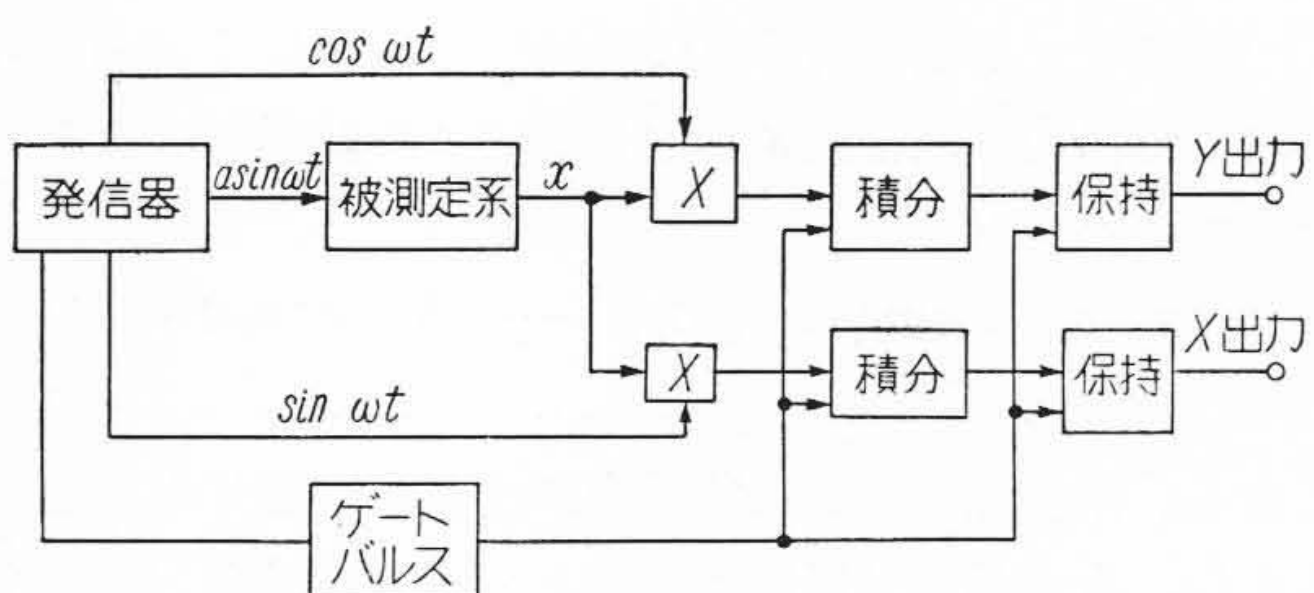
$$\frac{2}{T} \int_0^T x \cos \omega t dt = b_1 \sin \varphi_1 \dots \dots \dots (3)$$

となる。これは x の基本波成分の振幅に位相ずれの角の正弦と余弦を乗じたものであり、記述関数を複素面に表示した場合の実部と虚部成分である。この(2)、(3)式を計算すればその周波数における記述関数が直接直交表示できる。これが本装置の原理である。 x が基本波成分だけの場合にも(2)、(3)式が成立するから、この場合は周波数伝達関数を直交表示することになる。

* 日立製作所戸塚工場



第1図 相関型サーボアナライザ外観図



第2図 相関型サーボアナライザ機能図

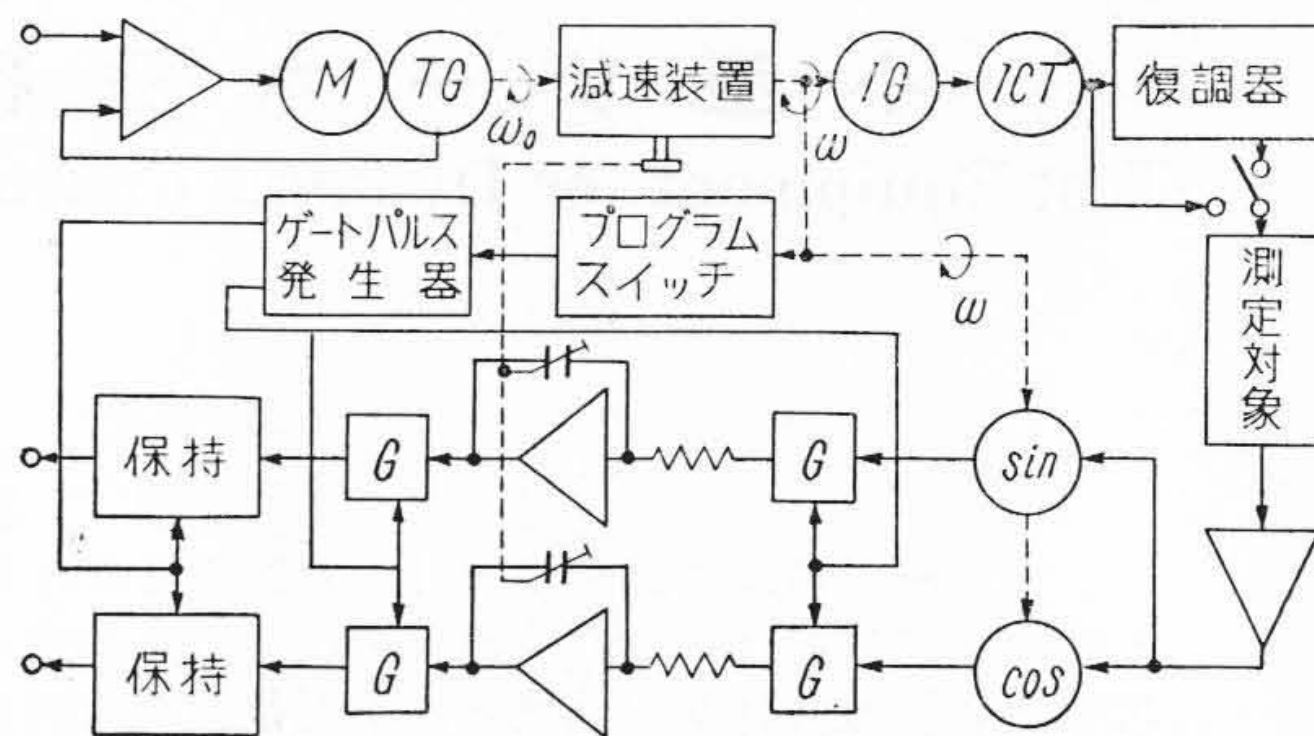
この(2),(3)式を非周期関数を含めた相関の式(4)(5)に変えると、積分は受動積分器(低域濾波器)によつてもできる。この場合は $x \sin \omega t$ と $x \cos \omega t$ の直流分を測定することになるから、十分大きい時定数をもつ濾波器を用いて測定にもかなり長い時間を必要とする。この方式によるサーボアナライザとしては東北大学竹田、福島氏⁽³⁾ および中央大学野本氏⁽⁴⁾ の実験がある。われわれは測定時間の短縮および測定中の各種ドリフトによる影響を極力避けるために(2),(3)式を計算する方式をとつた。したがって測定に要する時間は理論上最小である。

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T x \sin \omega t dt = b_1 \cos \varphi_1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

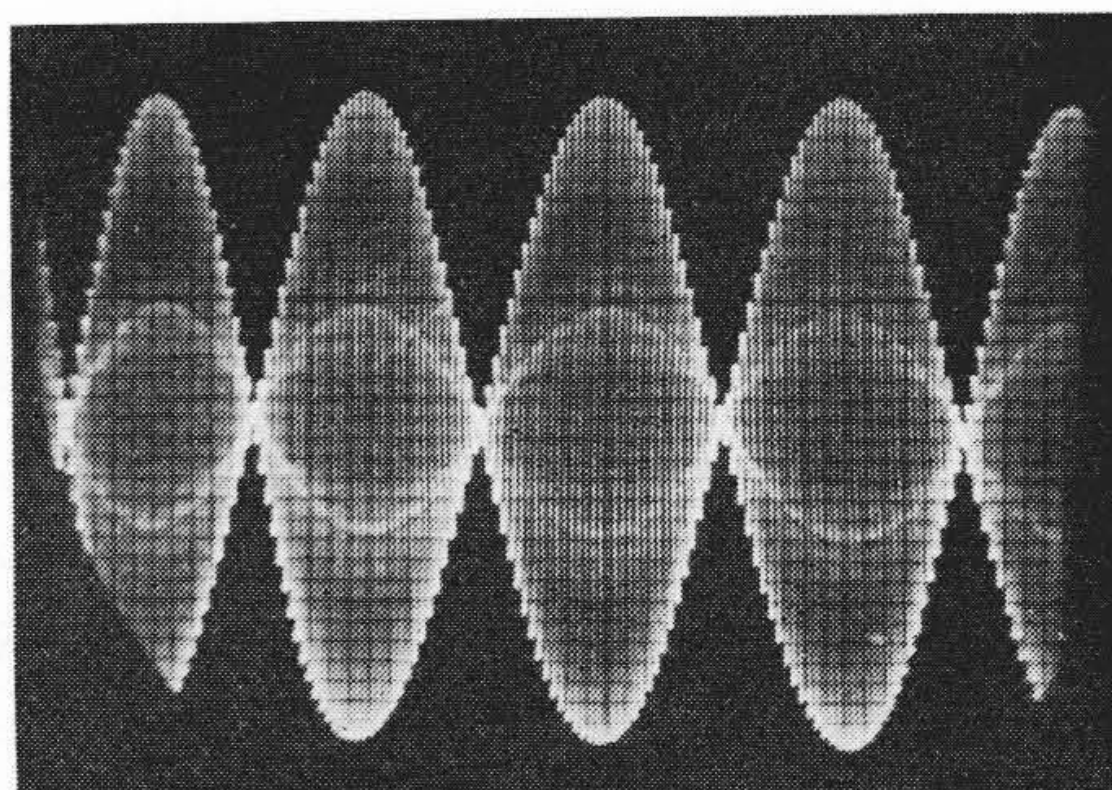
$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T x \cos \omega t dt = b_1 \sin \varphi_1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

2.3 測定装置

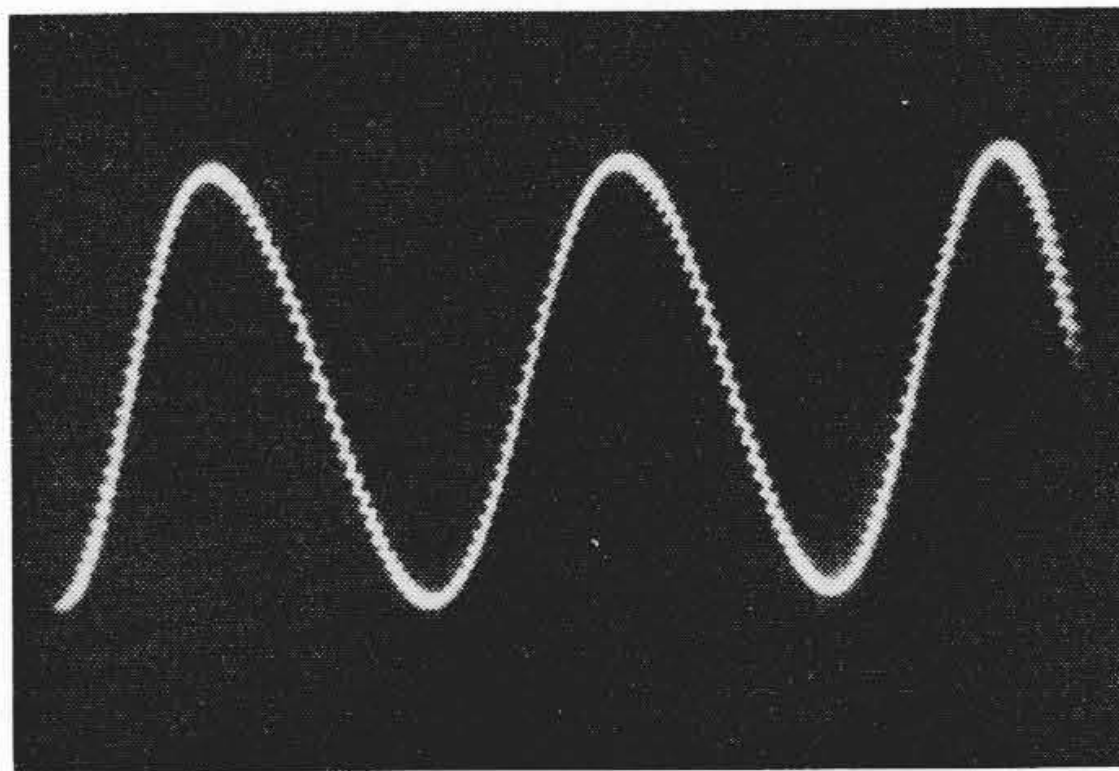
本装置は以上に述べた原理に基づくものであり、その外観図を第1図に示す。その機能の概要は第2図に示すと



