

UN MICROFOTOMETRO A REGISTRAZIONE AUTOMATICA DELL'INTENSITÀ

Nota di A. KRANJC (*)

(Osservatorio Astronomico di Merate)

RIASSUNTO. — Si descrive un servomeccanismo in cui l'entrata è data dalla trasparenza della lastra fotografica e l'uscita, registrata su un foglio di carta, è proporzionale all'intensità della luce. La trasformazione viene ottenuta a mezzo di controreazione sul circuito d'ingresso, il cui valore è funzione dell'uscita in modo regolabile a piacere mediante undici potenziometri.

ABSTRACT. — Generally a microphotometer records transparency of the plate; with the aid of the characteristic curve it is possible to transform the values of transparency into values of intensity. We can avoid the numerical calculation if the amplifier of the photo-electric current delivered by the microphotometer instead of a linear has a response curve similar to the calibration curve and if this curve is easily changed. This is obtained using a Philips recorder, with two potentiometers: the first one is used for the balance of the input signal, the second one is originally used to control the temperature of an oven. We use it with a d.c. tension of 6 V. The contact connected with the pen is subjected to a tension, which is a function of the position of the pen itself and which is sent back at the input of the d.c. amplifier as a negative feedback signal.

If the tension on the contact were proportional to the distance from the end of the potentiometer, we would have still a proportional system. But the potentiometer is tapped at 11 points by the sliding contact of 11 potentiometers connected to the same 6 V d.c. source. With this arrangement the feedback potential is varied easily and the characteristic curve of the plate is approximated by a broken line with 11 straight sides.

Il microfotometro tipo Moll presenta alcuni svantaggi pratici che riassumiamo.

1) La sensibilità della termocoppia è insufficiente, ciò che richiede fenditure esploranti di grandi dimensioni, non sempre possibili, lampadine di forte potenza, il cui calore dissipato introduce sensibili deformazioni termiche nel microfotometro. A tutti questi inconvenienti si è recentemente ovviato a Merate sostituendo alla termocoppia un fotomoltiplicatore tipo 931 A.

2) Viene impiegata della carta sensibile, ciò che richiede tempo per lo sviluppo, e quindi non si può vedere il risultato che parecchio tempo dopo l'esplorazione, con impossibilità di una tempestiva correzione in caso di cattivo funzionamento del microfotometro, ad es. nel caso di sfo-

(*) Ricevuta il 15 ottobre 1957.

camento. A ciò si aggiunga il costo non indifferente della carta sensibile, la limitata altezza dei microfotogrammi, l'impossibilità di avere su un unico foglio sensibile tutto il microfotogramma, perdendo così la visione generale dello spettro, e quindi la necessità di fermare ogni tanto il microfotometro per cambiare la carta nel rullo, rifacendo due volte circa il 10% dello spettro per i necessari raccordi tra foglio e foglio ecc.

3) Si hanno solo due ingrandimenti possibili: 4.125 e 50 volte, mentre alle volte fa comodo avere maggior scelta.

4) Non esiste la possibilità di compensare nemmeno parzialmente le piccole ed inevitabili variazioni della tensione degli accumulatori che alimentano la lampadina.

5) Inconveniente più grave di tutti, si ottiene la registrazione delle trasparenze dalle quali, con procedimento semplice ma lungo, si deve necessariamente risalire alle intensità.

A tutti questi svantaggi è stato ovviato costruendo un amplificatore di corrente continua (V. fig. 1) con resistenza d'ingresso di $11 \cdot 10^6 \Omega$, resistenza d'uscita massima 200Ω , accoppiato ad un registratore potenziometrico Philips tipo PR 2200 A/21 di sensibilità 5 mV a fondo scala, la cui larghezza è di 250 mm ; sensibilità massima del sistema amplificatore più registratore uguale a 210 mV , stabilità di zero dopo $1/4$ ora dall'accensione entro 2 mV per un periodo di qualche ora, e $200 \mu\text{V}$ a periodo di qualche minuto.

