

ALEKSANDER KWIECIŃSKI

Katedra Elektroniki Przemysłowej

WZMACNIACZ FOTOGALWANOMETRYCZNY PRĄDU STAŁEGO  
O UKŁADZIE KOMPENSACYJNYM

Streszczenie: Praca stanowi próbę przedstawienia w możliwie skondensowanej postaci podstawowych zagadnień dotyczących kompensacyjnych wzmacniaczy fotogalwanometrycznych prądu stałego. Przedstawienie materiału wynika z wymogów praktyki: szczególnie dokładnie potraktowano problemy statyczne: dynamikę układu rozważano tylko z punktu widzenia spełnienia warunku stabilności. Materiał zawarty w pracy stanowić może pomoc tak dla konstruktora jak i użytkownika wzmacniaczy, które stanowią obecnie często spotykany element wyposażenia laboratoryjnego.

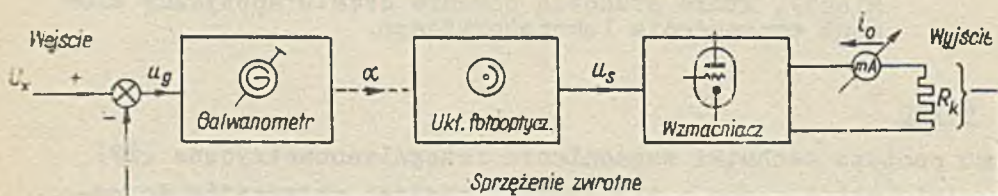
1. Wstęp

Mimo postępu techniki wzmacniacze fotogalwanometryczne (WF) stanowią nadal jeden z najbardziej czułych przyrządów do pomiaru napięcia. Próg czułości tych wzmacniaczy leży poniżej  $10^{-9}$  V. Przez wprowadzenie ujemnego sprzężenia zwrotnego obniżona zostaje czułość układu, lecz stwarza się możliwość przekształcenia go w układ kompensacyjny o dużej stałości parametrów, a więc wzmacniacz pomiarowy dużej dokładności do pomiaru napięcia wzgl. prądu.

Wzmacniacze fotogalwanometryczne (WF) należy do grupy wzmacniaczy elektrycznych wykorzystujących efekty występujące w układach elektrycznych, mechanicznych i optycznych. Pierwszym licząc od wejścia elementem wzmacniającym, a poprawniej to wyrażając, przetwarzającym – jest galwanometr. Przetwarza on doprowadzony doń prąd względnie napięcie na zmianę położenia elementu ruchomego i wynikającą stąd zmianę strumienia świetlnego padającego na przyrządy fotoelektryczne.

Odwrotnego przetworzenia dokonuje się na drodze elektronicznej uzyskując na wyjściu wzmacniacza ponownie prąd wzgl. napięcie. Wykorzystanie opisanych powyżej efektów pozwala uzyskać bardzo duże wzmocnienie przy niewielkiej ilości elementów układu.

Układ WF w swej najczęściej spotykanej postaci to układ wzmacniacza z silnym ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Może on być rozpatrywany jako zamknięty układ automatycznej regulacji. Sygnałem sterującym jest mierzony prąd lub napięcie, sygnałem regulowanym prąd lampy elektronowej wzgl. tranzystora, a ściślej spadek napięcia wywołany przepływem tego prądu przez opornik kompensacyjny  $R_k$ . Miarą błędu jest wychylenie galwanometru z położenia zerowego. Rys. 1 przedstawia schemat ideowy



Rys. 1. Schemat ideowy WF jako układu regulacji

układu WF. Zasada działania WF może być zrozumiana przy posilkowaniu się tym rysunkiem, wzgl. rys. 2a jako oproszczonym schematem najczęściej stosowanego rozwiązania dla pomiarów napięcia: Przyrost napięcia  $U_x$  powoduje ruch cewki galwanometru  $G$  i zmianę warunków oświetlenia fotokomórki  $F$ . Zmienia to napięcie siatki lampy, powodując wzrost prądu wyjściowego  $i_o$ . Prąd ten przepływa przez opornik kompensacyjny  $R_k$  powodując powstanie na nim spadku napięcia. Ten wzrost napięcia kompensuje przyrost napięcia wejściowego.