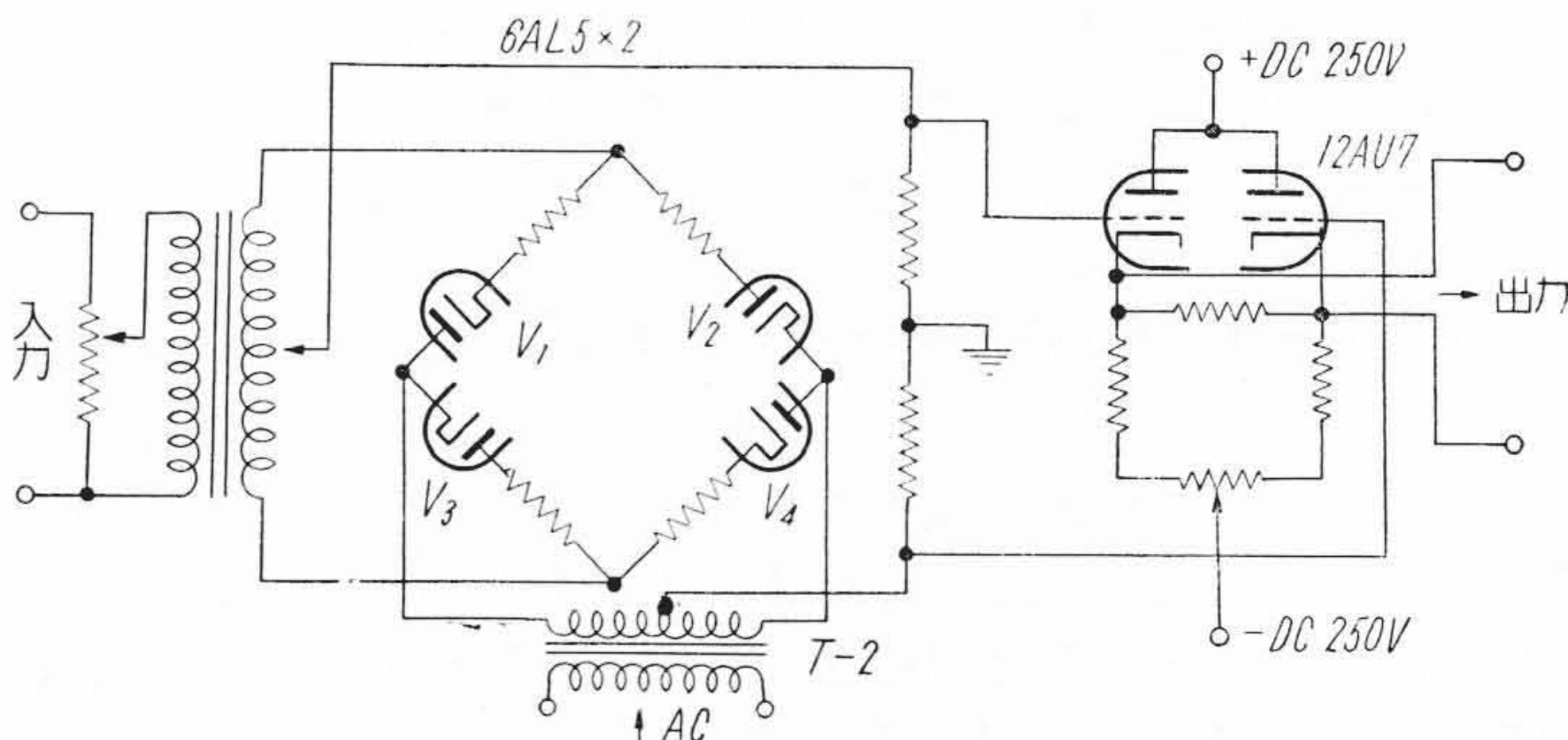
第3図 相関型サーボアナライザ系統図



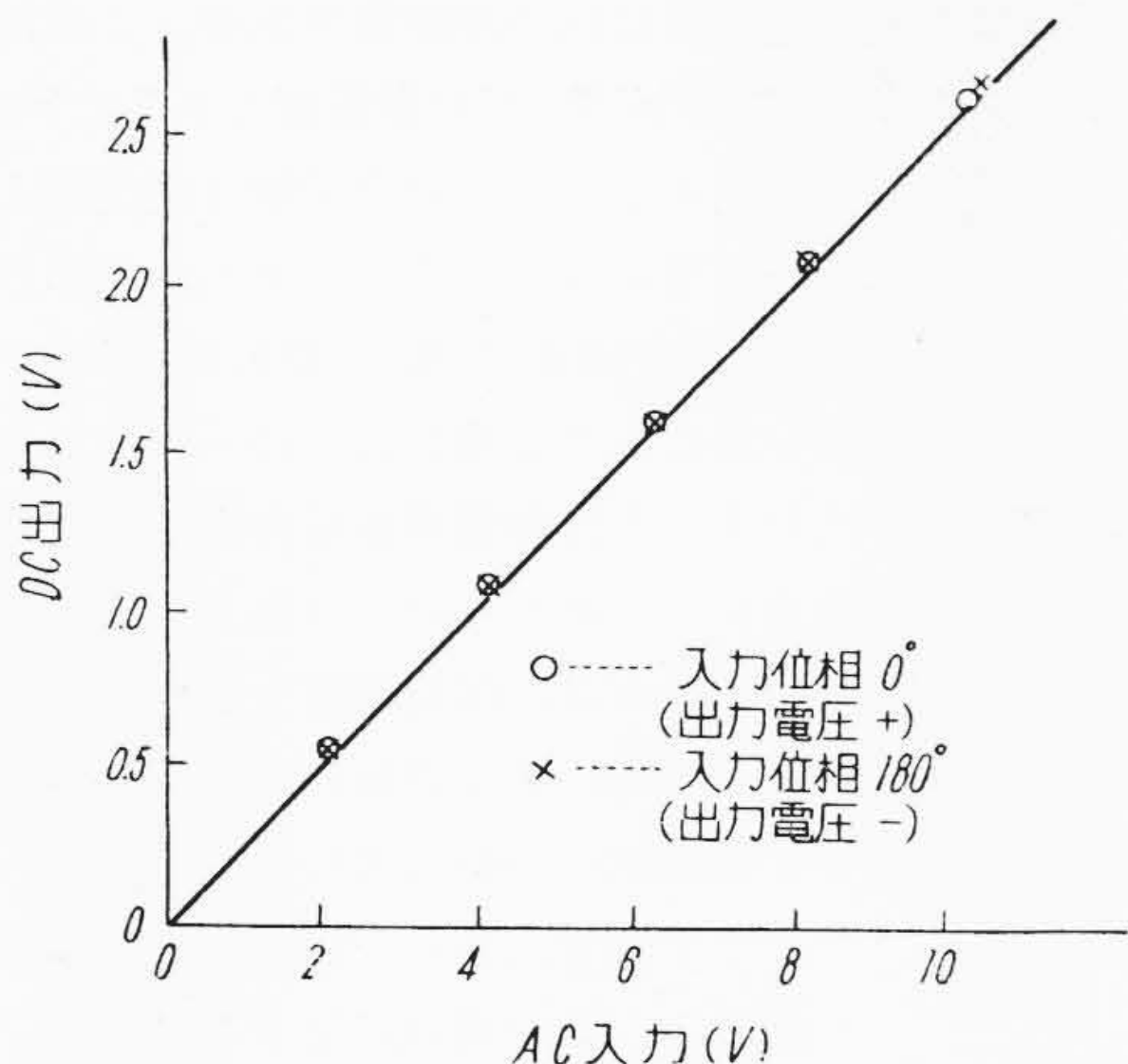
第4図 変調波形



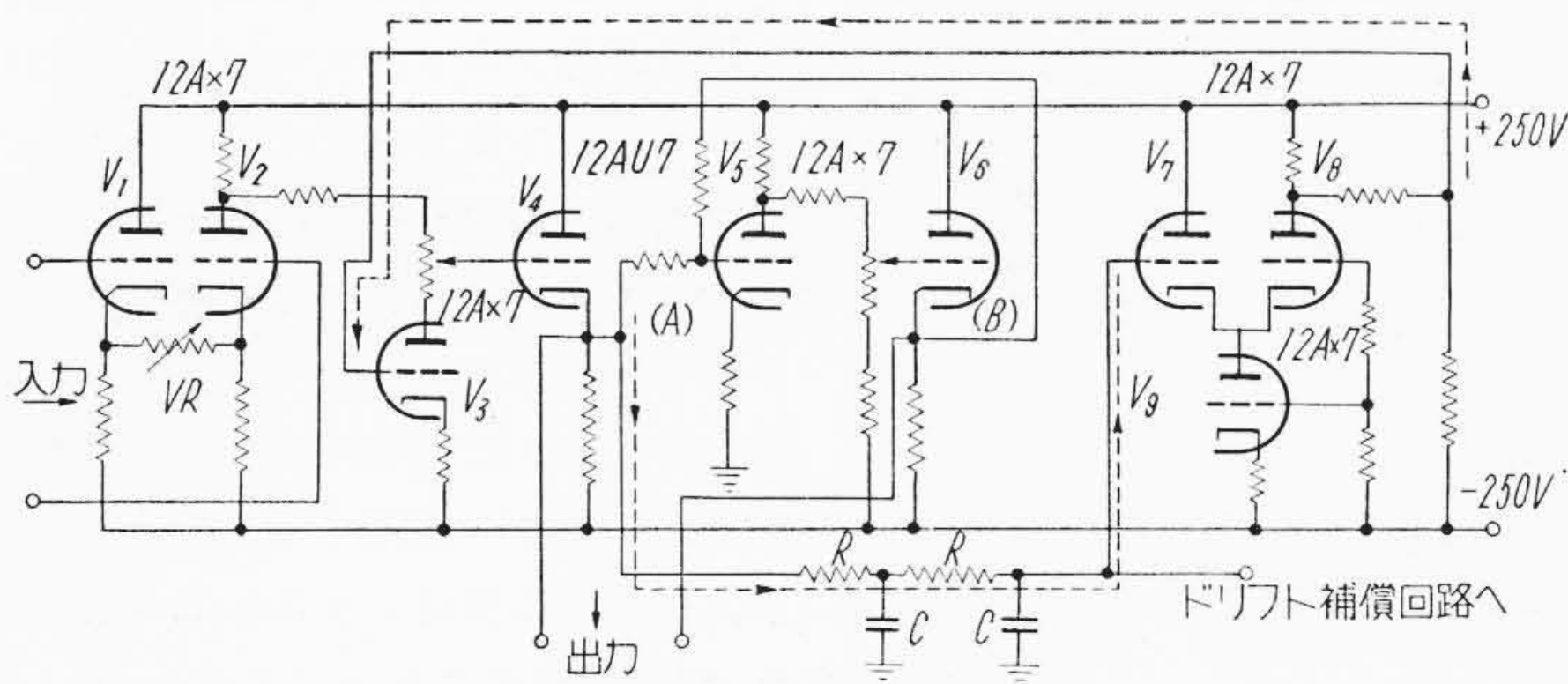
第5図 復調波形



第6図 復調器回路

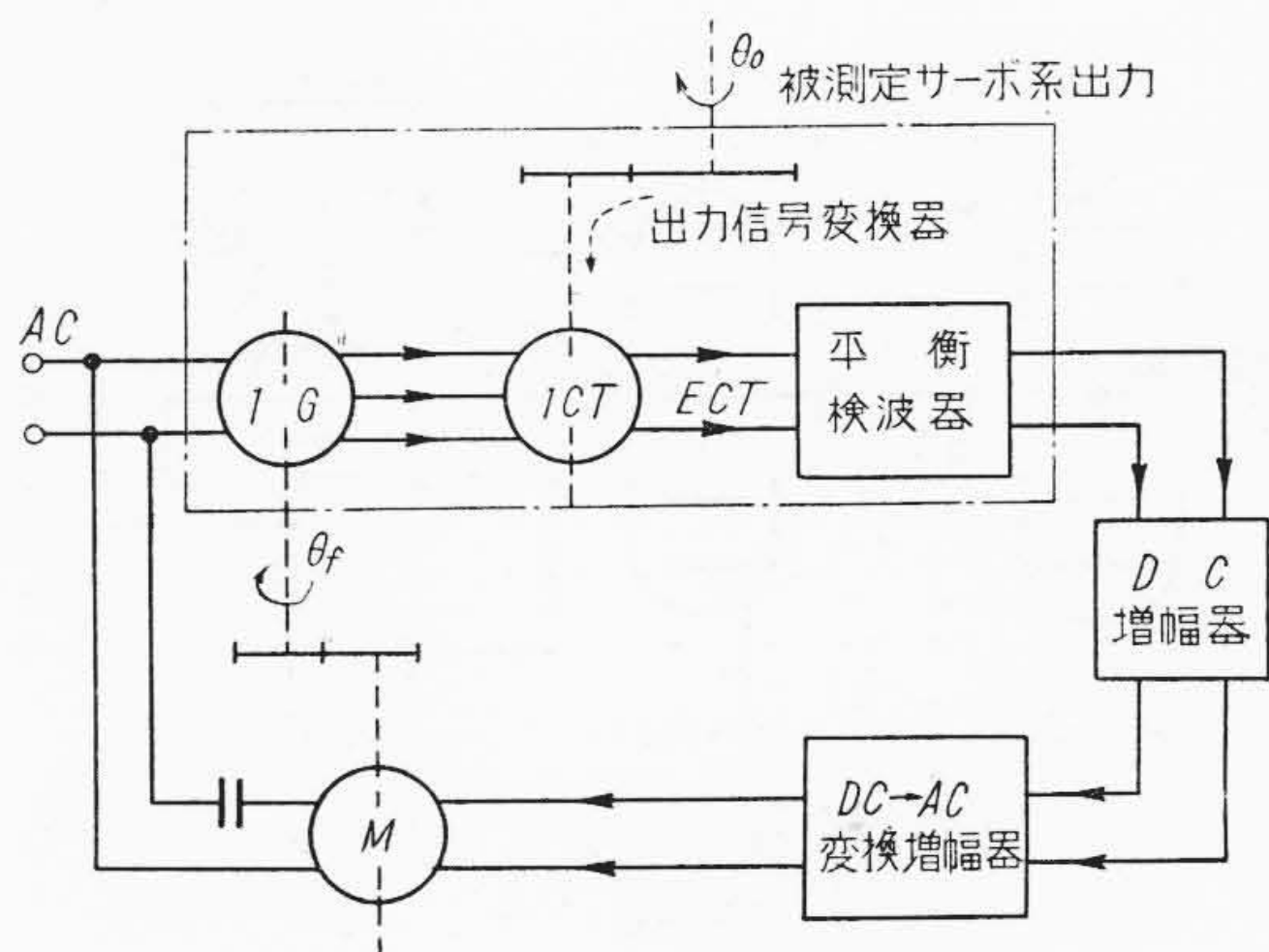


第7図 復調器特性



第8図 直流増幅器回路

おりである。今発振器から $a \sin \omega t$ が被測定サーボ系に加えられると、被測定系の出力は(1)式で表わされる。この出力に発振器と同期した正弦および余弦波を乗じて一周積分とすると、その定積分値は(2)、(3)式で表わされる基本波の振幅および位相ずれによる直交成分となる。この積分器の積分時間は発信機と同期したゲートパルスで制御されて、発信器の一周期間積分する。この積分器出力は保持回路に記憶されて表示に用いる。保持回路は積分が終つたとき、すなわち定積分値が得られたときに働くので、(2)、(3)式を解いた値を記憶する。