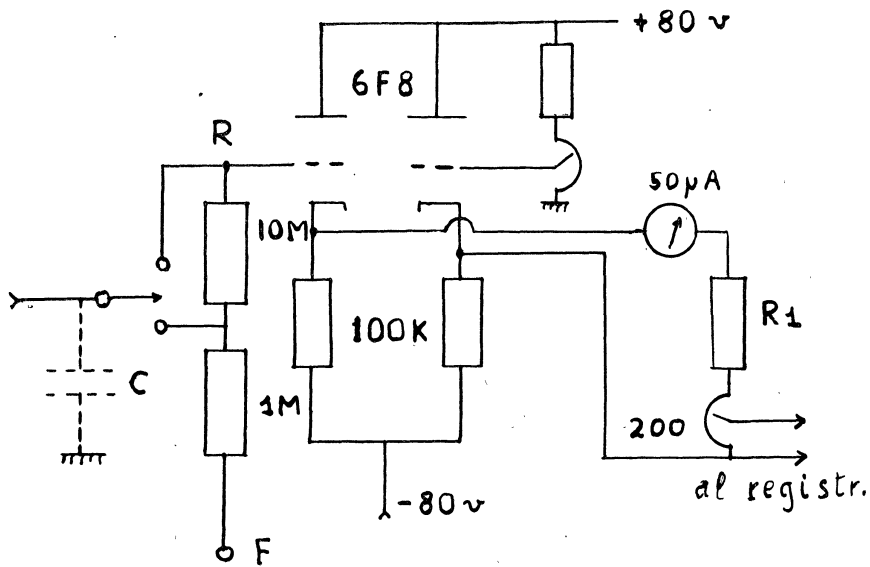


Fig. 1

Il tempo necessario per prendere un microfotogramma è dell'ordine dell'ora, e possiamo quindi dire che viene garantita la precisione di 2/210 cioè dell'1% anche con la sensibilità massima. In ampere essa corrisponde a $\frac{210mV}{11.10^6 \Omega} = 1,9 \times 10^{-8}$ ampere a fondo scala, cioè a $7,6 \times 10^{-11}$ ampere/mm. La corrente di griglia della valvola 6 F 8 (un doppio triodo con presa di griglia in testa) è circa $1,5 \times 10^{-9}$ ampere, e contribuisce per solo l'8% del fondo scala; le sue eventuali variazioni sono quindi poco importanti.

Le tensioni di alimentazione sono state stabilizzate mediante due tubi al neon tipo tipo 85 A 2 e per di più la tensione di rete è stata stabilizzata mediante un trasformatore a ferro saturo. I filamenti sono alimentati in corrente continua a 6 volta da un alimentatore stabilizzato capace di erogare fino a 8 ampere, costruito dalla Società Elettronica Lombarda, il quale alimenta anche la lampadina del Moll ed un altro circuito che verrà descritto più avanti. Tanto il trasformatore a ferro saturo quanto l'alimentazione stabilizzata in continua per i filamenti sono essenziali per avere una elevata stabilità di zero: senza di loro essa sale da 2 a 12 m V all'ora, mentre le fluttuazioni a corto periodo salgono da 200 μ V a 5 m V.

E' stata controllata pure la linearità del sistema col circuito di fig. 2. Le dieci resistenze R1 R2 R3 R10, accuratamente misurate ad un ponte Wheatstone di precisione, permettono di ottenere correnti variabili in rapporti noti all'amplificatore e al registratore. Gli scarti dalla linearità non superano il 3% anche per segnali di tensione all'ingresso di 2,1 volta, dieci volte superiore alla sensibilità massima.

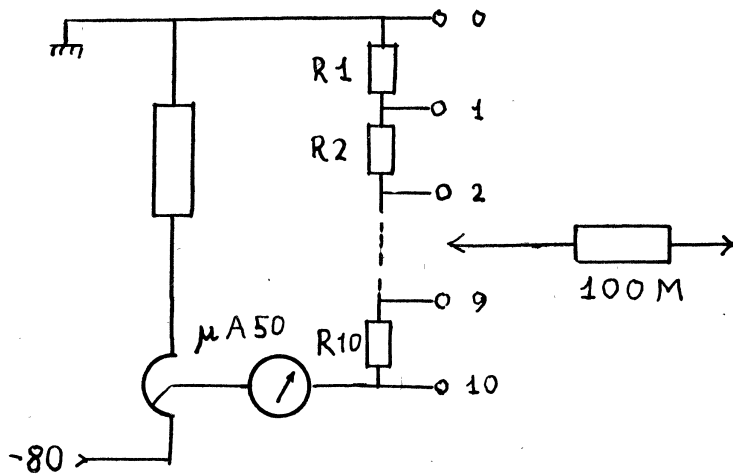


Fig. 2

Bisogna che l'accoppiamento tra avanzamento della lastra fotografica e della carta del registratore sia tale da garantire la costanza dell'ingrandimento.

Nel microfotometro Moll originale ciò è ottenuto mediante due coppie di demoltiplica, una a vite ad un principio e corona dentata a 100 denti elicoidali, l'altra a vite a quattro principi e corona dentata a 33 denti; siccome il passo della vite micrometrica che fa avanzare la lastra è di 1 mm esatto, ne segue che gli assi delle due corone dentate, sporgenti dal carter del cambio, compiono rispettivamente un giro ogni $\frac{100}{1} = 100$ mm, e $\frac{33}{4} = 8,25$ mm. Su questi due assi va calettato l'asse del tamburo porta carta sensibile, il cui diametro è tale da ottenere un ingrandimento rispettivamente di 4,125 e 50 volte.

Invece la circonferenza del rullo svolgicarta del registratore Philips è di 120 mm, e quindi un accoppiamento diretto a cardano darebbe gli ingrandimenti $\frac{120}{8,25} = 14,5454\dots$ e $\frac{120}{100} = 1,2$, insufficienti agli scopi pratici.