Jeśli pominąć spadek napięcia na galwanometrze tzn.:

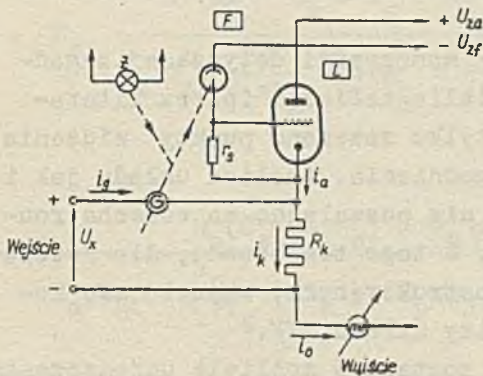
$i_g \cdot r_g \ll U_x$  oraz  $i_g \ll i_o$  wówczas można przyjąć, że: w przybliżeniu:

$$U_x \cong i_o R_k. \quad (1)$$

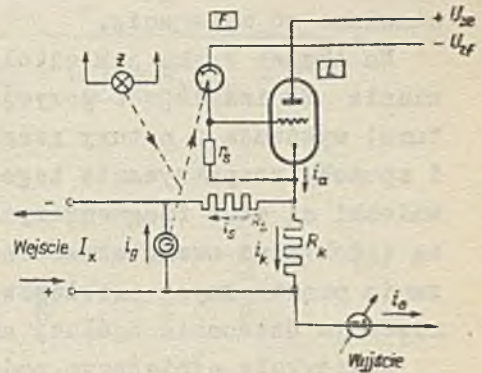
W podobny sposób dla układu kompensacji prądu (rys. 2b).

$$I_x \cong i_o \frac{R_k}{R_k + R_s} \quad (2)$$

Pomiaru napięcia  $U_x$  wzgl. prądu  $I_x$  przy pomocy WF dokonuje się więc mierząc wzmocniony prąd wyjściowy  $i_o$ .



Rys. 2a. Schemat ideowy WF o układzie kompensacji napięcia



Rys. 2b. Schemat ideowy WF o układzie kompensacji prądu

Trwający już ponad 40 lat rozwój w dziedzinie wzmacniaczy fotogalwanometrycznych przebiega w trzech zasadniczych kierunkach wynikających z wymagań: zwiększenia czułości, zmniejszenia błędów, zwiększenia pasma przenoszonych częstotliwości.

Sledząc rozwój WF na podstawie licznych publikacji i danych firmowych można stwierdzić, że od pewnego czasu nie obserwuje się poprawy klasy dokładności tych przyrządów. To spostrzeżenie oraz trudności jakie napotyka się w praktyce przy próbach budowy przyrządów laboratoryjnej klasy dokładności nasuwają przypuszczenie, że problem tkwi w opanowaniu drgań regulacyjnych układu. Drgania takie pojawiają się przy powiększaniu współczynnika wzmocnienia.

Drogę do poprawy właściwości wzmacniaczy upatrywać można w stworzeniu realnej koncepcji stabilizacji wzmacniacza oraz praktyczne jej wypróbowanie przy dążeniu do uzyskania jak najlepszej klasy dokładności. Ostateczną zaś formę mógłby uzyskać układ przez możliwie wszechstronną i najbardziej ogólną analizę tak z punktu widzenia statycznego jak i dynamicznego. Wyniki tej analizy w połączeniu z przyjętą koncepcją pozwolić powinny na budowę wzmacniacza spełniającego możliwie najpełniej stawiane mu wymagania.

Na skutek braku jakiegokolwiek monografii dotyczącej zagadnienia WF istniejące pozycje bibliograficzne (patrz literatura) wykazują z natury rzeczy tylko zawężone punkty widzenia i sposoby rozpatrywania tego zagadnienia. Analiza układu jak i wnioski są więc fragmentaryczne nie pozwalając na wszechstronną i dokładną ocenę wzmacniaczy. Z tego też powodu, dla rozwiązania praktycznych problemów konstrukcyjnych, okazało się koniecznym dokonanie ogólnej analizy układu WF.

W artykule niniejszym podane zostaną w możliwie uproszczonej postaci wnioski z tych rozważań stanowiące pomoc tak dla konstruktorów jak też pozwalające na określenie parametrów eksploatacyjnych WF.