この保持は各周期ごとのくり返しもできるし、任意の時間だけ保持することもできる。第3図は本装置の総合系統図である。タコジェネレータTG帰還による速度制御を行つた電動機Mの出力は減速装置により適当な速度になりシンクロ発信機1Gを駆動する。1Gの電気出力はシンクロ制御変圧機1CTに加えられる。シンクロ制御変圧機の出力に搬

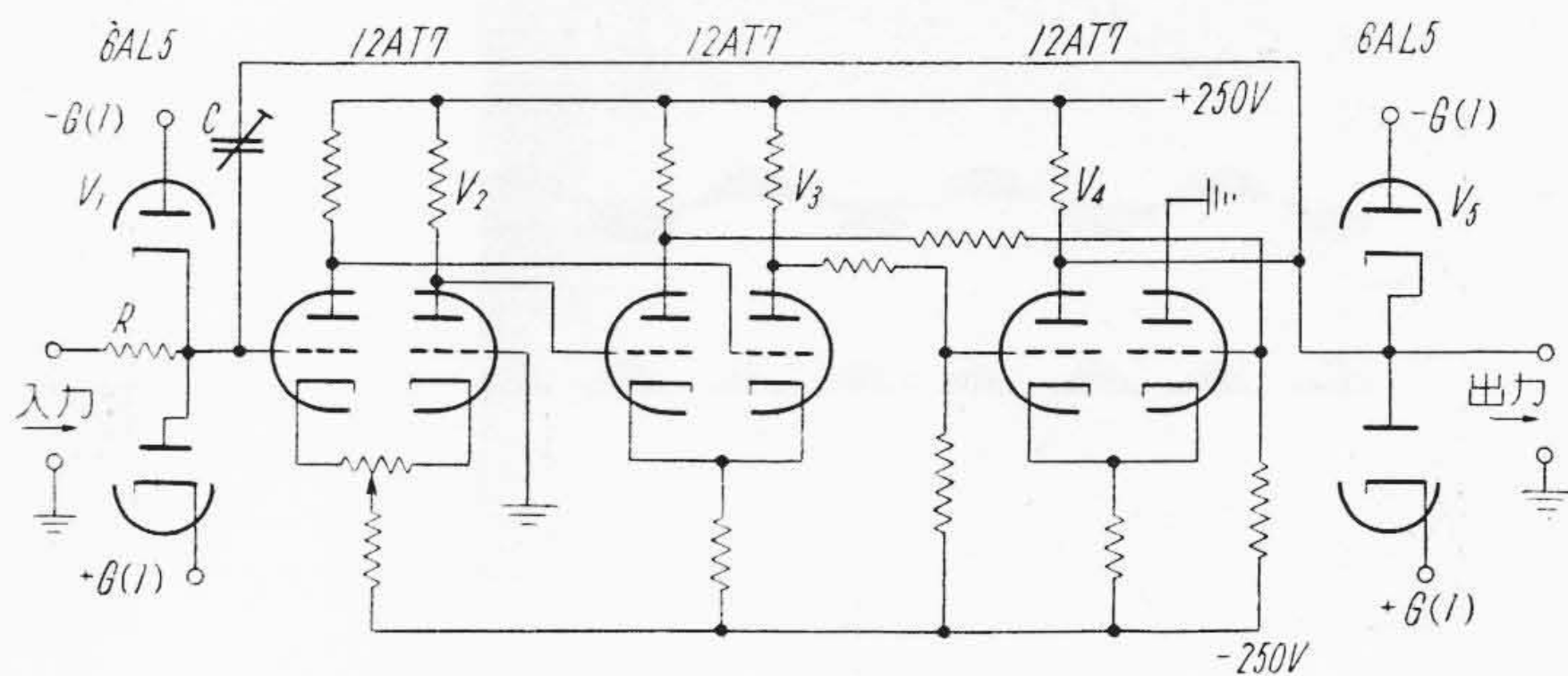


第9図 ドリフト補償回路系統図

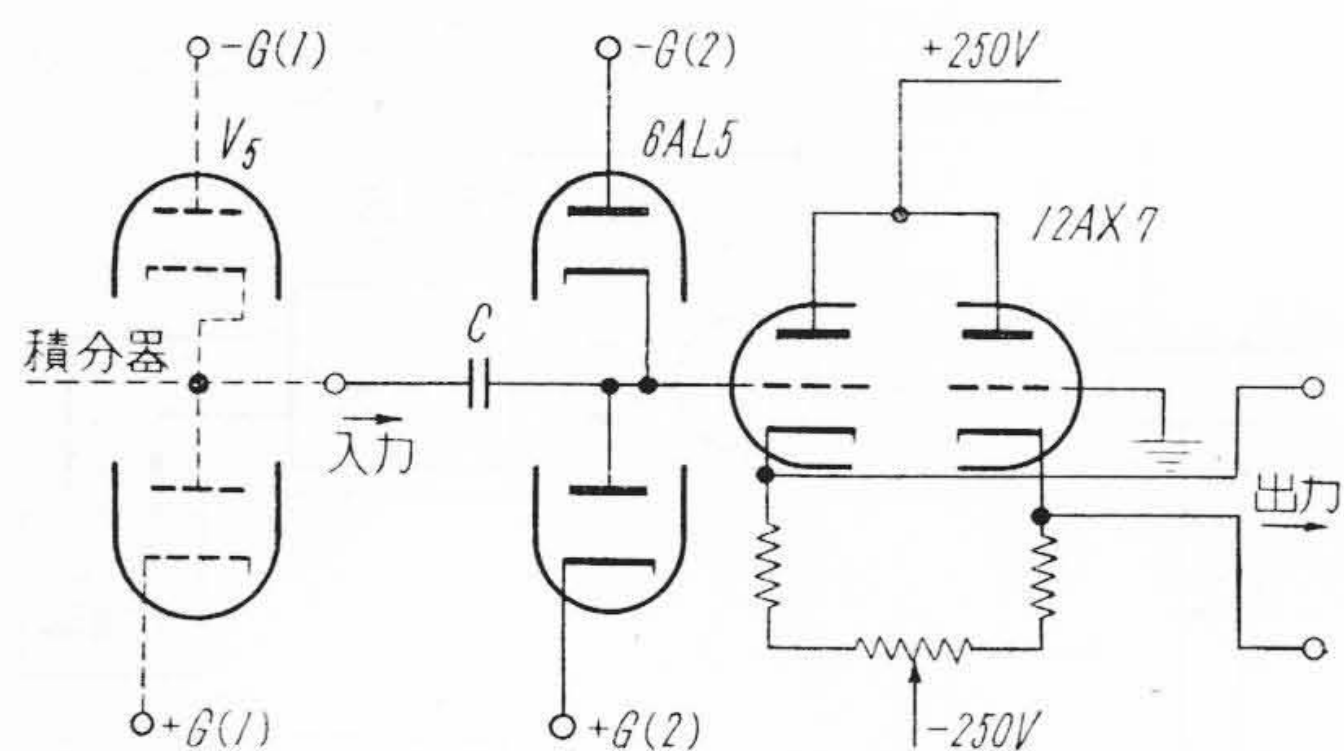
送波を機械的角速度 ω で変調した変調波を生じる。この変調波は復調器により復調して低周波信号として用いることができる。交流サーボ系の測定の場合には、変調波のままで信号とする。この信号は被測定系に加えられる。この場合の変調波および復調後低域通過波器を通した波形を第4、5図に示す。図に示すとおり信号波形はかなり良いものである。発信器の発振周波数は $0.6 \sim 60 \text{ rad/s}$ の間を15段に切り換えることができる。復調器は第6図に示すように平衡検波回路と差動増幅回路