Perciò sono stati costruiti due ingranaggi di precisione rispettivamente di 168 e 84 denti di modulo 0,5, la cui distanza fra assi è perciò di $\frac{(168 + 84) \cdot 0,5}{2} = 63$ mm, esattamente corrispondente alla distanza fra gli assi delle corone dentate elicoidali sporgenti dal carter del Moll. Uno dei due ingranaggi viene bloccato su uno dei due assi; l'altro ingranaggio è folle sull'altro asse, e porta bloccato un albero a cardano allungabile a

TABELLA I

Disposizioni parti					Ingrandimento	Velocità carta in cm/ora con motore microfotometro in		
Ingranaggio da 84 denti infilato su	Ingranaggio da 168 denti infilato su	Cardano infilato e bloccato nell'ingranaggio su	Bloccato l'ingranaggio su	Folle l'ingranaggio su		I	I	III
A	B	A	B	A	50	268.2	678.0	1551.0
B	A	A	B	A	12.5	67.0	169.5	387.7
B	A	B	A	B	4.125	22.1	55.9	128.0
A	B	B	A	B	1.03125	5.5	14.0	32.0

cannocchiale lungo 67 cm. Esso penetra entro il registratore ed è bloccato su un ingranaggio di 165 denti il quale è accoppiato ad un altro ingranaggio di 96 denti (ambidue di modulo 0,5) rigidamente bloccato sull'asse del rullo svolgicarta. Naturalmente è stato tolto il motorino sincrono dello svolgicarta ed il cambio velocità.

Indichiamo con *A* l'albero uscente dal carter corrispondente all'amplificazione 4,125 col sistema normale Moll, e con *B* l'altro, corrispondente ai 50 ingrandimenti.

A seconda di come vengono disposti i due ingranaggi da 168 ed 84 denti sugli assi *A* e *B* ed a seconda di dove viene fissato il cardano, cioè di quale dei due ingranaggi è il motore, si ottengono gli ingrandimenti sulla carta del registratore dati dalla tabella 1. Le velocità di esplorazione della lastra non dipendono ovviamente dall'ingrandimento, ma solo dal cambio a cinghia mobile della velocità del motore del microfotometro. Esse sono date nella tabella 2. L'interpretazione dell'ultima colonna verrà data più avanti.

TABELLA II

Motore in	Velocità esplorazione spettro					Risoluzione	
	mm/ora	mm/minuto	micron/secondo	secondi/mm	minuti/cm	tratti/mm	micron
I	53.64	0.894	14.9	67.2	11.2	57	15
II	135.6	2.26	37.7	26.5	4.42	26	38
III	310.2	5.17	86.2	11.6	1.93	12	86

Se, al posto del cardano, si usa la normale scatola contenente la carta sensibile del Moll, usando quindi solo il galvanometro i due ingranaggi da 168 e 84 denti permettono di ottenere gli ingrandimenti dati dalla tabella 3.

In tal modo sono stati eliminati gl'inconvenienti di cui ai punti 2 e 3 relativi all'uso della carta sensibile. L'aver usato la comune carta da registratori, più sottile e perciò più trasparente di quella fotografica, permette di potere sovrapporre 4 registrazioni di più spettri e di osservarle per trasparenza a mezzo di una forte lampada. In tal modo la presenza di una riga sul fondo continuo dello spettro stellare viene più facilmente confermata od esclusa. Per di più, siccome lo spettrografo Zeiss di Merate viene usato in tre sole combinazioni di dispersione cambiando l'obbiettivo di camera, e siccome la lunghezza massima di uno spettro è di 6 centimetri, ciò che dà un microfotogramma lungo circa tre metri, è stato costruito un tavolo lungo altrettanto, sul bordo del quale viene

