

LNF - 67/11
22 Febbraio 1967

C. Bacci, R. Baldini-Celio e V. Bidoli: UN SISTEMA DI REGOLAZIONE AUTOMATICA DEL GUADAGNO DI UN FOTOMOLTIPLICATORE E DELLA RELATIVA CATENA ELETTRONICA LINEARE. -

(Nota Interna: n. 352)

LNF-67/11

Nota Interna: n° 352
22 Febbraio 1967

C. Bacci^(x), R. Baldini-Celio e V. Bidoli^(x): UN SISTEMA DI REGOLAZIONE AUTOMATICA DEL GUADAGNO DI UN FOTOMOLTIPLICATORE E DELLA RELATIVA CATENA ELETTRONICA LINEARE. -

1) - INTRODUZIONE -

Nel corso di una esperienza di fotoproduzione del mesone $\eta^{(1)}$, presso l'Elettrosincrotrone dei Laboratori Nazionali di Frascati, nella quale è necessaria una analisi di ampiezza degli impulsi di vari contatori di Cerenkov integrali di vetro al Pb, si è presentato il problema di garantirsi della stabilità nel tempo del guadagno di un fotomoltiplicatore (f. m.) e della catena elettronica lineare che trasmette gli impulsi da analizzare. A questo scopo è stato realizzato un dispositivo di controllo automatico del guadagno (A. G. C.) che ha il pregio della semplicità, non interferisce con la misura in corso e può essere usato anche in presenza di un forte fondo di radiazioni quale spesso è presente presso un acceleratore.

Questo dispositivo, pur essendo stato realizzato per il nostro particolare dispositivo sperimentale, è stato progettato in modo da poter essere facilmente adottato ad altri apparati.

La variazione nel tempo del guadagno di un f. m. può essere dovuta, come è noto, a cause diverse, quali l'affaticamento del fotocatodo, variazioni di temperatura ecc.; in (2) è data una descrizione dettagliata di molte di queste cause e dei sistemi specifici per compensarne gli effetti. Comunque, qualunque sia la causa, si può, con un opportuno sistema automatico di controreazione che utilizzi gli impulsi provenienti da una sorgente di luce

(x) - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma.

2.

stabile nel tempo, agire su uno dei parametri che regolano il guadagno in modo da mantenere costante la loro ampiezza. Diversi sistemi di A. G. C. sono stati finora realizzati. Sarà conveniente, per i nostri scopi, esaminarli sulla base della sorgente di luce usata e del modo di controllare il guadagno.

Nel dispositivo descritto in (3) è stata usata una sorgente di luce artificiale, che intensifica il fondo del f. m., in modo tale che dal confronto della componente continua della corrente anodica con una corrente di riferimento fosse possibile regolare la tensione di alimentazione del f. m. stesso. Questo sistema non è utilizzabile presso un acceleratore dove esiste un forte fondo di radiazioni spesso fortemente variabile in modo anche incontrollato. L'uso di una sorgente di luce impulsata a bassa frequenza, che modula il fondo del f. m., e di un filtro elettrico che ne separa gli impulsi in ingresso al sistema di A. G. C. presenta notevoli vantaggi rispetto al caso precedente⁽⁴⁾. Non risolve tuttavia il problema del fondo di radiazioni e richiede capacità di blocco tra i dinodi piuttosto grandi. Con i dispositivi precedenti, inoltre, non è possibile controllare, insieme al f. m., anche la stabilità della catena elettronica lineare che trasmette gli impulsi da analizzare.

Sorgenti rapide di luce quali fotodiodi o lampadine a idrogeno, che ovvierebbero agli inconvenienti accennati, non danno per ora sufficienti garanzie di stabilità nel tempo. Sorgenti di luce naturale, quali le scintillazioni prodotte in uno scintillatore da radiazioni α e γ , pur essendo stabili nel tempo non sono state usate^(5, 6) in modo tale da risolvere il problema della separazione del fondo presente sul f. m. dagli impulsi della sorgente.