からなり、復調特性は第7図に示すように 10 V 以下の交流入力に対して 0.5% 以下である。被測定サーボ系の出力は直流電圧に変換したのちに十分な電圧まで直流増幅器で増幅する。直流増幅器の回路は第8図に示すとおりである。被測定系にドリフトがある場合には平均電圧が零とならない。このドリフト電圧は出力信号の検出回路へ帰還してドリフトを補償する。この系統図を第9図に示す。

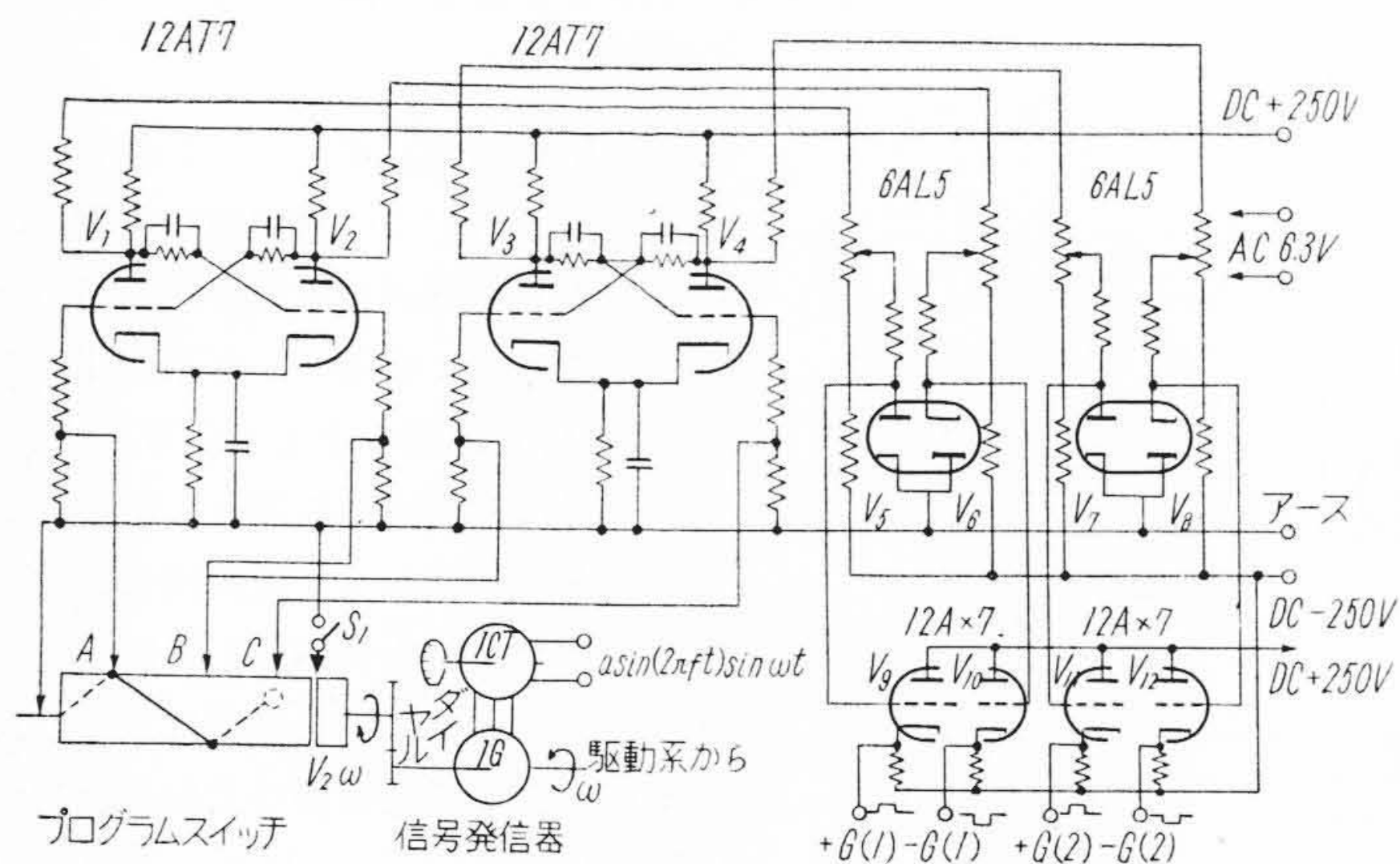
積分器は二極管ゲートをもつ三段の直流増幅器であ



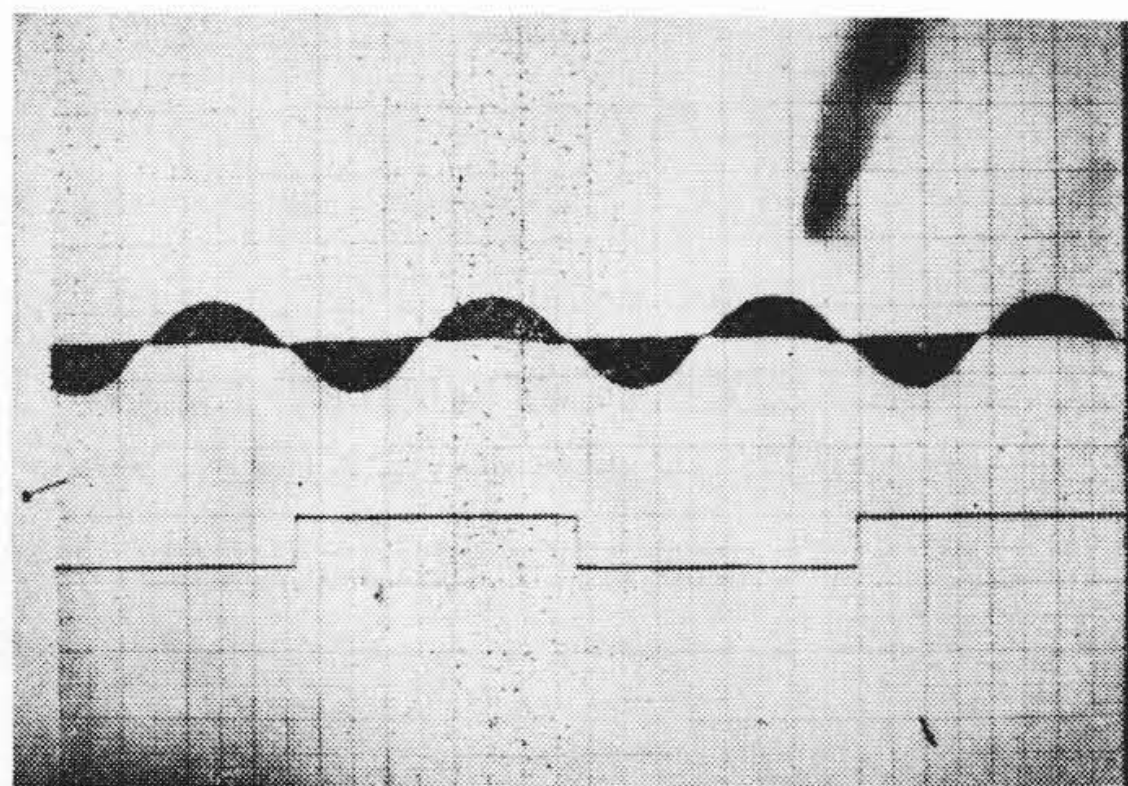
第10図 積分器回路



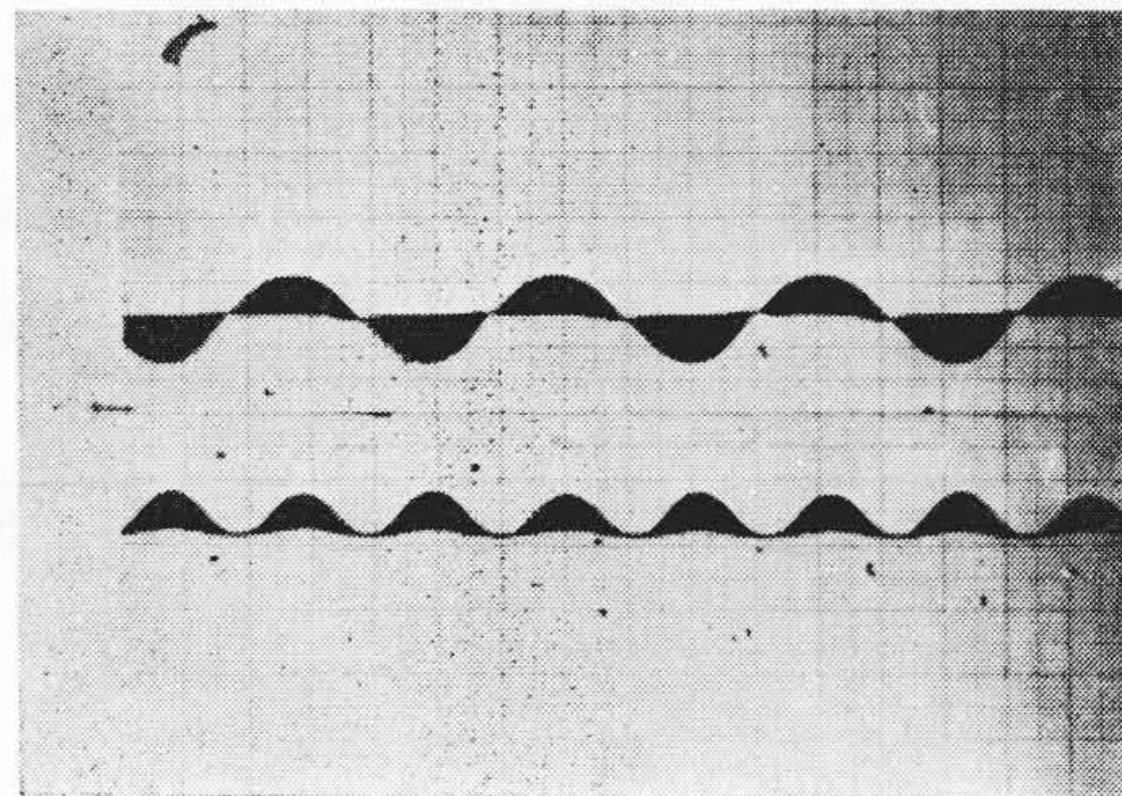
第 11 図 保 持 回 路



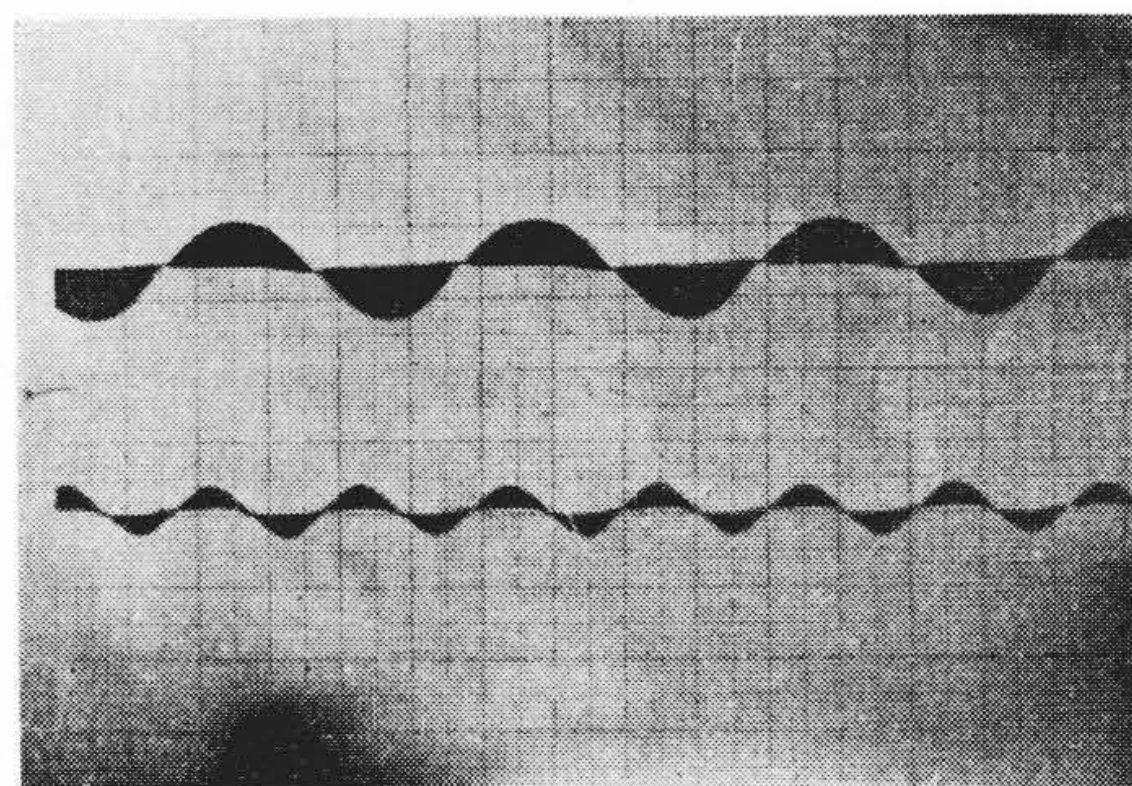
第 12 図 ゲートパルス発生回路



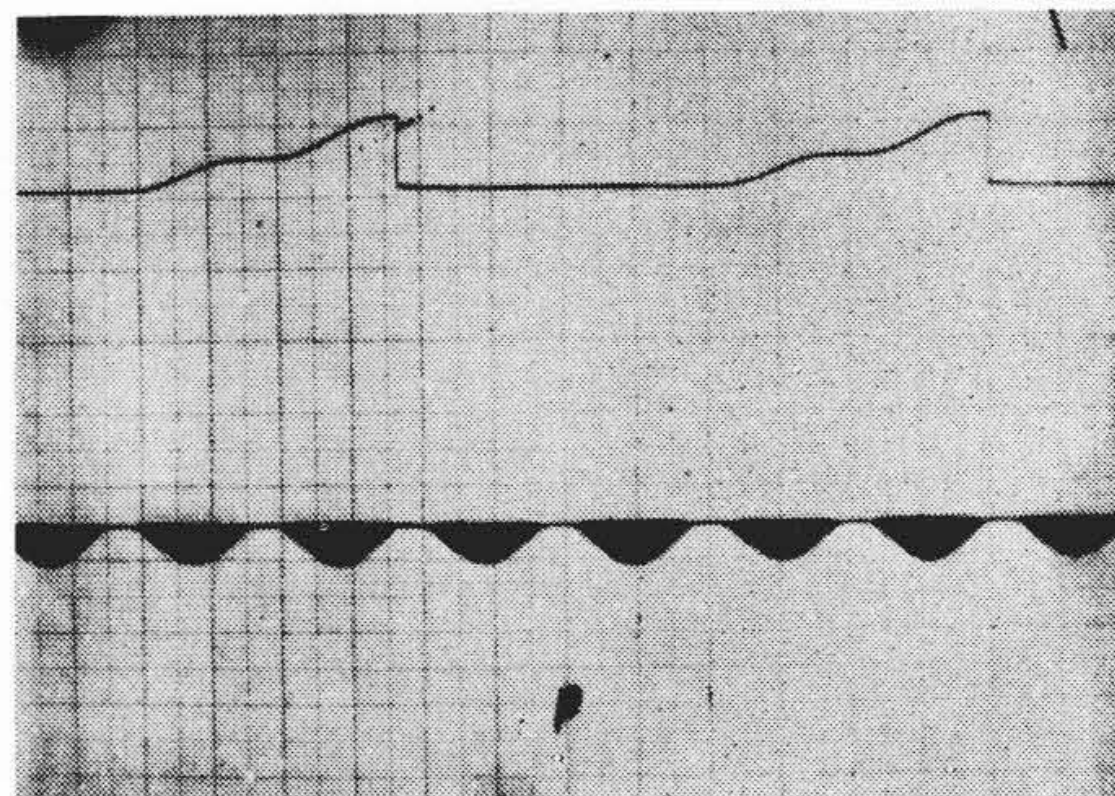
第 13 図 発信器信号とゲートパルス波形



第 14 図 Sin ωt と Sin² ωt 波形



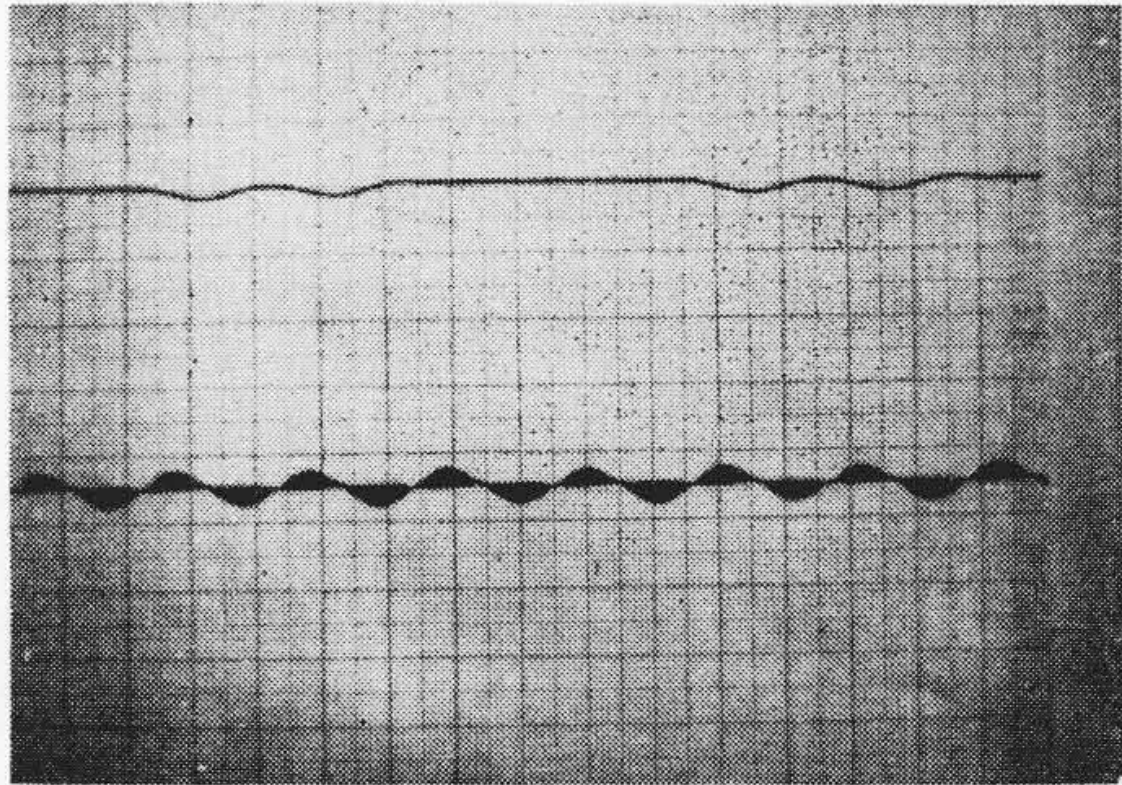
第 15 図 sin ωt と sin ωt cos ωt 波形