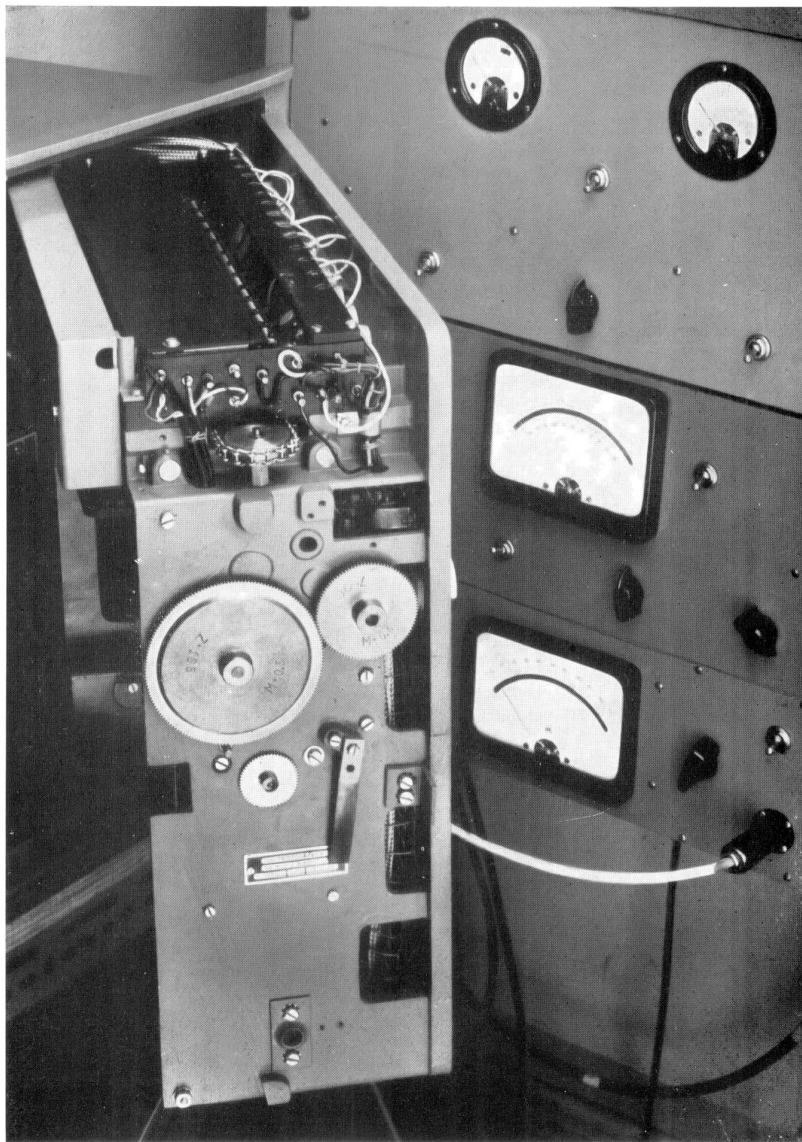
TABELLA III

Disposizioni parti					Ingrandimenti	Millimetri di lastra esplorati per ogni foglio di carta sensibile lungo 400 mm.	Tempo necessario all'esplorazione col motore del microfotometro in			
Ingranaggio da 84 denti infilato su	Ingranaggio da 168 denti infilato su	Perno tamburo bloccato sull'ingranaggio infilato su	Bloccato l'ingranaggio su	Folle l'ingranaggio su			I	II	III	
A	B	A	B	A	100	4.0	4m 29s	1m 45s	0m 46s	
B	A	A	B	A	25	16.0	17 55	7 02	3 05	
B	A	B	A	B	8.25	48.4	54 13	21 23	9 20	
A	B	B	A	B	2.0625	193.9	216 50	85 33	37 22	
Tamburo bloccato direttamente sull'asse					A	4.125	97.0	108 25	42 47	18 41
					B	50	8.0	8 57	3 31	1 32

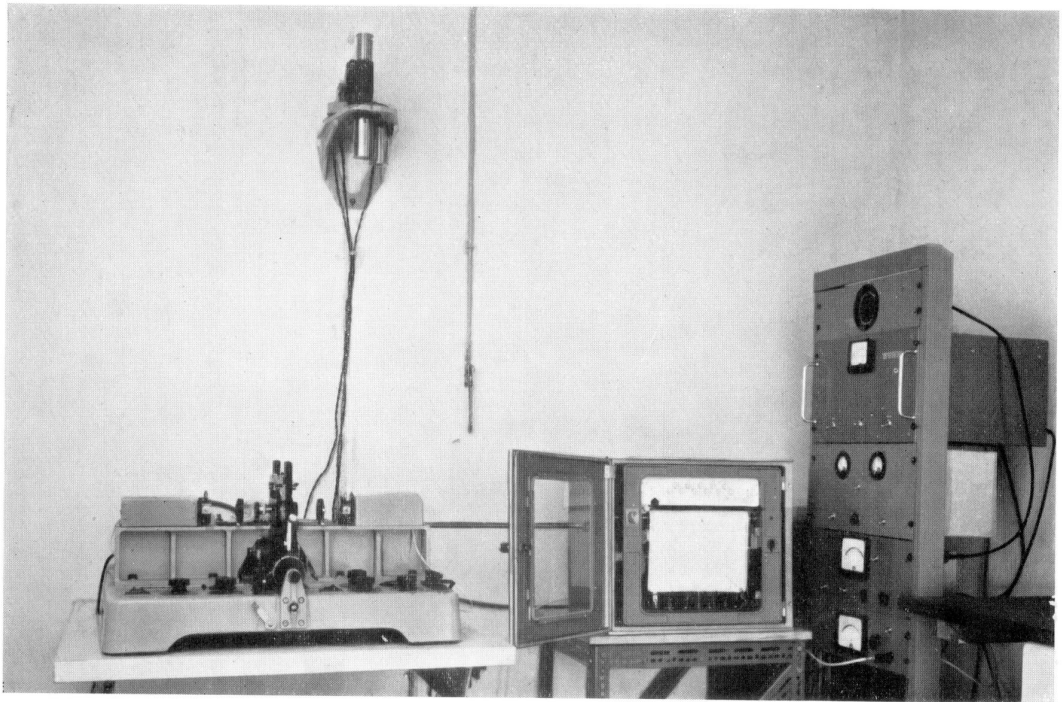
disposto uno di tre regoli già graduati secondo la curva di dispersione delle tre combinazioni; essi portano segnata la dispersione in Å/mm di carta, le lunghezze d'onda di 20 in 20 Å, e le posizioni delle principali righe d'interesse astrofisico. In tal modo l'operazione dell'individuazione delle righe è assai facilitata.

La richiesta della registrazione diretta delle intensità anziché delle trasparenze ha prodotto numerose soluzioni; a Merate era stato precedentemente costruito un riduttore automatico del tipo già usato da Minnaert ed Houtgast, ma l'uso pratico ha dimostrato notevoli inconvenienti.

La soluzione più pratica di tutte consisterebbe probabilmente nell'uso di un trasformatore funzionale a potenziometri, in cui l'entrata è data da una corrente proporzionale alla trasparenza, e l'uscita all'intensità, secondo la curva di calibrazione approssimata mediante un numero sufficiente di potenziometri; l'uscita, collegata al registratore Philips permetterebbe di registrare l'intensità; un raffinamento consiste nell'uso di due registratori, di cui il primo ha il duplice scopo di registrare la trasparenza e di emettere un segnale elettrico proporzionale all'intensità, cioè di funzionare anche da trasformatore funzionale; il secondo, accop-



TAV. I — Il registratore con gli 11 potenziometri regolatori.