Tutti i sistemi a cui abbiamo accennato controllano il guadagno del f. m. variando la sua tensione di alimentazione. Ciò presenta, in linea di principio, l'inconveniente di alterare il tempo di transito del f. m. stesso. Tuttavia per correggere le variazioni di guadagno risultano sufficienti, di solito, variazioni della tensione di alimentazione del f. m. ≈ 100 V e le conseguenti variazioni del tempo di transito sono limitate a un valore normalmente accettabile (≈ 2 ns). A questo inconveniente si potrebbe ovviare del tutto, seguendo il suggerimento di ref. (4) di controllare soltanto l'alimentazione degli ultimi diodi.

Citiamo infine, brevemente, altri sistemi più complicati e di funzionamento meno sicuro, in cui anziché la tensione di alimentazione del f. m. viene regolato il guadagno di uno stadio posto all'uscita del f. m.^(7, 8).

2) - PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL NOSTRO SISTEMA DI A. G. C. -

In fig. 1 si riporta lo schema a blocchi del dispositivo inserito nell'apparato della misura in corso. In questo dispositivo, le variazioni di guadagno del f. m. e della catena elettronica lineare vengono compensate varian

do la tensione di alimentazione applicata al f. m. stesso. A questo scopo è stata connessa una valvola in serie all'alimentatore di alta tensione del f. m. Quest'ultimo è così alimentato da una tensione pari a quella dell'alimentatore diminuita della differenza di potenziale ai capi della valvola. Questa differenza di potenziale viene, regolata inviando sulla griglia della valvola stessa la differenza, amplificata, tra una tensione di riferimento ed una tensione proporzionale al valore medio degli impulsi ottenuti esponendo il f. m. ad una opportuna sorgente di luce.

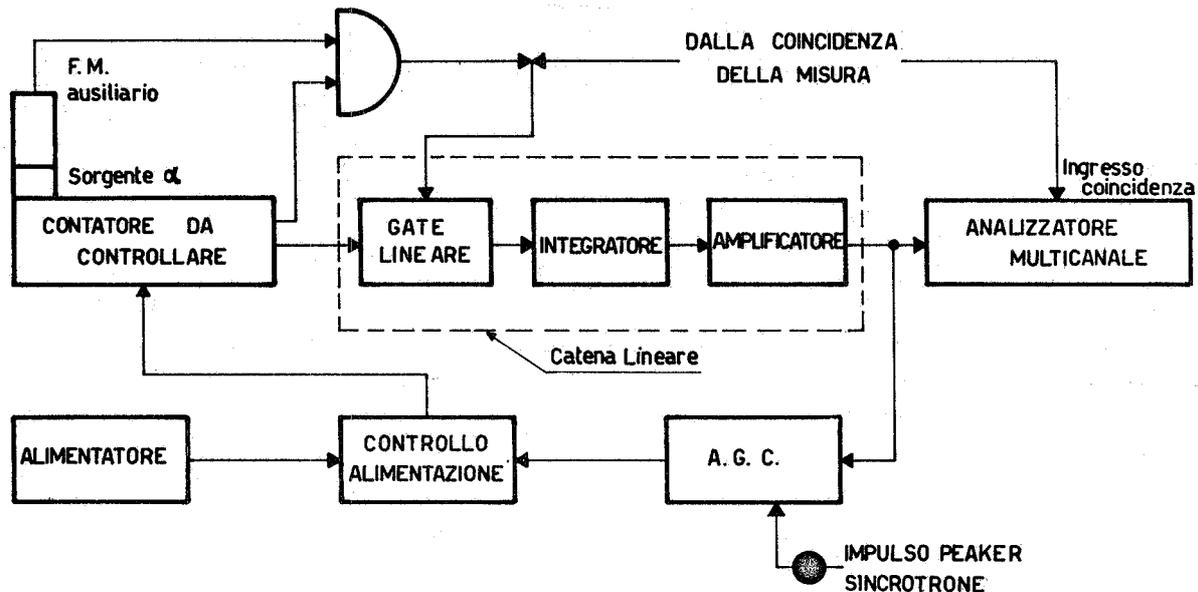


FIG. 1 - Schema a blocchi del sistema di A.G.C.