第 16 図 $\int_0^T \sin^2 \omega t dt$ の波形

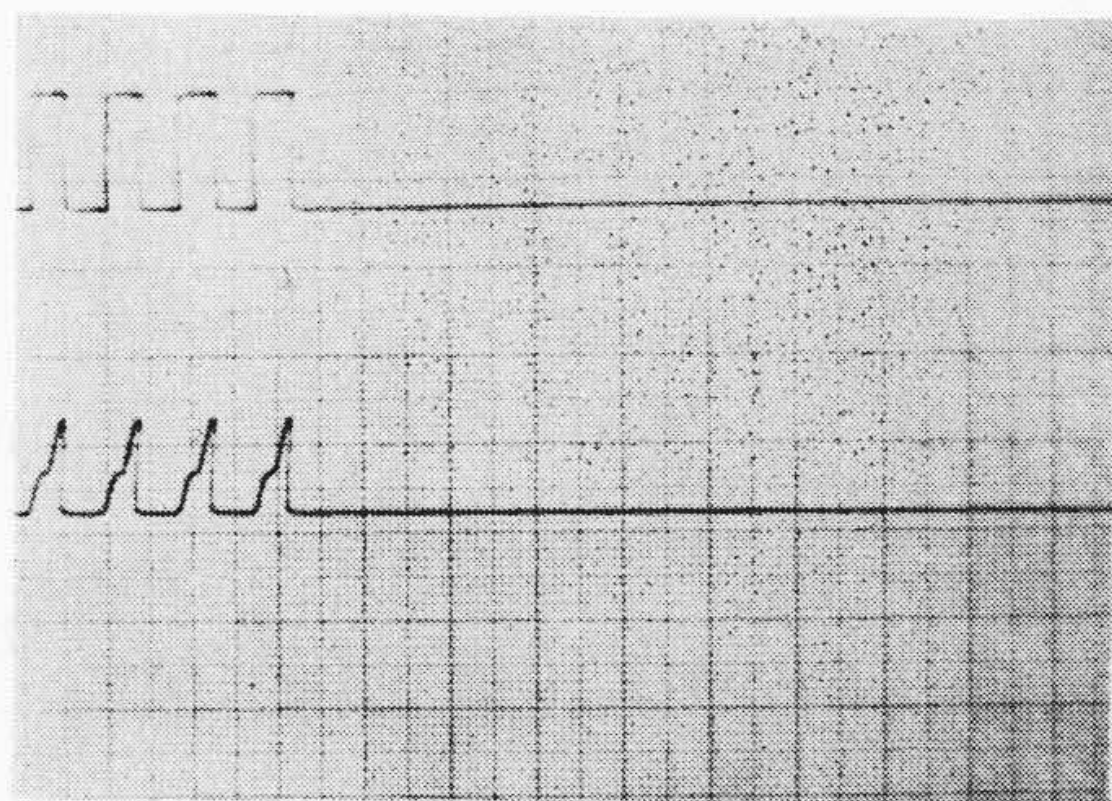
る。増幅器の開回路利得は約 5,000 倍である。この増幅器のドリフトは演算時間が最大 10 秒程度であるために、特別な補償回路を必要としない。積分定数は発信器と連動する継電器により発信周波数に応じて適当な値に自動的に切り換えられる。第 10 図が積分器の回路図である。保持回路は積分器により定積分値が得られたときの電圧を第 11 図に示すように静電容量 C の電荷として記憶し、その電圧はカソードホロワにより取り出すことができる。これらの積分器および保持回路を制御するゲートパルスは第 12 図の回路により作られる。発信器のシンクロ発信機 1G と機械的に連結しているプログラムス

イッチは発信器の一周期ごとに接点を閉じる。この接点によりフリップフロップ回路が動作して発信周波数と同期したゲートパルスを発生する。フリップフロップの出力は二極管により整形されて、カソードホロワにより出力インピーダンスを十分低くしたのちに、積分器および保持回路のゲートへ加えられる。プログラムスイッチのチャタなどの雑音に対しては、それらの影響を防ぐように電気回路を考慮した。積分と保持を一周期ごとにくり返えすか、連続的に保持させるかはスイッチ S_1 で制御することができる。