## 2. Analiza statyczna

### 2.1. Układ kompensacji napięcia

Analiza statyczna układu dokonana została w oparciu o założony układ zastępczy przedstawiony na rys. 3. Lampa elektronowa potraktowana została jako element liniowy o relacji:

$$i_a = S_a u_s + \frac{1}{\rho_a} u_a + C,$$

gdzie:

$$S_a = \frac{\partial i_a}{\partial u_s} - \text{nachylenie charakterystyki lampy [mA/V]},$$

$$\rho_a = \frac{\partial u_a}{\partial i_a} - \text{oporność wewnętrzna lampy [k}\Omega\text{]}.$$

Właściwości zespołu galwanometru oraz układu fotooptycznego uwzględniono wprowadzając pojęcie oporności zastępczej

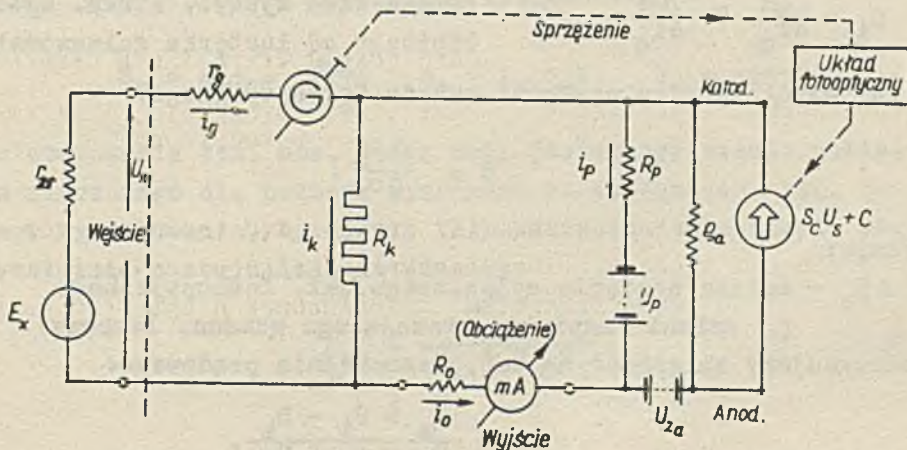
$$R_{gf} = \frac{\Delta u_s}{\Delta i_g}$$

Rozwiązanie układu daje w wyniku zależności na prąd wyjściowy WF w postaci:

$$i_o = U_x \frac{K_a R_{gf} \frac{R_p}{R_k + r_g} - \frac{R_k}{R_k + r_g} (R_p + \varrho_a)}{K_a R_{gf} \frac{R_p}{R_k + r_g} R_k + (R_p + R_o)(R_k + r_g) + R_k r_g - R_p^2} + \frac{R_p (U_{za} - U_c) - U_p \varrho_a}{K_a R_{gf} \frac{R_p}{R_k + r_g} R_k + (R_p + R_o)(R_k + r_g) + R_k r_g - R_p^2}, \quad (3)$$

gdzie:

- $U_c = -C \cdot \varrho_a$ ,
- $U_p$  - napięcie źródła prądu przesunięcia zera WF,
- $R_p$  - oporność źródła prądu przesunięcia zera WF,
- $K_a = S_a \cdot \varrho_a$  - współczynnik amplifikacji lampy.



Rys. 3. Układ zastępczy WF dla pomiaru napięcia

Należy zwrócić uwagę na fakt powiązania  $R_{gf}$  i  $r_g$  we wzorze (3), które utrudnia korzystanie z powyższego wzoru. Można zauważyć, że prąd wyjściowy  $i_o$  składa się z dwóch członów, a mianowicie: uzależnionego od nap. mierzonego oraz niezależnego od tego napięcia.

Prąd wyjściowy można więc przedstawić w postaci:

$$i_o = \frac{U_x}{R_k} (1 - b_u) + \Delta i_o, \quad (4)$$

gdzie:

$b_u$  - błąd kompensacji WF w ukł. do pomiaru napięcia,

$\Delta i_o$  - błąd zera wzmacniacza.

Zależności stają się bardziej przydatne dla praktyki przez wprowadzenie pojęcia współczynnika wzmocnienia prądowego  $K_i$

$$K_i = \frac{di_o}{di_g} \cong \frac{\Delta i_o}{\Delta i_g}, \quad \text{gdzie: } K_i \cong \frac{K_a R_{gf}}{R_o + \rho_a + R_k} - \frac{1}{\frac{R_o + \rho_a}{R_k} + 1}.$$

Współczynnik ten można stosunkowo łatwo wyznaczyć na podstawie pomiaru wzmacniacza, nie dokonując w nim żadnych zasadniczych zmian.