TAV. II — Veduta d'insieme del microfotometro.

piato elettricamente al primo, registra allora l'intensità. Queste soluzioni, semplici, precise, di sicuro funzionamento, esenti da pericoli di oscillazioni, presentano il grave inconveniente del costo.

Si è pertanto costruito un circuito che permette di registrare automaticamente l'intensità con un solo registratore anzichè due.

Il registratore Philips possiede infatti due potenziometri. Uno serve per l'azzeramento del segnale in alternata del vibratore, e non c'interessa; l'altro, parallelo al primo ed esplorato anch'esso da un contatto mobile solidale alla penna scrivente, ha una resistenza totale di circa 3000 Ω e serve normalmente alla regolazione della temperatura di un forno mediante un circuito a rivelazione di fase che comanda dei relais. Questo potenziometro, nella trasformazione fatta, ha un capo a massa e l'altro al potenziale U ; il cursore è collegato all'estremo F della resistenza d'ingresso dell'amplificatore (vedi fig. 1), la quale dunque va ora a massa tramite il potenziometro e non più direttamente come in fig. 1. Lo schema di blocco semplificato è ora dato in fig. 3.

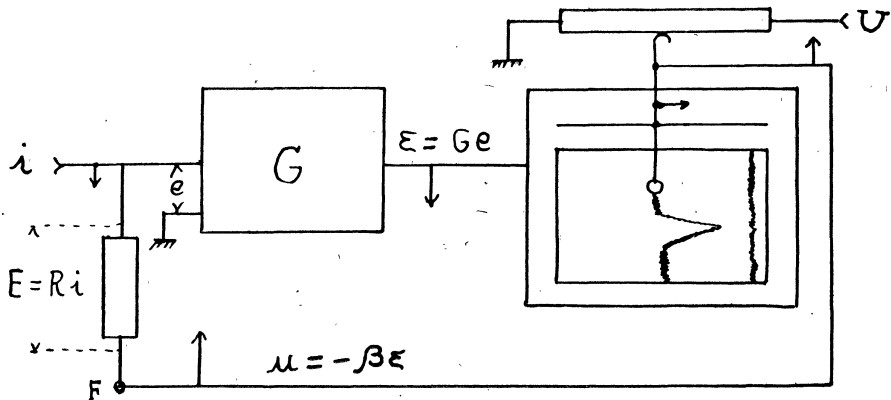


Fig. 3

Le equazioni statiche del circuito sono

- 1) $E = R i = e - u$
- 2) $e = G e$
- 3) $u = -\beta e$.

Si ricava subito e , proporzionale allo spostamento della penna, cioè la quantità registrata in funzione di E :

$$e = G e = G (E + u) = G (E - \beta e)$$

da cui

$$4) \quad \varepsilon = E \frac{G}{1 + \beta G}$$

Siccome con 210 m V d'ingresso il registratore va a fondo scala, ciò che corrisponde a 5 m V che gli vengono applicati, ne segue che $G = \frac{5}{210} = 0,024$; invece β è dato da $\frac{6 \text{ V}}{0,005 \text{ V}} = 1200$ perchè per 5 m V d'ingresso al registratore il cursore fornisce in reazione una tensione U di 6 volta, prelevata dall'alimentatore stabilizzato di cui si è già detto. Quindi l'amplificazione in volta del circuito è

$$\frac{\varepsilon}{E} = \frac{0.024}{1 + 0.024 \times 1200} = \frac{0.024}{1 + 28.8}$$

Se non ci fosse la tensione di controreazione U , il fattore β sarebbe nullo e l'amplificazione sarebbe

$$\frac{\varepsilon}{E} = 0.024$$

Quindi la presenza della tensione U riduce la sensibilità in volta per un fattore 29,8, ciò che migliora la stabilità di zero in per cento di fondo scala del registratore. Osserviamo a questo punto che siccome il prodotto $\beta G \gg 1$ nella 4) possiamo trascurare l'unità e si ottiene

$$5) \quad \varepsilon = \frac{E}{\beta}$$

cioè la risposta non dipende più dalle caratteristiche dell'amplificatore, ma solo dalla tensione applicata al potenziometro e dalle sue caratteristiche; dunque se esso fosse lineare non si otterrebbe nulla di nuovo, eccetto una migliore stabilità di zero a spese di una minore sensibilità a causa del fattore $1/1 + \beta G$. Ma è possibile costruire un potenziometro a risposta non lineare (vedremo oltre come).

Quindi al posto della 3) bisogna porre la

$$3') \quad u = -u(\varepsilon)$$

e quindi si ottiene

$$E = \frac{\varepsilon}{G} + u(\varepsilon)$$

da cui

$$\frac{G u(\varepsilon)}{\varepsilon} + 1 = \frac{G E}{\varepsilon}$$

Supponiamo per semplicità che sia $G u(\varepsilon)/\varepsilon \gg 1$, ciò che è sempre possibile pur di aumentare a sufficienza la tensione U ; si ha il risultato

$$5') \quad E = u(\varepsilon)$$

(in particolare se il potenziometro è lineare, $\frac{u(\varepsilon)}{\varepsilon}$ è costante = β e si ritrova la formula $E = \beta \varepsilon$).