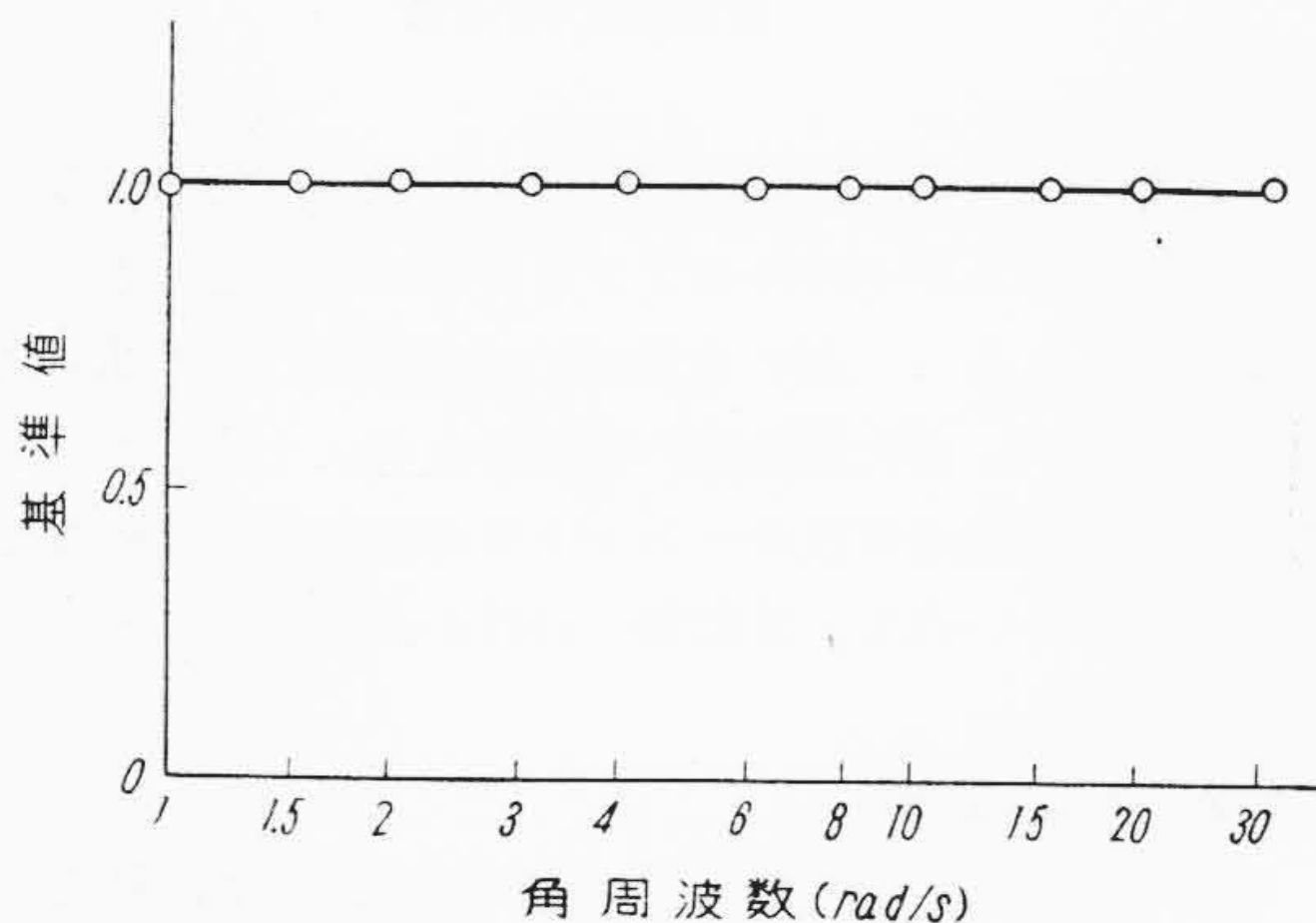
本装置の精度に影響するものとして



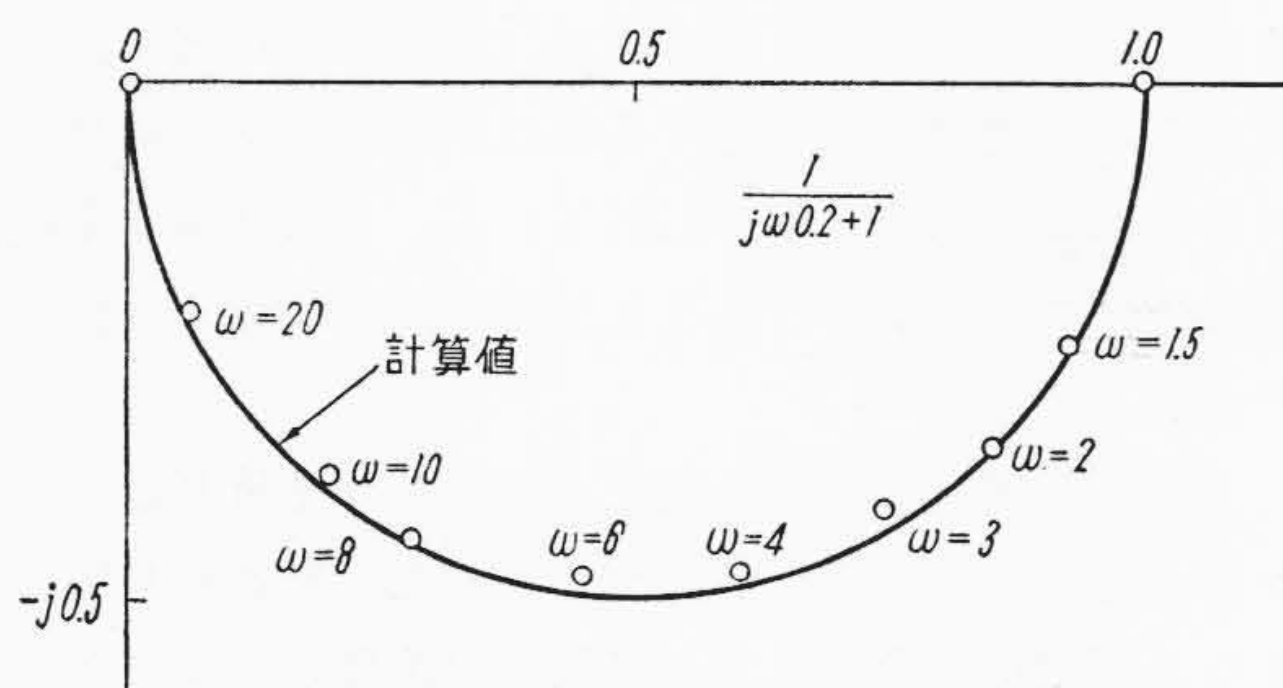
第17図 $\int_0^1 \sin \omega t \cos \omega t dt$ の波形



第18図 定積分と保持の波形
(保持信号は負になっている)



第19図 相関型サーボアナライザ周波数特性



第20図 CR 低域濾波器特性

は発信器用シンクロ、復調器、正弦余弦ポテンシオメータ、積分器、保持回路などの誤差や、発信器の電動機速度、ゲートパルス幅などがあるが、最も大きく精度に関係するものはシンクロおよび正弦余弦ポテンシオメータの関数誤差である。

2.4 測定例

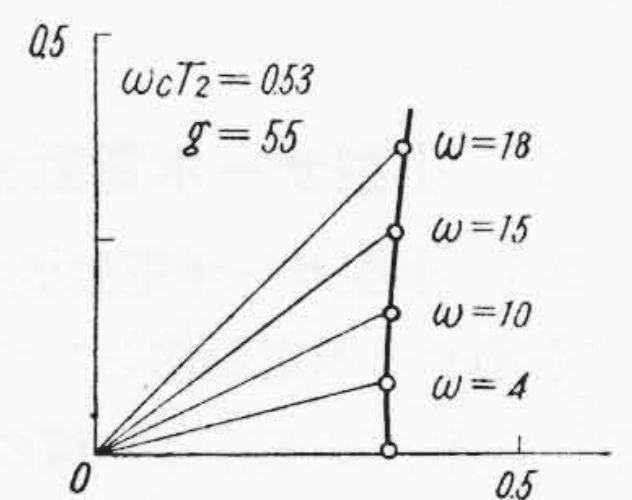
本装置の測定例として、基準値 (1, jo) を測定する場合の装置各部の波形および総合周波数特性、CR 低域濾波器の伝達関数、交流サーボ用ブリッジT型進相補償回路の伝達関数および平衡電動機の入力電圧に対する記述関数を示す。

第13～18図は基準値を測定する場合の波形である。第13図は発信器出力を復調した波形とゲートパルスを示す。1周期ごとにゲートが開閉する状態を示している。第14図は正弦ポテンシオメータにより $\sin \omega t$ が乗じられて $\sin^2 \omega t$ が、第15図は同様に余弦ポテンシオメータにより $\sin \omega t \cos \omega t$ が作られる様子を示す。第16, 17図はそれぞれ $\sin^2 \omega t$ と $\sin \omega t \cos \omega t$ が1周期積分される状態を積分器の出力電圧により示したものである。第18図は積分器と保持回路の出力とを示したものである。定積分値が保持される関係が示されている。後半は連続保持の状態である。