Wprowadzając pojęcie czułości prądowej galwanometru:

$$S_i = \frac{d\alpha}{di_g} \cong \frac{\Delta\alpha}{\Delta i_g} \quad \Delta\alpha - \text{zmiana kąta wychyl. strum. świetl. odbitego od lusterka galwanometru}$$

oraz współczynnika czułości układu fotooptycznego:

$$B = \frac{\Delta u_s}{\Delta\alpha}, \quad (5)$$

gdzie:

$\Delta U_s$  - zmiana napięcia wyjściowego ukł. fotooptycznego

(= zmianie napięcia sterującego wzmacn. lampowy)

otrzymujemy zależność na wsp. wzmocnienia prądowego:

$$K_i \cong \frac{K_a B S_i - R_k}{R_o + \rho_a + R_k},$$

tóry z najczęstszych przypadkach może być uproszczony do postaci:

$$K_i \cong B \cdot S_a S_i. \quad (6)$$

Po wprowadzeniu powyższych oznaczeń i pojęć można już stonkowo łatwo wyznaczyć parametry statyczne WF.

tak błąd kompensacji:

$$b_u \cong \frac{1}{R_k B S_a S_i}. \quad (7)$$

Oporność wejściowa tzn. oporność, która obciąża źródło napięcia mierzonego:

$$R_{wej} = \frac{du_x}{di_g} \cong R_k B S_a S_i. \quad (8)$$

Oporność wyjściowa tzn. oporność, która widzi odbiornik (obciążenie) od strony zacisków wyjściowych WF traktowanego jako źródło, może być wyznaczona z różniczki cząstkowej  $\frac{\partial i_0}{\partial R_0}$  wynosi w przybliżeniu:

$$R_{wyj} \cong R_k K_a B S_u, \quad (9)$$

dzie:

$S_u$  jest czułością napięciową galwanometru

$$S_u = \frac{1}{C_u} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta u_g}; \quad u_g = i_g r_g; \quad S_u = \frac{S_i}{r_g};$$

oc sterowania tzn. moc, którą musi dostarczyć źródło napięcia mierzonego dla pełnegoysterowania wzmacniacza tzn. takiegoysterowania, by między jego zaciskami wyjściowymi przepływał prąd o nominalnym natężeniu:

$$P_{st} \cong \frac{U_x^2}{R_k B S_a S_i}. \quad (10)$$

Pojęcie mocy sterowania jest dość istotne, ze względu na to, że w wielu zastosowaniach stanowi ona o przydatności wzmacniacza.

Współczynnik wzmocnienia mocy:

$$k_p = \frac{P_{wyi}}{P_{st}} \cong \frac{R_o}{R_k} \cdot B S_a S_i. \quad (11)$$

Wprowadzenie pojęcia błędu zera  $\Delta i_o$  pozwoliło na dokładniejsze rozeznanie jego istoty. Przyjmując dopuszczalne uproszczenia otrzymuje się zależność:

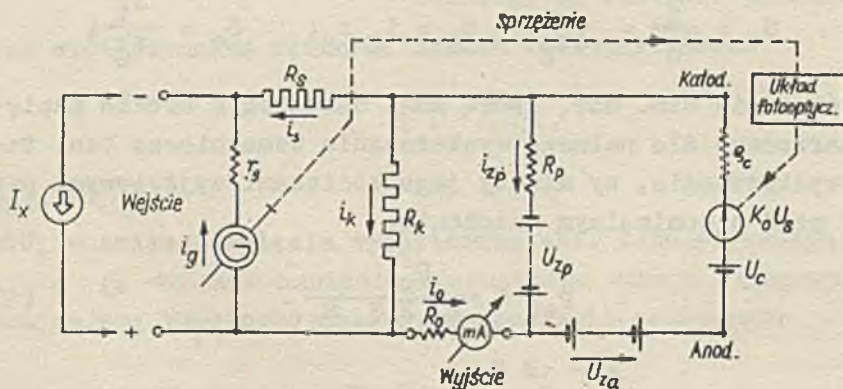
$$\Delta i_o = 0, \quad \text{gdy} \quad \frac{U_{za}}{U_p} = \frac{S_a}{R_p}. \quad (12)$$

Wyeliminowanie wzgl. zmniejszenie błędu zera oznacza poprawę klasy dokładności wzmacniacza oraz uproszczenie jego obsługi.