Ricordando che ε è proporzionale all'elongazione della penna e deve essere proporzionale all'intensità, mentre $E = R i$ è proporzionale ad $1 - T$, ove T è la trasparenza della lastra fotografica, per avere un'uscita proporzionale ad I anziché ad $1 - T$ bisogna che la dipendenza della tensione al potenziometro dalla distanza dall'estremo destro sia identica alla curva di calibrazione $I = f(1 - T)$.

Ovviamente non è possibile costruire un potenziometro in cui questa dipendenza sia esattamente realizzabile a piacere, qualunque sia la curva di calibrazione, ma è anche inutile tanta precisione. Supposto di dividere l'intervallo I in 10 parti uguali, la curva può essere sufficientemente approssimata mediante interpolazione lineare in quelle 10 parti, eccettuata al più la zona del piede della curva di trasparenza, ove del resto le misure fotografiche non hanno molta precisione. L'interpolazione lineare è ottenuta mediante prese equidistanti sul potenziometro connesse a tensioni opportune derivate da altri potenziometri in parallelo a resistenza assai minore di quella del potenziometro di reazione. Motivi pratici dovuti alla grana esigono che lo zero delle intensità non corrisponda proprio a fondo scala, ma un po' meno; d'altra parte il controllo della stabilità di zero, ottenibile togliendo l'illuminazione al microfotometro, manderebbe l'indice fuori scala a sinistra, perchè $T \rightarrow 0$, $I \rightarrow \infty$; quindi arbitrariamente un pezzo di curva di calibrazione viene accorciato in modo che per $T = 0$ sia $l = 0$.

Ciò non porta danno: basta scegliere T_{\min} in modo che sia sempre inferiore a tutte le trasparenze dello spetto (v. fig. 4).

Queste due particolarità esigono che la larghezza delle intensità sia prolungata del 10% da ambo i lati; quindi la larghezza della carta va divisa in 12 parti, ciò che richiede 11 potenziometri ciascuno di resistenza assai minore di 3000 Ω . Essi sono infatti di 300 Ω ciascuno, in filo avvolto, di piccolo formato per ragioni d'ingombro. Essi soli costituiscono una resistenza equivalente di $\frac{300}{11} = 27 \Omega$ e quindi assorbono una corrente di $\frac{6}{27} = 0,22$ ampere, con una potenza termica dissipata di 1,3 watt.

Un raddoppio del loro numero permetterebbe un piccolo miglioramento nella precisione con cui viene approssimata la curva caratteristica, ma raddoppierebbe anche il consumo di corrente continua dallo stabilizzatore.

Non è pratico, nè sarebbe sicuro, a causa dell'ipotesi $G \frac{u(\varepsilon)}{\varepsilon} \gg 1$ ottenere la prescritta dipendenza fra entrata e uscita del circuito agendo sui potenziometri sinchè alle prese del potenziometro di reazione si ottengono le tensioni calcolate. In pratica si mandano delle correnti misu-

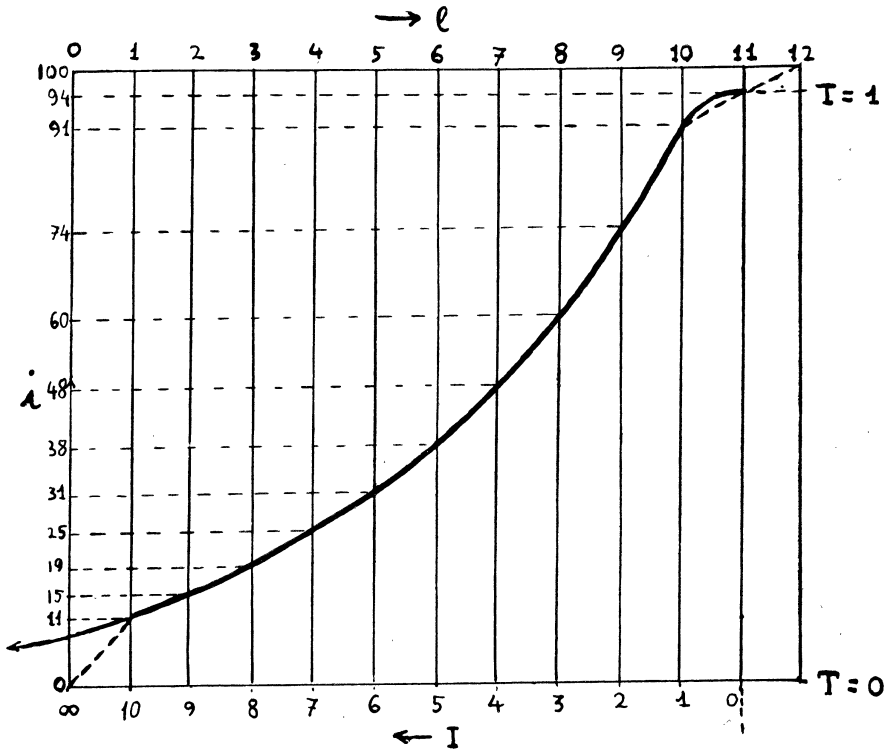


Fig. 4

rate mediante un microamperometro di classe 1, che, secondo la curva di taratura di fig. 4, dovrebbero mandare l'indice in corrispondenza all' n .ma presa del potenziometro di reazione; se l'indice non va nella posizione voluta, si corregge mediante la rotazione del solo n .mo potenziometro. Tre iterazioni sono sufficienti ad ottenere una precisione sufficiente in pochi minuti. E' chiaro che è sufficiente togliere la tensione al potenziometro di reazione perchè lo strumento ridiventi un registratore di trasparenza.