La sorgente di luce è costituita da uno scintillatore plastico su cui è depositato del Po^{210} . La luce prodotta entro lo scintillatore dalle α emesse dal Po viene inviata sia sul f. m. da controllare, sia su di un piccolo f. m. ausiliario (ad es. 1P21 oppure XP.1110) che viene utilizzato in coincidenza con il f. m. da controllare in modo da separare gli impulsi prodotti dalle α del Po da quelli di fondo. Gli impulsi passano attraverso la catena elettronica lineare e vengono quindi inviati al sistema di A. G. C.

Dato che si fa uso della stessa catena elettronica della misura in corso, il sistema di A. G. C. viene attivato solamente negli intervalli di tempo in cui la catena elettronica non viene attraversata dagli impulsi relativi alla misura. Durante questo tempo l'analizzatore multicanale usato per analizzare gli impulsi relativi all'esperienza in corso, viene paralizzato.

E' da notare che (essendo il f. m. da controllare in coincidenza con altri) rispetto al fondo presente sul f. m. la presenza di una sorgente di luce dell'intensità di qualche centinaio di impulsi al secondo, sufficiente per i nostri scopi, non perturba la misura.

Nell'integratore si è fatto uso di un amplificatore operazionale Texas 724L. Poichè ciò che interessa degli impulsi è il valore di picco, per rendere il sistema indipendente da eventuali variazioni in durata dell'impulso dell'allungatore della catena lineare, l'integratore è a sua volta preceduto da un integratore di picco con costante di tempo piccola rispetto all'inverso della frequenza media delle α , in modo che l'amplificatore operazionale lavori con impulsi formati.

L'amplificatore è protetto in ingresso mediante due diodi posti in modo da cortocircuitare verso terra tensioni superiori alla loro soglia.

Alla terra virtuale dell'amplificatore va pure una corrente di riferimento, di segno opposto a quella prodotta dagli impulsi delle α .

Per poter lavorare con i parametri più adatti alle misure in corso (alta tensione applicata al f. m., attenuazione sugli impulsi del dinodo, etc.) la corrente di riferimento viene regolata all'atto di inserire il sistema di A. G. C., in maniera da bilanciare con essa il livello di continua prodotto dalle α .

La tensione continua, in uscita dall'amplificatore operazionale, pari alla differenza, amplificata, tra l'ampiezza media degli impulsi delle α e la tensione di riferimento, viene inviata sulla griglia d'una valvola posta in serie all'alimentatore di alta tensione del f. m.

Con riferimento alla fig. 2 l'amplificazione dell'integratore, definita come il rapporto tra il livello di continua v e l'ampiezza media degli impulsi, v_α , è: $\frac{v}{v_\alpha} = -C_2 R_3 f_\alpha$, dove f_α è la frequenza media degli impulsi delle α .

La valvola da noi usata, un pentodo EF 86 montato a triodo, amplifica in tensione ≈ 40 .

L'amplificazione complessiva A dell'integratore e della valvola è stata scelta in base alle seguenti considerazioni.

La relazione che lega, in prima approssimazione, l'ampiezza media degli impulsi v_α in ingresso al sistema di A. G. C. e la tensione di alimentazione V è: $v_\alpha \approx K V^n$ dove n è il numero dei dinodi del f. m. e K una costante, proporzionale al guadagno G del f. m. e della catena lineare. Inserito il sistema di A. G. C. sarà allora, in condizioni stazionarie: $v_\alpha = K [V_T + A v - A' v_0]^n$ dove V_T è la tensione di alimentazione in assenza di segnale sulla griglia della valvola, v_0 è la tensione di riferimento ed A' è l'amplificazione totale della valvola e dell'amplificatore operazionale, relativamente a v_0 . Differenziando, poichè $\Delta K/K = \Delta G/G$:

$$\frac{\Delta v_\alpha}{v_\alpha} = \frac{\Delta G}{G} + n A \frac{\Delta v_\alpha}{V_T + A v_\alpha - A' v_0}$$

6.

Per piccole correzioni sarà $V_T \gg Av - A'v_o$, ovvero

$$\frac{\Delta v_\alpha}{v_\alpha} = \frac{\Delta G}{G} \cdot \frac{1}{1 - n A \frac{v_\alpha}{V_T}}$$

Il fattore di stabilizzazione S, cioè il rapporto tra le variazioni percentuali del guadagno e le variazioni percentuali dell'ampiezza degli impulsi, è quindi pari a

$$S = 1 - n A \frac{v}{V_T}$$

In pratica, volendo, ad esempio, $S \approx 100$, con un f. m. a 14 dinodi quale il 58AVP Philips da noi usato, e con un rapporto v_α / V_T dell'ordine del 3‰, si è scelto $A \approx -3000$.