Wzory powyższe podane są w postaci możliwie najbardziej uproszczonej jako przegląd zagadnień bez wnikania w interesujące niekiedy finezje układu.

## 2.2. Układ kompensacji prądu

Podobnie jak dla układu kompensacji napięcia można przeprowadzić dyskusję układu kompensacji prądu przedstawionego na rys. 2b, którego układ zastępczy przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Układ zastępczy WF dla pomiaru prądu



Dozwolone dla większości przypadków uproszczenia pozwalają sprowadzić wzory do następującej postaci:

Prąd wyjściowy:

$$i_o = I_x \frac{R_k + R_s}{R_k} (1 - b_1) + \Delta i_o. \quad (13)$$

Błąd kompensacji wzmacniacza:

$$b_1 \approx \frac{R_s}{R_k} \cdot \frac{1}{B \cdot S_a S_i}. \quad (14)$$

Wyeliminowanie błędu zera prądu wyjściowego możliwe jest przy spełnieniu warunku:

$$U_{za} - U_c = \frac{\varrho_a}{R_p} \cdot U_{zp},$$

który sprowadzić można w praktyce często do warunku:

$$\frac{U_{za}}{U_{zp}} \approx \frac{\varrho_a}{R_p}.$$

Oporność wejściowa wzmacniacza jest bardzo mała i wynosi

$$R_{wej\ i} \approx \frac{R_s}{R_k} \cdot \frac{1}{B \cdot S_a S_u}. \quad (15)$$

Oporność wyjściowa otrzymamy z różniczki  $\frac{\partial i_o}{\partial R}$ .

$$R_{wyj\ i} \approx \frac{R_k \varrho_a}{2 R_s} \cdot B S_a S_i. \quad (16)$$

Moc sterowania:

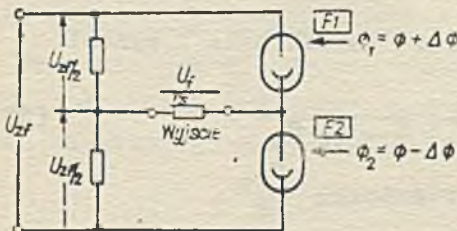
$$P_{st} \approx I_x^2 \frac{R_s}{R_k} \cdot \frac{1}{B S_a S_u}. \quad (17)$$

Wszystkie powyżej podane wzory zawierają powtarzające się wyrażenia:  $B S_i S_u K_a S_a \varrho_a$ . Przez dobór lampy elektronowej można wpływać w niewielkim jedynie stopniu na  $K_a S_a \varrho_a$ . Dużo większe możliwości stoją przed nami przy wpływaniu na czułość

galwanometru  $S_i$  i  $S_u$  oraz czułość układu fotooptycznego B. Zwiększeniu czułości napięciowej i prądowej galwanometru stoją na przeszkodzie różnorodne czynniki natury konstrukcyjnej, materiałowej i technologicznej. Ten element konstrukcyjny jest już technicznie dość dojrzały, a praktyczne czynniki sprzeciwiają się budowie galwanometrów o specjalnie wysokiej czułości. Sprzeciwia się temu sama koncepcja WF mająca na celu uzyskanie dobrych wyników przy stosowaniu przeciętnych galwanometrów.

### 2.3. Układ fotooptyczny

Jednym z istotnych wniosków analizy statycznej jest więc dążenie do uzyskania możliwie jaknajwiększej wartości współczynnika czułości układu fotooptycznego (B). Tej części urządzenia należy więc poświęcić większą uwagę.