Cerchiamo ora le condizioni per la stabilità del circuito chiuso registratore + amplificatore. Una ricerca esauriente richiederebbe un complicato studio perchè le caratteristiche non sono lineari, sia perchè il circuito di reazione è necessariamente non lineare, sia perchè anche un piccolo segnale d'errore al registratore manda a saturazione il circuito amplificatore in corrente alternata che agisce sul servomotore bifase ad induzione. Limitiamoci quindi ad esaminare le piccole oscillazioni intorno alle posizioni d'equilibrio. Bisogna essenzialmente tener conto della capa-

cià d'ingresso dell'amplificatore di c.c., e della caratteristica di risposta del registratore Philips. Nelle formole seguenti si parlerà per semplicità di intensità, tensioni, spostamenti ecc., ma resta fissato che bisognerà intendere variazioni di intensità, variazioni di tensione ecc.; con tale convenzione si ottengono le equazioni del comportamento dinamico dell'amplificatore quali risultano dallo schema di blocchi di fig. 5.

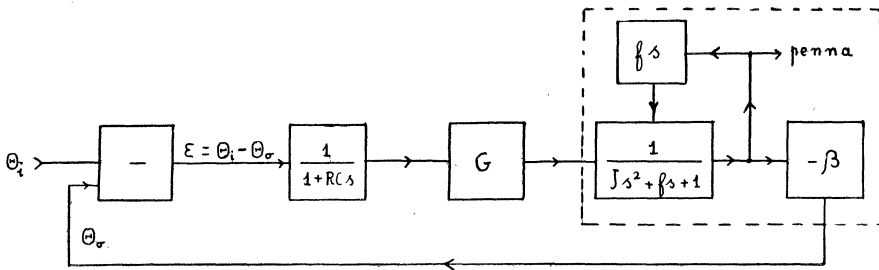


Fig. 5

Il blocco, dato dalla funzione di transfer $1/1 + RCs$, rappresenta il circuito resistenza — capacità d'ingresso, la cui costante di tempo lasciamo per ora imprecisata. Il gruppo G è l'amplificatore; lo spostamento l della penna del registratore è rappresentato dalla funzione $1/Js^2 + fs + 1$ ove il termine di attrito apparente è prodotto dalla dinamo tachimetrica del Philips accoppiata meccanicamente alla penna. Il potenziometro di reazione costante $-\beta$ viene poi collegato all'entrata. Il guadagno complesso γ del circuito è dato dal prodotto delle funzioni di transfer

$$6) \quad \gamma = \frac{\beta G}{(1 + RCs)(Js^2 + fs + 1)}$$

da cui

$$7) \quad \theta_o = \frac{\gamma}{1 + \gamma} \theta_i$$

Se θ_i è la funzione scalino unitaria, la θ_o passato il transiente dopo un certo tempo raggiunge la posizione di regime; essa è data da

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \theta_o(t) &= \lim_{s \rightarrow 0} s \theta_o(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{\gamma}{1 + \gamma} \theta_i = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{\gamma}{1 + \gamma} \frac{1}{s} = \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\gamma}{1 + \gamma} = \frac{\beta G}{1 + \beta G} \end{aligned}$$

cioè si ritrova la 4).

La 7) si può pensare come prodotto di 3 funzioni :

$$\frac{1}{1 + R C s} , \frac{1}{J s^2 + f s + 1} , \beta G$$

La prima ha per diagramma nel piano complesso la curva α che è un semicerchio di raggio $1/2$; la seconda curva è un po' più complessa e la sua forma dipende dai valori di J ed f ; la β , corrisponde ad uno smorzamento eccessivo, la β_2 ad uno smorzamento insufficiente del moto della penna.