Ovviamente l'azione del sistema di A. G. C. è tanto migliore quanto più si può rendere grande l'amplificazione totale dell'amplificatore e della valvola.

Lo schema elettrico qui descritto ci ha dato, come vedremo, garanzie sufficienti di buon funzionamento. E' comunque, ovviamente, possibile migliorarle, ad esempio rendendo più ripida la caratteristica del diodo posto nell'integratore di picco mediante uno schema del tipo riportato in ref. (9).

4) - PRESTAZIONI -

Le variazioni di guadagno sono state simulate inserendo un attenuatore resistivo nella catena lineare. In fig. 3 si riporta in funzione dell'attenuazione la posizione del massimo dello spettro ottenuto inviando ad un analizzatore multicanale, con il sistema di A. G. C. inserito o disinserto, gli impulsi del f. m. esposto agli impulsi di luce di una lampada al titanato di bario tipo PEK 118. (La stabilità di tale lampadina è stata continuamente verificata nel corso delle prove).

Nella fig. 4 sono riportati in un'unica foto due coppie di spettri della lampadina PEK 118 ottenuti con il sistema di A. G. C. inserito (parte bassa) e disinserto (parte alta) inserendo attenuazioni sul dinodo e sull'anodo di 1 e 2,81. Una possibile causa di variazione di guadagno è data da variazioni dell'alimentatore del fototubo; il sistema di A. G. C. agisce anche in questo senso rendendo l'alimentazione del f. m. indipendente, entro certi limiti, dalla tensione fornita dall'alimentatore.

In fig. 5 si riporta appunto l'alimentazione ai capi del partitore del f. m. in funzione della tensione dell'alimentatore.

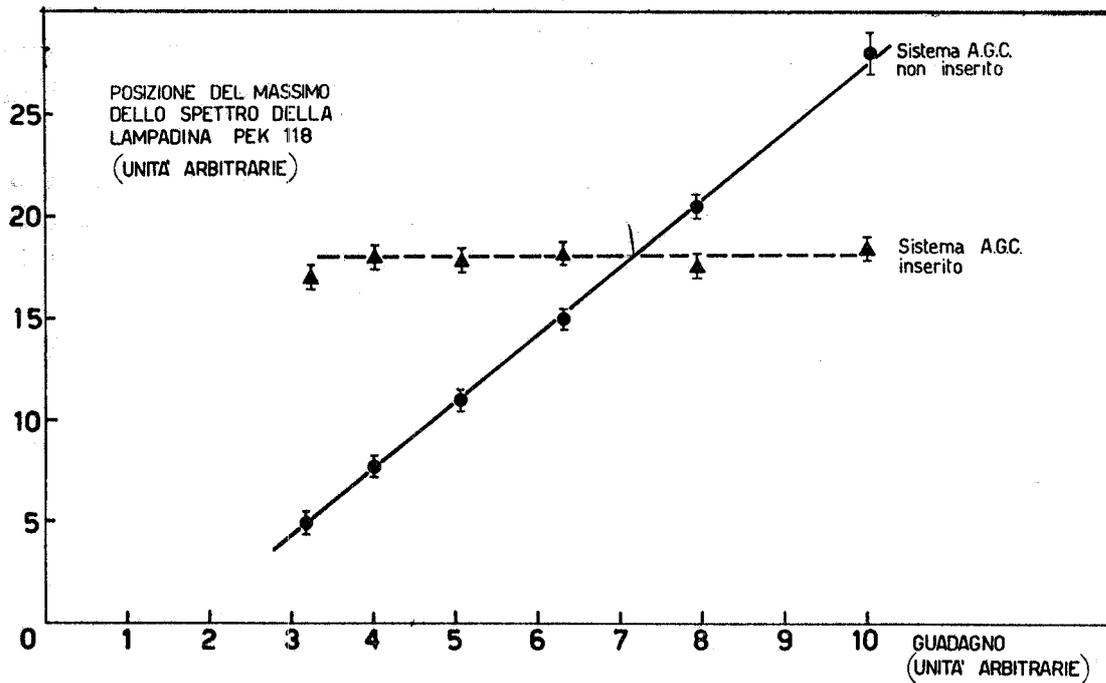


FIG. 3 - Posizione del massimo dello spettro della lampada PEK 118 al variare della attenuazione nel dinodo del f. m., con sistema di A. G. C. inserito e non.