Rys. 5. Schemat symetrycznego układu fotoelektrycznego

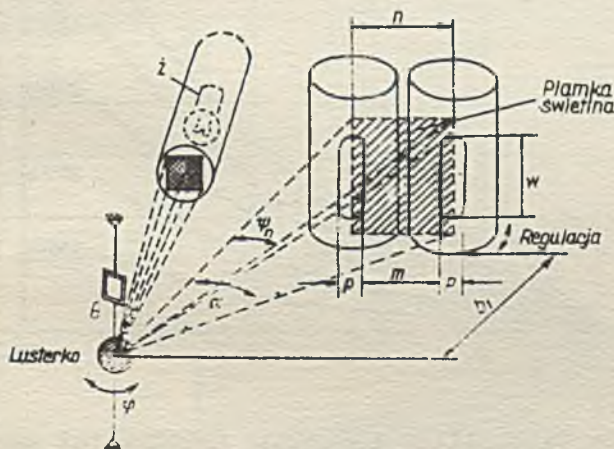
Układ przetwornika fotoelektrycznego może posiadać różnorodną postać. Najogólniej podzielić można układy na symetryczne i niesymetryczne. Układy niesymetryczne wykazują poważne wady i nie kwalifikują się do zastosowania w urządzeniach o wysokich wymaganiach. Dla tych przyczyn nie będą one tu dyskutowane.

Schemat układu symetrycznego przedstawia rys. 5, a wzajemne usytuowanie elementów uwidocznione na rys. 6. Analiza układu ma dać odpowiedź na pytanie od jakich parametrów zależy czułość układu fotooptycznego i fotoelektrycznego.

Aby odpowiedzieć na te pytania nie wystarczy potraktowanie fotokomórki jako elementu liniowego, a więc charakteryzowanego stałymi wartościami  $S_F = \frac{\partial i_F}{\partial \Phi}$  oraz  $\rho_F = \frac{\partial u_F}{\partial i_F}$ , gdyż wszystkie

przyrządy fotoelektryczne posiadają charakterystyki nieliniowe. Istnieją jednak czynniki ułatwiające zagadnienie aproksymacji charakterystyk fotokomórek i ujęcie ich w dogodną postać analityczną. Do czynników tych należą następujące:

- napięcie wyjściowe układu  $\Delta U_F$  stanowi niewielką część napięcia zasilającego  $U_{ZF}$ ,
- dla identycznych warunków oświetlenia na każdą fotokomórkę przypada około połowy napięcia zasilającego tzn.  $\frac{U_{ZF}}{2}$ ;
- wzrost strumienia oświetlnego jednej fotokomórki jest równy co do wartości zmniejszeniu strumienia drugiej fotokomórki  $\Phi_1 = \Phi + \Delta\Phi$ ;  $\Phi_2 = \Phi - \Delta\Phi$  (rys. 5).



Rys. 6. Elementy układu fotooptycznego

Obserwując charakterystyki fotokomórek próżniowych i gazowych przedstawione przykładowo na rys. 7 i 8 dochodzi się do wniosku, że cechuje je w warunkach konkretnego zastosowania wspólna właściwość: Styczne przeprowadzone do charakterystyk dla średnich napięć pracy dla fotokomórek gaz (dla ok.  $1/2 U_{f_{mx}}$ ) przecinają się na osi odciętych we wspólnym punk-

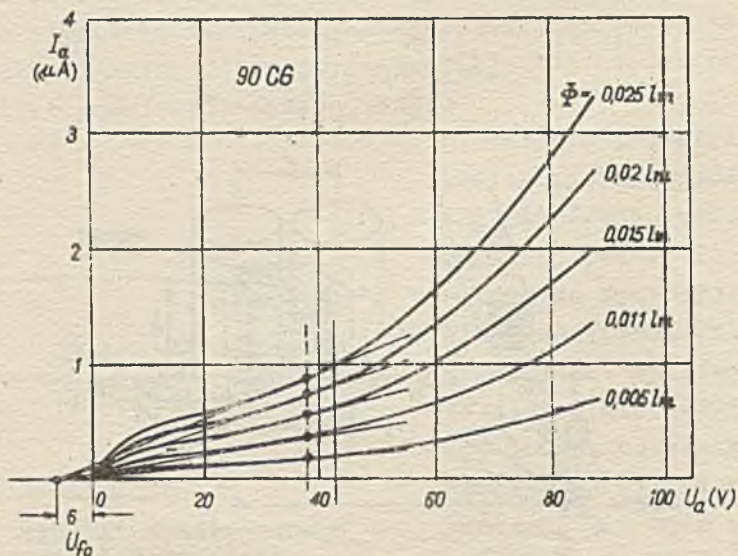
cie. Charakterystyki można więc aproksymować zależnością typu:  $y = a(x - x_0)$  tzn. dla fotokomórki:

$$i_f = \frac{1}{C_f} \cdot \Phi(u_f - U_{f0}), \quad (18)$$

gdzie:

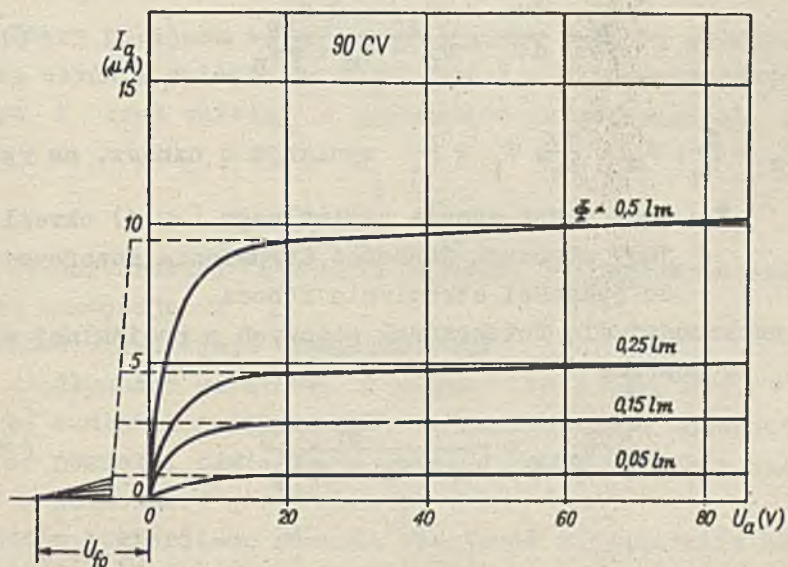
$C_f = \rho_f \Phi$  stała dla danej fotokomórki,

$U_{f0}$  - napięcie przesunięcia, stała dla danej fotokom.

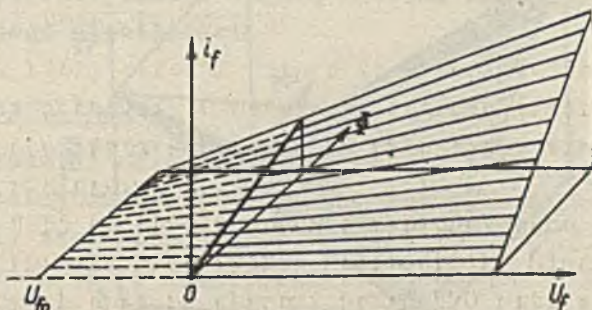


Rys. 7. Charakterystyka statyczna fotokomórki gazowanej

W układzie trójosiowym przestrzennym charakterystyka fotokomórki może być przedstawiona w postaci powierzchni (rys. 9). Miejscem geometrycznym punktów pracy obu fotokomórek będzie krzywa wynikająca z wzajemnego przecinania się dwóch powierzchni charakteryzujących poszczególne fotokomórki (rys. 10).



Rys. 8. Charakterystyki statyczne fotokomórki próżniowej



Rys. 9. Aproksymetryczna charakterystyka statyczna fotokomórki.

Przy powyższych założeniach otrzymuje się jako wynik analizy układu zależność na współczynnik czułości układu fotooptycznego:

$$B = \frac{du_f}{d\alpha} = \frac{U_{zf} - 2 U_{fo}}{\psi_n - \psi_m + \varphi \psi_p}, \quad (19)$$

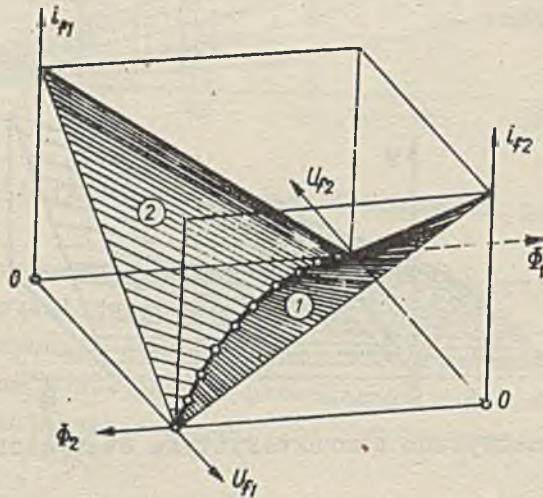
gdzie:

kąty  $\psi_n = \frac{n}{b_1}$ ;  $\psi_m = \frac{m}{b_1}$ ;  $\psi_p = \frac{p}{b_1}$  wynikają z oznacz. na rys.6

$\varphi$  - wsp. rozproszenia oświetlnego ( $< 1$ ) określający stosunek jasności strumienia rozproszenia do jasności strumienia robocznego.