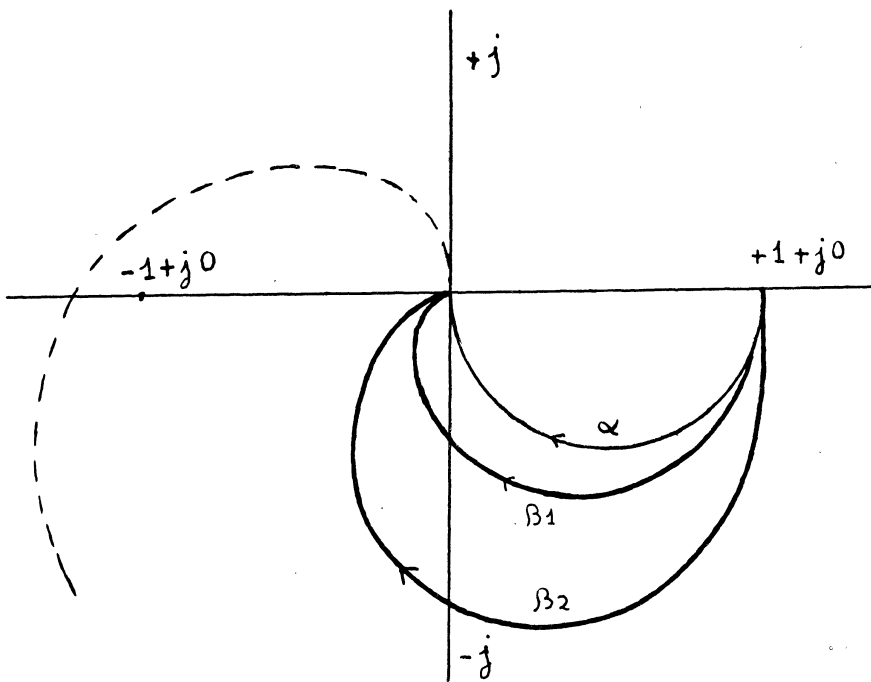


Fig. 6

Il prodotto delle due curve α e β interseca l'asse reale negativo e naturalmente tende a zero col crescere di s . Perciò moltiplicando ancora il risultato per βG si arriva necessariamente al momento in cui la curva γ contiene internamente il punto $-1 + j0$ e quindi il servomeccanismo entra in oscillazione.

D'altra parte il gruppo $R C$ d'ingresso tende a sfasare in ritardo, ciò che peggiora le cose; per rendere minima l'influenza del ritardo basta che C sia la più piccola possibile, cioè in pratica quella virtuale del cavo coassiale d'ingresso. In tal modo l'entrata del punto -1 è assai ritardata rispetto al guadagno βG .

Ma G è dato dall'amplificatore e non conviene cambiarlo, mentre β , nell'interpretazione di fig. 4, è proporzionale a dT/dI della curva di calibrazione. Se quindi nella posizione \bar{I} corrispondente al flesso si regola la sensibilità del registratore in modo che il circuito non entri in oscillazione, siamo sicuri che in tutto il campo delle I esplorate esso sarà stabile, naturalmente a scapito della velocità di risposta che sarà massima per \bar{I} e minima presso la $I = 0$ ed I max. Il rapporto della velocità di risposta dipende ovviamente dal rapporto fra la dT/dI massima e minima; ora tale rapporto dipende dal contrasto della lastra fotografica usata, ed è maggiore per le lastre a forte contrasto, mentre invece per le lastre di tipo comunemente usate in spettrografia astronomica la velocità di risposta non varia molto in tutta la zona della densità d'uso comune. Possiamo dunque tranquillamente asserire che la risposta del sistema è uniformemente di un ciclo al secondo e quindi il potere separatore è dato dalla tabella 2. Ricordiamo che il galvanometro ha una costante di tempo di 0,3 secondi ed è quindi adatto quando si dovessero usare lastre a forte contrasto e potere separatore sino a 220 tratti per millimetro; naturalmente se ne ricaverebbero solo le trasparenze.

Vediamo per ultimo come è possibile ridurre l'influenza delle piccole residue variazioni di tensione alla lampadina del Moll. Una variazione $\Delta U/U$ sulla tensione d'accensione della lampadina provoca una variazione $\Delta S/S$ nel segnale dalla cellula fotoelettrica. Si ha in generale

$$\frac{\Delta S}{S} = a \frac{\Delta U}{U}$$

con a maggiore di zero.

D'altra parte la sensibilità Σ in $\frac{mm}{v}$ è inversamente proporzionale ad U e quindi le variazioni percentuali dell'elongazioni sono date da

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta (S \Sigma)}{S \Sigma} = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \Sigma}{\Sigma} = a \frac{\Delta U}{U} - \frac{\Delta U}{U} = (a - 1) \frac{\Delta U}{U} .$$

Perciò se fosse $a = 1$ il circuito sarebbe esattamente compensato contro le variazioni di tensione dell'alimentatore. In realtà la tensione di 6 volta viene applicata alla lampadina tramite un potenziometro in serie, già incorporato nel Moll; a seconda che la lampadina venga connessa direttamente ai 6 volta senza alcuna resistenza in serie, oppure con la massima resistenza inserita il valore di a varia da 4,5 a 7,1; per ottenere quindi una stabilità migliore bisognerebbe far passare attraverso alla lampadina quanto più corrente è possibile, cioè col potenziometro escluso. D'altra parte possono intervenire fattori di deformazione termica o di invecchiamento della lampadina i quali consigliano di usare correnti più basse, circa 3,5 ampere, a cui corrisponde $a = 5,4$. La stabilità è perciò migliorata nel fattore $\frac{5,4 - 1}{5,4} = 1,2$ cioè del 20%.

Il fotomoltiplicatore può essere collegato a mezzo del cavo coassiale sia all'amplificatore di corrente continua, quando si vuole la registrazione sul Philips, sia direttamente al galvanometro.

Un interruttore ad orologeria permette di togliere, dopo un tempo prefissabile a piacere sino a 60 minuti, la tensione alla lampadina del Moll, in modo che il registratore segna la posizione corrispondente alla trasparenza zero, cosa utile per controllo. Un relais termico mantiene ancora inserita la corrente di rete al resto dei circuiti per un periodo di circa un minuto, trascorso il quale la corrente viene tolta. In tal modo l'operatore deve soltanto avviare lo strumento; la lunghezza dello spettro esplorato, la registrazione finale dello zero e l'arresto vengono determinate automaticamente. E' superfluo dire che l'apparecchio non comprende la variazione automatica della curva di calibrazione con la lunghezza d'onda, come in altri tipi più perfezionati; ma in molti casi il contrasto non cambia molto ed è inutile tenerne conto.