Il funzionamento del sistema di stabilizzazione è stato reso indipendente da variazioni di temperatura tra 0° e 50° semplicemente usando diodi al silicio ed alcuni condensatori e resistenze stabilizzati in temperatura. Inoltre il sistema è largamente indipendente, come abbiamo verificato, dalla tensione di alimentazione del f. m. ausiliario.

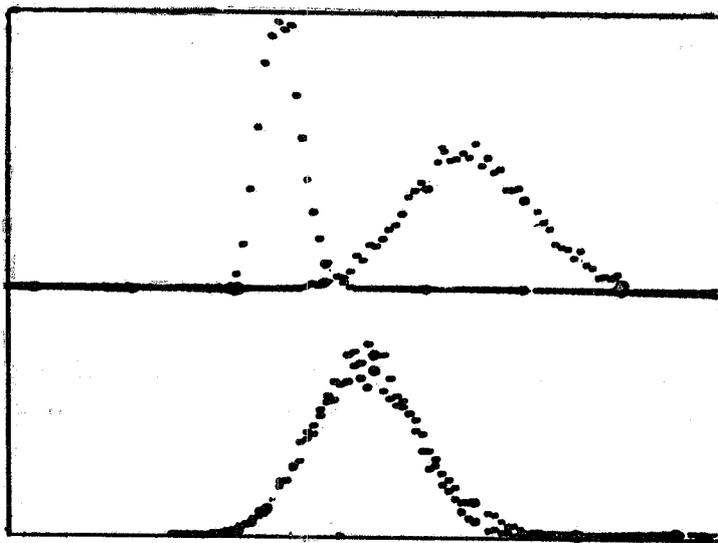


FIG. 4 - Fotografia degli spettri della lampadina PEK 118 su un analizzatore multicanale. Parte alta: 2 spettri sovrapposti ottenuti inserendo una attenuazione rispettivamente 1 e 2,81 sul dinodo e nell'anodo del f. m., analizzato con il sistema A. G. C. non inserito. Parte bassa: idem con sistema A. G. C. inserito.

La stabilità dell'intero sistema per tempi dell'ordine di qualche giorno è stata provata verificando la posizione dello spettro delle α emesse dal Po^{210} .

Occorre infine dire che il sistema di A.G.C. da noi realizzato ha un tempo di risposta di ≈ 150 sec. Questo limite è fissato dal tempo necessario a distinguere le variazioni del guadagno dalle fluttuazioni statistiche della sorgente α e del f.m., fissata la intensità della sorgente.