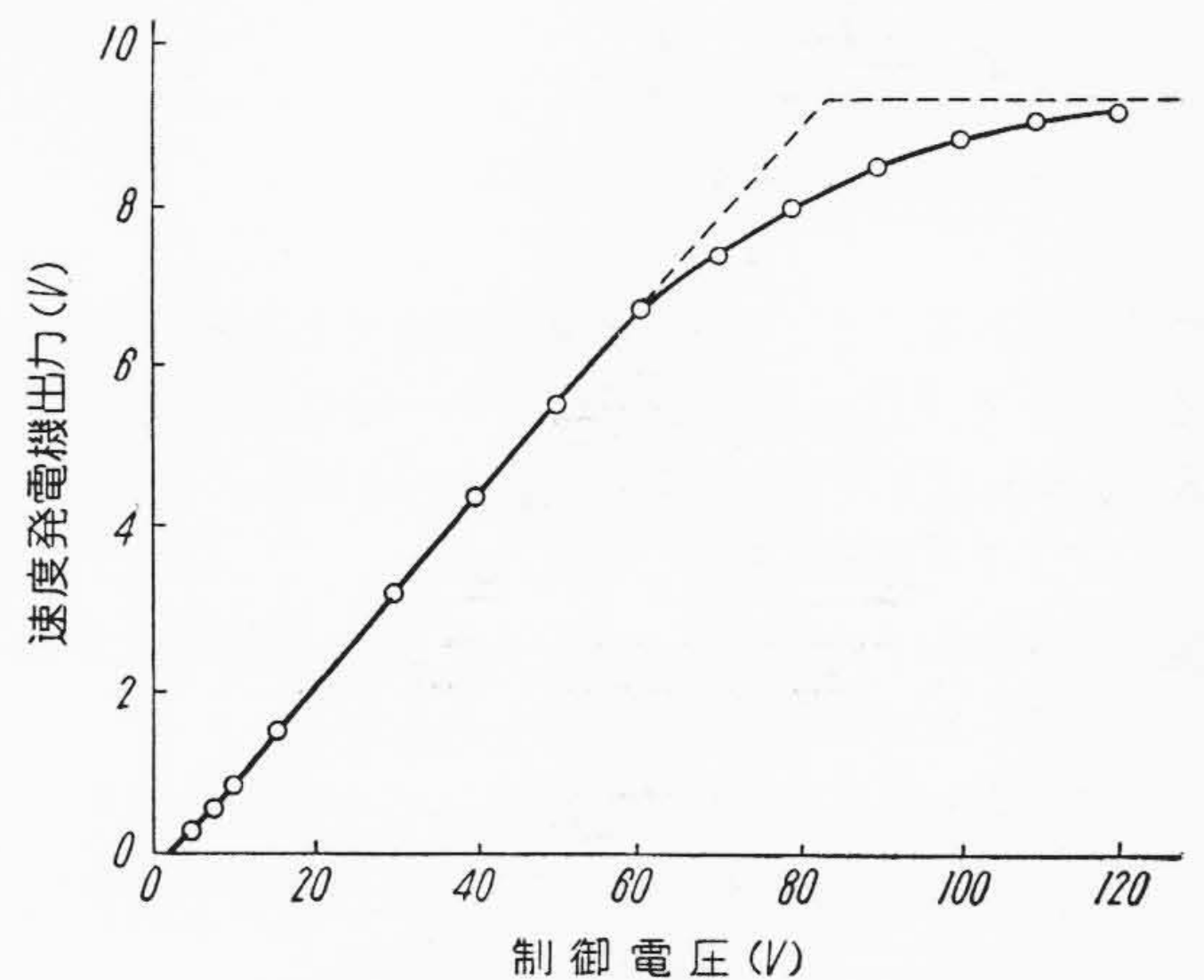
第19図は基準値に対する周波数特性であるが、ほとんど平坦な特性を示している。

第20図は CR 低域濾波器の伝達関数を測定したものであるが、絶対値で約3%、位相ずれで約3度以下の誤差である。

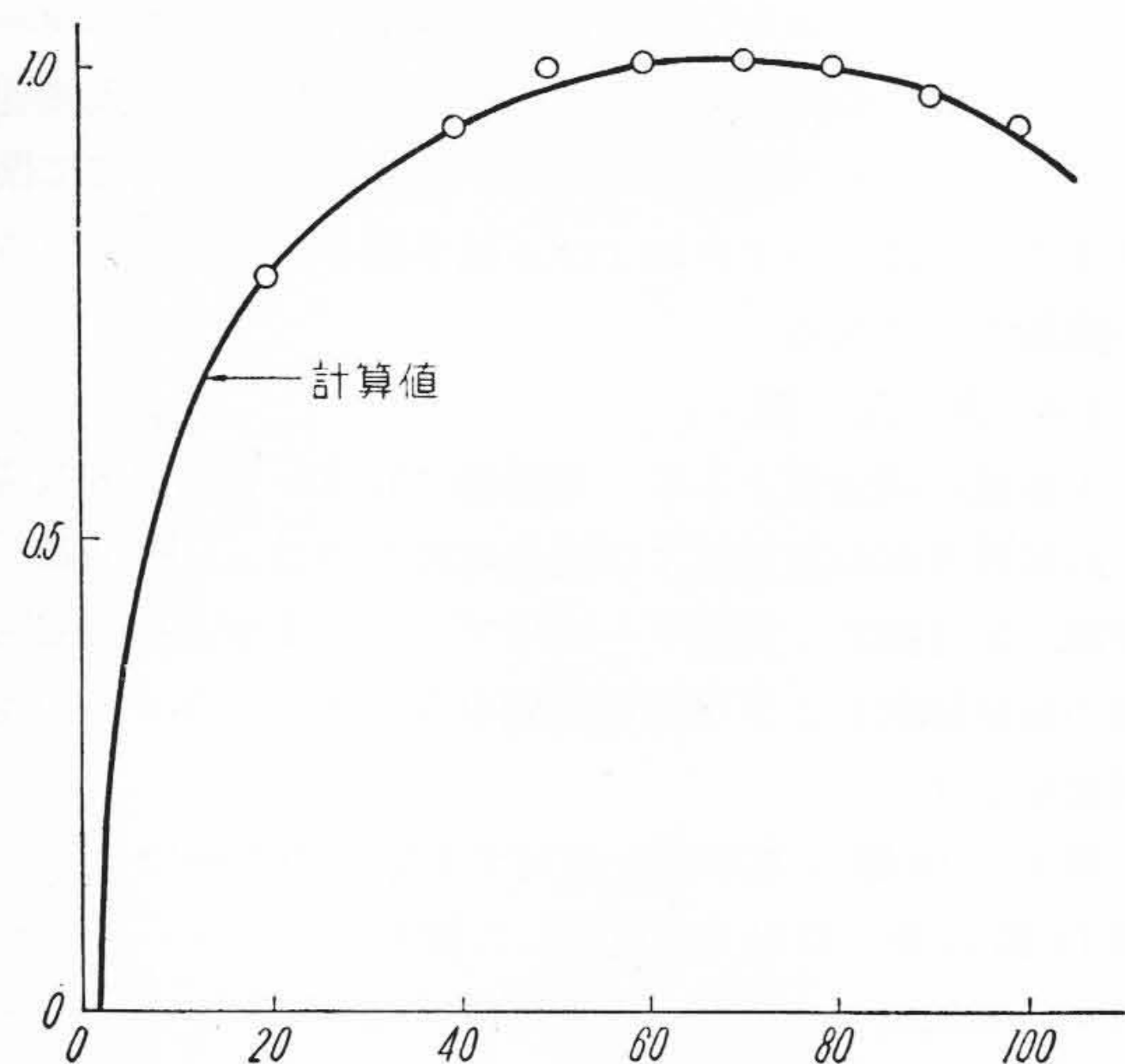
第21図はブリッジT型補償回路の伝達関数の測定



第21図 ブリッジT型補償回路特性



第22図 平衡電動機静特性



第23図 平衡電動機記述関数
($\omega = 2.0 \text{ rad/s}$)

値である。従来交流補償回路の特性については各種の計算法⁽⁵⁾が発表されているが、本装置では比較的簡単に特性を知ることができる。

第22図は測定した平衡電動機の静特性であり、第23図は本装置で測定した記述関数であるが、静特性から不感帯3V、飽和85Vとして計算した計算値とよく一致している。

3. 小型サーボ電動機の特性和その測定装置

3.1 小型サーボ電動機の特性和

小型サーボ電動機としては二相誘導電動機が最も多く用いられている。この種の電動機の理想的な特性は第24図に示すようなものである。実際の電動機ではこの速度回転力特性が曲つたものが多いが、近似的に直線と考えて一応の取り扱いができる。第24図でトルク T は

$$T = \frac{\partial T}{\partial e_i} e_i + \frac{\partial T}{\partial n} n \dots\dots\dots (6)$$

ここに e_i : 制御電圧

n : 角速度

で表わされる。ここに e_i と n は独立であると考えている。ここで $\partial T / \partial e_i$ および $\partial T / \partial n$ が一定でそれぞれ K_e , K_n とすればトルクは(7)式で表わされる。

$$T = K_e e_i - K_n n \dots\dots\dots (7)$$

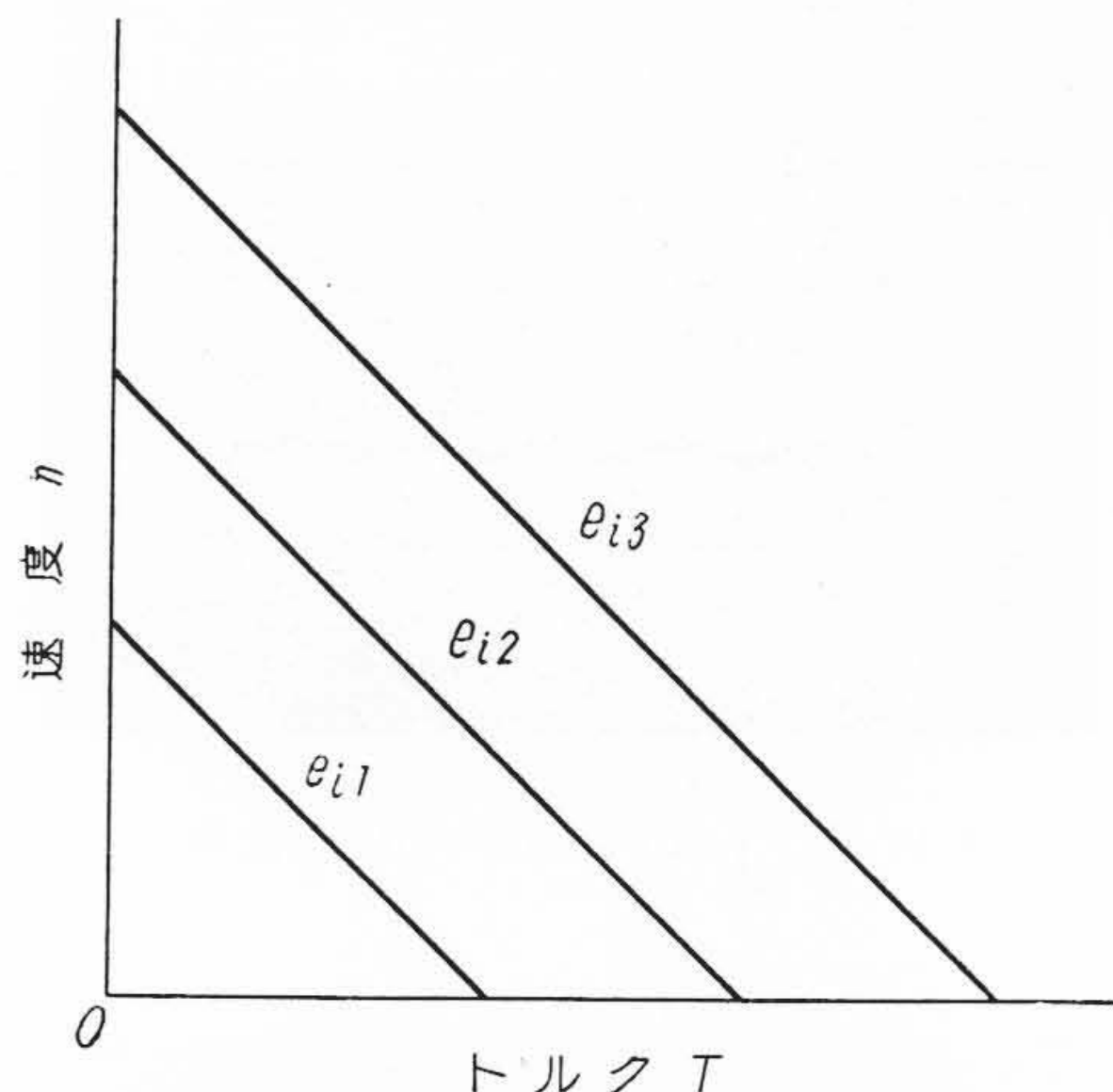
電動機の回転子の慣性モーメントを J_m , 摩擦係数を f_m とすれば、次の運動方程式が得られる。