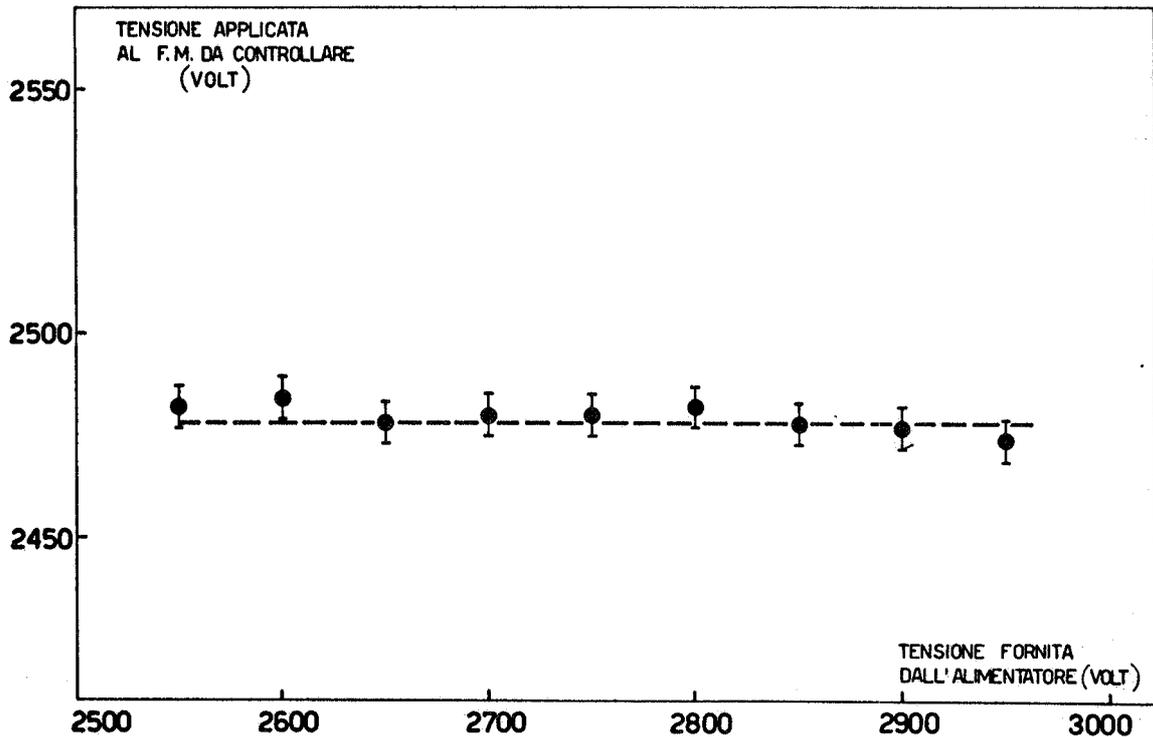


FIG. 5 - Tensione applicata al partitore del f.m. da controllare al variare della tensione dell'alimentatore.

Desideriamo ringraziare il sig. C. Felici ed il dr. D. Malosti per gli utili suggerimenti fornitici ed il dr. A. Reale per il suo continuo ed attivo interessamento durante tutto il lavoro.

APPENDICE -

Gli impulsi che vanno al sistema di A. G. C., anche in condizioni di guadagno costante, non costituiscono ovviamente un treno costante di impulsi, ma variano statisticamente in tempo e in ampiezza a causa delle fluttuazioni nell'attività della sorgente α e nei processi di emissione e moltiplicazione dei fotoelettroni. Così la tensione che regola l'alimentazione del f. m., una volta inserito il sistema di A. G. C., fluttua statisticamente attorno al suo valore medio. In questa appendice vogliamo calcolare il valore quadratico medio di queste fluttuazioni ed il loro spettro in frequenza.

Con riferimento allo schema e alle notazioni di fig. 2, indichiamo con $y(t)$ la tensione, funzione del tempo, all'ingresso alla valvola che controlla l'alimentazione del f. m.; con y_0 il suo valore in assenza di impulsi; con v_k l'ampiezza del K-esimo impulso in ingresso al sistema di A. G. C.; sia $x_k = t_k - t_{k-1}$ il tempo intercorso tra il K-esimo ed il K-1-esimo impulso.

Le ampiezze v_k saranno distribuite statisticamente secondo una certa legge; a noi interessa qui solamente il loro valore medio \bar{v} ed il valore quadratico medio \bar{v}^2 . I tempi intercorsi x saranno distribuiti poissonianamente, con una frequenza media f_α . La probabilità $p(x)dx$ che due impulsi distino un tempo compreso tra x e $x+dx$ è dunque $p(x)dx = e^{-f_\alpha x} f_\alpha dx$.

Le informazioni che cerchiamo sono contenute nella funzione di autocorrelazione, $r(h)$ ^(10, 11) della tensione $y(t)$, definita come segue:

$$r(h) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t) y(t+h) dt$$

dove

$$y(t) = - \sum_{K=1}^{N(T)} \frac{C_2}{C_3} v_k e^{-(t-t_k)/R_3 C_3} + y_0$$

Sostituendo:

$$r(h) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{C_2}{C_3}\right)^2 \sum_{K=1}^{N(T)} \sum_{i=1}^{N(T)} \frac{v_k v_i}{T} \int_0^T e^{-u(t-t_k)} \cdot e^{-u(t+h-t_i)} dt - y_0^2$$

con $u(x) \begin{cases} 0 & \text{se } x < 0 \\ 1 & \text{se } x \geq 0 \end{cases}$

dove si è tenuto conto che in condizioni di misura il livello y_0 viene scelto in maniera da azzerare il livello medio in uscita dall'integratore in presenza di impulsi, ossia

$$y_0 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{K=1}^{N(T)} \frac{C_2}{C_3} v_k e^{-(t-t_k)/R_3 C_3} dt = f_{\alpha} R_3 C_2 \bar{v}$$

Nel calcolo di questa somma separiamo gli addendi in cui $K = i$. Nel limite $T \rightarrow \infty$ il contributo di questi termini è:

$$\left(\frac{C_2}{C_3}\right)^3 f_{\alpha} \bar{v}^2 \int_0^{\infty} p(x) dx \int_0^{\infty} e^{-t/R_3 C_3} e^{-(t+h-x)/R_3 C_3} dt$$

ovvero

$$(1) \quad \left(\frac{C_2}{C_3}\right)^2 f_{\alpha} \bar{v}^2 \cdot \frac{R_3 C_3}{2} e^{-|h|/R_3 C_3}$$

Nella somma rimanente separiamo il contributo degli addendi in cui $t_k > t_i$. La somma di questi addendi, che costituiscono una serie geometrica, è pari a

$$(2) \quad \left(\frac{C_2}{C_3}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} (f_{\alpha} R_3 C_3 \bar{v})^2 e^{-|h|/R_3 C_3}$$

I termini in cui $t_k < t_i$ costituiscono lo sviluppo in serie della funzione

$$(3) \quad \left(\frac{C_2}{C_3}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} (f_{\alpha} R_3 C_3 \bar{v})^2 (2 - e^{-|h|/R_3 C_3})$$

Sommando i contributi (1), (2) e (3) e sottraendo y_0^2 si ottiene:

$$r(h) = \bar{v}^2 f_{\alpha} R_3 C_2^2 / 2 C_3 \cdot e^{-|h|/R_3 C_3}$$

e quindi il valore quadratico medio y^2 delle fluttuazioni della tensione di griglia della valvola risulta

$$\bar{y}_2 = \frac{\bar{v}^2 \cdot f_{\alpha} R_3 C_2^2}{2 C_3}$$

Lo spettro in frequenza $w(f)$ di queste fluttuazioni si ottiene^(10, 11) facendo la trasformata di Fourier della funzione di autocorrelazione:

$$w(f) = 2 f_{\alpha} (R_3 C_2)^2 \overline{v^2} \cdot \frac{1}{1 + (2xR_3 C_3 f_{\alpha})^2}$$

Come si vede, volendo minimizzare queste fluttuazioni, conviene, fissata l'amplificazione dell'integratore ossia la quantità $f_{\alpha} R_3 C_2$, minimizzare C_2 e massimizzare C_3 ; con i valori scelti le fluttuazioni sulla tensione di alimentazione del f.m. sono minori dello 0,3‰.

REFERENZE -

- (1) - C. Bacci, R. Baldini-Celio, A. Reale, G. Salvini, M. Spinetti e A. Zallo: Proposta di esperienza per la misura della sezione d'urto di fotoproduzione del mesone η , LNF-66/7 (1966).
- (2) - L. V. Ksanfomaliti, Instr. Exp. Tech. 3, 371 (1963).
- (3) - F. P. G. Valekx, Nuclear Instr. and Meth. 10, 234 (1961).
- (4) - M. Ageno and C. Felici, Rev. Sci. Instr. 34, 9, 997 (1963).
- (5) - H. de Waard, Nucleonics 13 n. 7, 36 (1955).
- (6) - S. A. Scherbatskoy, Rev. Sci. Instr. 32, 599 (1961).
- (7) - K. W. Marlow, Nuclear Instr. and Meth. 15, 188 (1962).
- (8) - U. Tamm, Nuclear Instr. and Meth. 40, 2, 355 (1966).
- (9) - R. J. Wilar, Application report, SGS, (aprile 1964) p. 26.
- (10) - D. Middleton: An introduction to statistical communication theory (Mc Graw Hill, New York) cap. 3.
- (11) - S. O. Rice, Bell System Tech. J. 23, 282 (1944).