$$K_e e_i - K_n n = J_m s^2 \theta_0 + f_m s \theta_0 \dots\dots\dots (8)$$

$$n = s \theta_0 \dots\dots\dots (9)$$

ここに θ_0 : 電動機出力回転角

この式から電動機の伝達関数は



第24図 理想的なサーボ電動機のトルク—速度特性

$$KG(s) = \frac{K_m}{s(s\tau + 1)} \dots\dots\dots (10)$$

$$K_m = \frac{K_e}{K_n + f_m} \dots\dots\dots (11)$$

$$\tau = \frac{J_m}{K_n + f_m} \dots\dots\dots (12)$$

ここに K_m : 電動機の利得

τ : 電動機の時定数

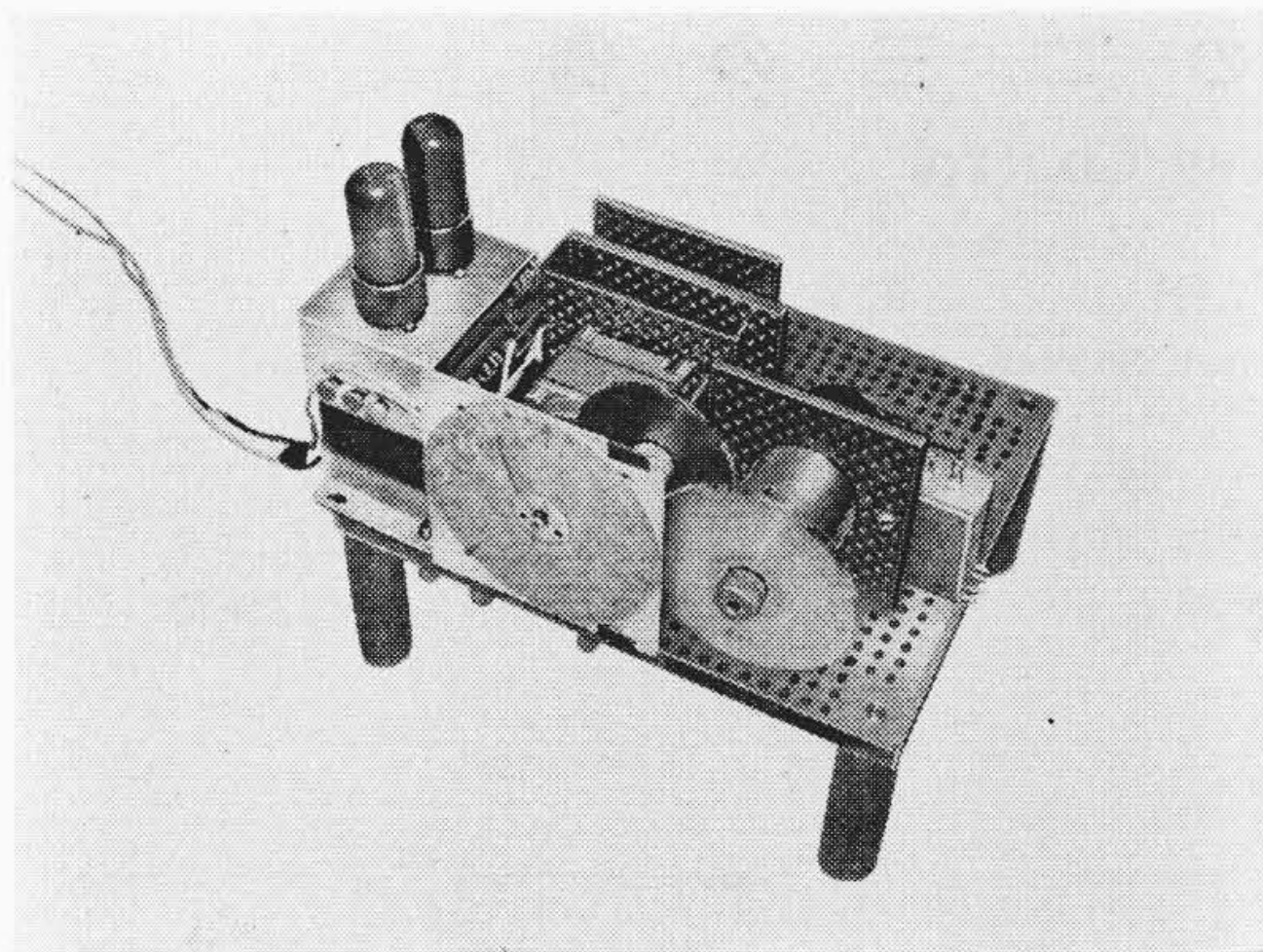
となる。

したがってサーボ電動機の特性を近似的に求めるには、電動機のトルク特性および速度特性を測定することにより得られる。一般に電動機の摩擦係数 f_m は K_n に比べて小さい。また電動機の機械的負荷は十分小さいかあるいは電動機の慣性モーメントや摩擦係数と同程度であることが多いので、電動機の特性が系の特性に大きな影響を与える。

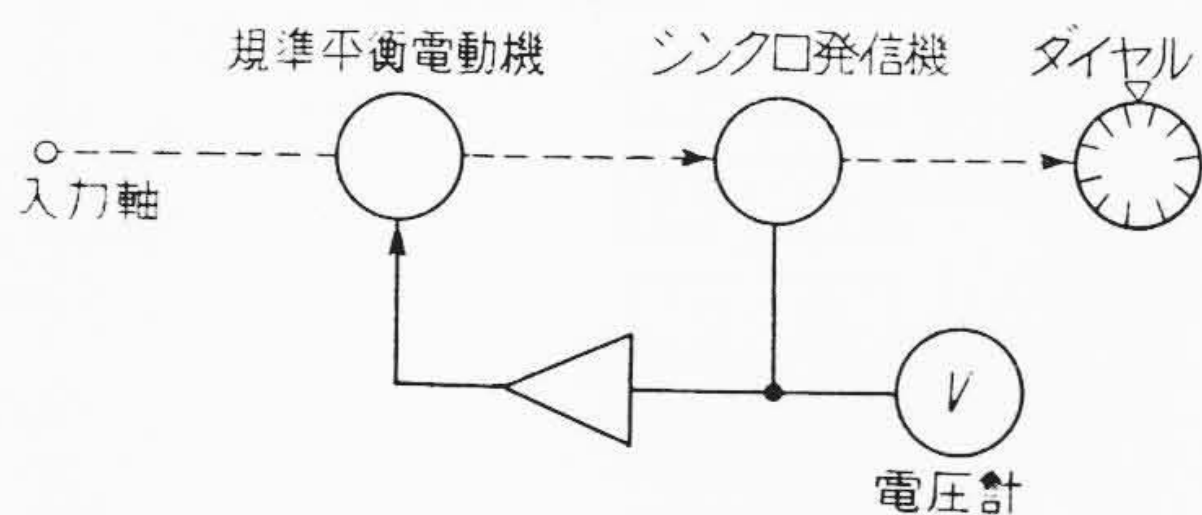
3.2 測定装置

以上に述べたように電動機の動特性を近似的に知るためには、電動機のトルク—速度特性および慣性モーメントを測定すればよい。回転子の慣性モーメントを測定することは精密な電動機では分解、組立が困難であり、望ましくないためにできにくい。通常は製造者が公表している。速度特性を測定するには一般にストロボスコップを使用する方法が用いられている。これは被測定電動機に余分の負荷を付けることがないためにすぐれた方法である。

トルクを測定するには従来バネばかりや重りとアームを用いていたが、測定が面倒であつた。われわれはこのトルク測定を能率的にする目的で平衡型のトルク計を試作して電動機のトルク特性の測定に用いている。本装置

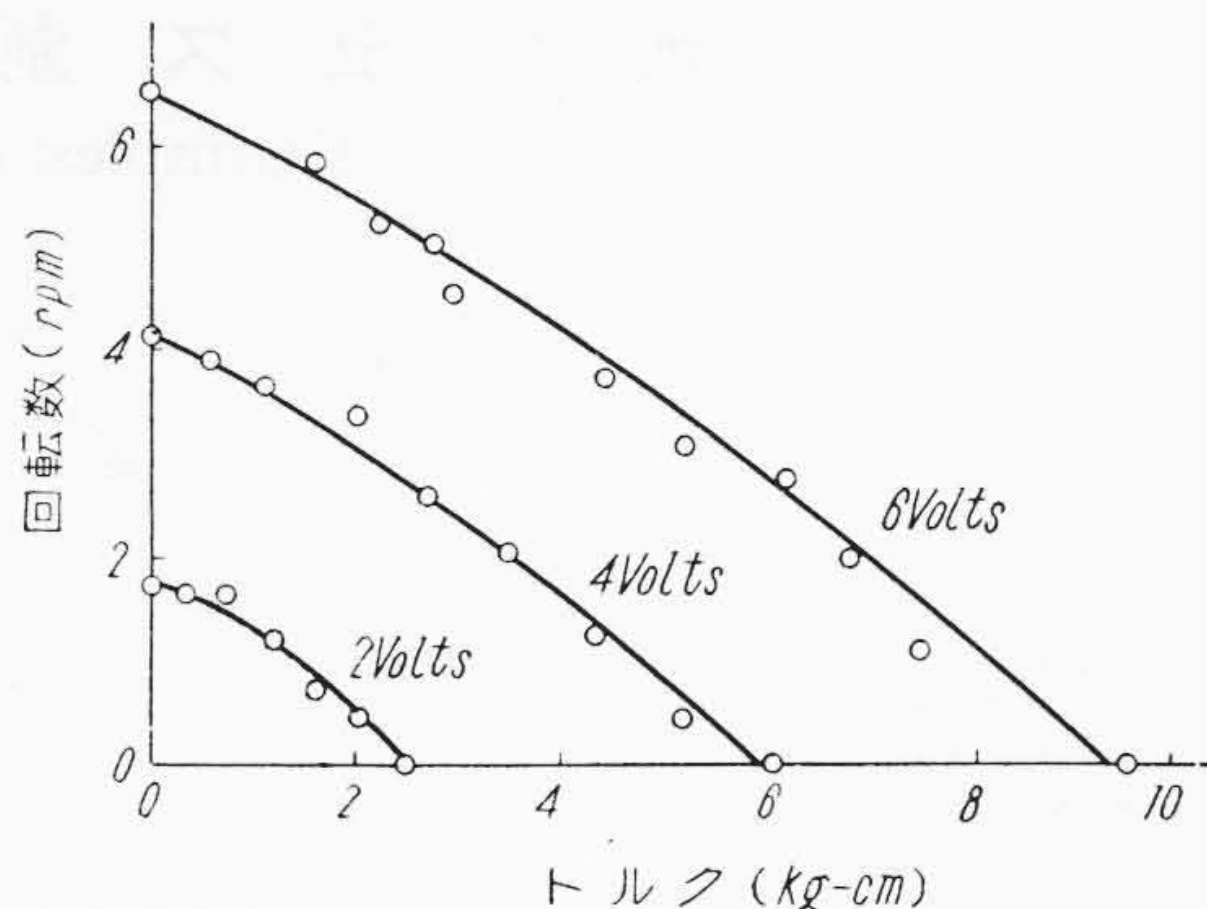


第25図 平衡型トルク計の外観



第26図 平衡型トルク計の構成

の外観は第25図に示すものである。第26図に示すように加えられた被測定トルクにより規準となる電動機とシンクロ発信機が回転し、規準電動機のトルクと被測定トルクが平衡する点で停止する。一般に平衡電動機の電圧と停動トルクとの関係は直線的であるから、平衡に達した場合の回転角はトルクに比例する。第27図は本装置と速度発電機を用いて測定した小型直流電動機の特性である。



第27図 小型サーボ電動機のトルク—速度特性

4. 結 言

小型サーボ機構の計画あるいは設計にあたりまず必要となる制御要素、制御対象の動特性を測定する装置を試作した。これらを用いることにより制御系の設計を著しく正確で能率的にすることができる。終りに本研究に対し終始絶大なる御指導と御援助をいただいた日立製作所中央研究所須藤博士に厚くお礼申し上げる。

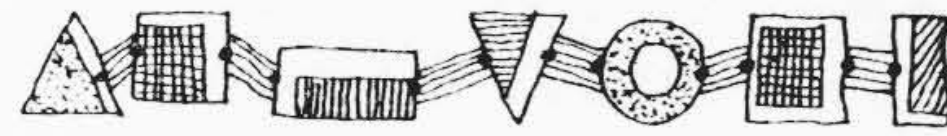
参 考 文 献

- (1) G. S. Brown and D. P. Campbell: Principles of Servomechanisms
- (2) R. J. Kochenburger: Trans. AIEE, 69, I, 270 (1950)
- (3) 竹田, 福島: 自動制御研究集会資料 94 (1957)
- (4) 野本: 自動制御 4, 3, 183 (1957)
- (5) A. Sobczyk: Jour. Franklin Inst. 246, 21 (1948)



特許第216577号

特 許 の 紹 介



広 吉 秀 高

自 動 調 整 制 御 装 置

同期発電機の界磁自動制御を電圧調整継電器によつて行う際まず発電機が起動し運転状態となり、その発生電圧がある予定値に達したところで電圧調整継電器を自動界磁調整に参加せしめんとする場合には、電圧調整継電器の整定値と発電機出力電圧のそのときの値に大なる開きがないことが円滑動作上最も望まれることであるが、実際はたいていかなりの開きがあつてそのために電圧調整継電器は自己の整定値まで一気に発電機界磁励磁度の制御を強行して乱調の原因となることがある。本発明はこの点に着目し発電機の起動運転中に電圧調整継電器を参与させるに際しては、はじめにまず継電器を制御に入

れる動作によつて電圧継電器の動作整定と発電機出力電圧のその時の値とを平衡させる手段を発動させ、発電機の電圧が事実規準値より相当に偏よつていても電圧調整継電器の動作線輪には整定値近き電圧を付与し、そこではじめて電圧調整継電器の動作を発電機界磁の自動制御に及ぼすようにしたことを要旨とするものである。このようにすれば予備動作なきまま電圧調整継電器の状態いかににかかわらず自動調整に突入する従来の方法のように系統に擾乱を生ずる不安を解消することができる。

(宮崎)