Wzór ten przechodzi dla fotokomórek gazowych o pomijalnej wartości  $U_{fo}$  w postać:

$$B_{\text{gaz}} \cong \frac{U_{zf}}{\psi_n - \psi_m + \varphi \psi_p}. \quad (20)$$



Rys. 10. Współpraca dwóch fotokomórek - charakterystyka robocza

Dla fotokomórek próżniowych, dla których  $U_{f0} \gg U_{zf}$  otrzymujemy:

$$B_{\text{próżn.}} \cong - \frac{2 U_{f0}}{\psi_n - \psi_m + \eta \psi_p} \quad (21)$$

Wzory powyższe można przekształcić tak, by wyodrębnić w nich czynnik zależny od właściwości przetwornika fotoelektrycznego  $f$  oraz zależny od parametrów geometrycznych  $g$ :

$$B = f \cdot g. \quad (22)$$

Do najbardziej istotnych wniosków z powyższych rozważań należą następujące:

Czułość układu jest niezależna od:

- a) długości wskazówki świetlnej ( $b_1$  z rys. 6),
- b) czułości fotokomórek w konwencjonalnym znaczeniu,
- c) jasności oświetlenia fotokomórek w szerokim zakresie wartości.

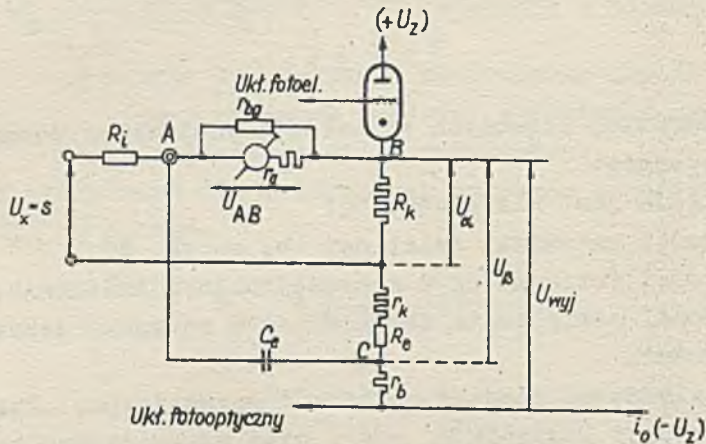
Nadto stwierdzono również możliwość wprowadzenia płynnej regulacji czułości (czynnik  $\psi_n - \psi_m$ ) oraz przewidziano teoretyczny czynnik ograniczający czułość ( $\eta \psi_p$ ).

Mimo, że czułość układu nie zależy od jasności oświetlenia fotokomórek, okazało się jednak koniecznym zbadanie tego zespołu problemów, gdyż wiąże się on ściśle ze stałą czasową układu fotoelektrycznego mającą istotne znaczenie dla dynamiki WF oraz jego stabilności.

### 3. Dynamika układu

Analiza dynamiki układu zostanie tu omówiona w sposób zawężony do rozpatrywania stabilności. Dla uniknięcia niestabilności (oscylacji) zastosował autor w nowszych seryjnie produkowanych wzmacniaczach człon elastycznego sprzężenia zwrotnego wg schematu na rys. 11. Człon ten składa się z elementów  $R_g$ ,  $C_g$ ,  $R_i$  i powoduje przyspieszenie działania układu regulacji powodując poprawę własności dynamicznych i wprowadzając układ w stan stabilny. Prąd stabilizujący omija gałąź oporową układu kompensacji

cyjnego  $R_k$ ,  $r_k$ ,  $R_e$  i płynie w obwodzie od punktu B przez A do C. Jako prąd o fazy pojemnościowej powoduje on, że galvanometr otrzymuje składową sterującą ruchem jego cewki wyprzedzającą prąd wyjściowy wzmacniacza  $i_o$ .



Rys. 11. Schemat WF wraz z elementami członu elastycznego sprzężenia zwrotnego

Ze schematu wzmacniacza wynika jego schemat strukturalny (rys. 12). Układ stanowi więc w pierwszym przybliżeniu układ inercyjny trzeciego rzędu uzupełniony członem różniczkującym. Obliczona na podstawie tego schematu funkcja przejścia ma postać:

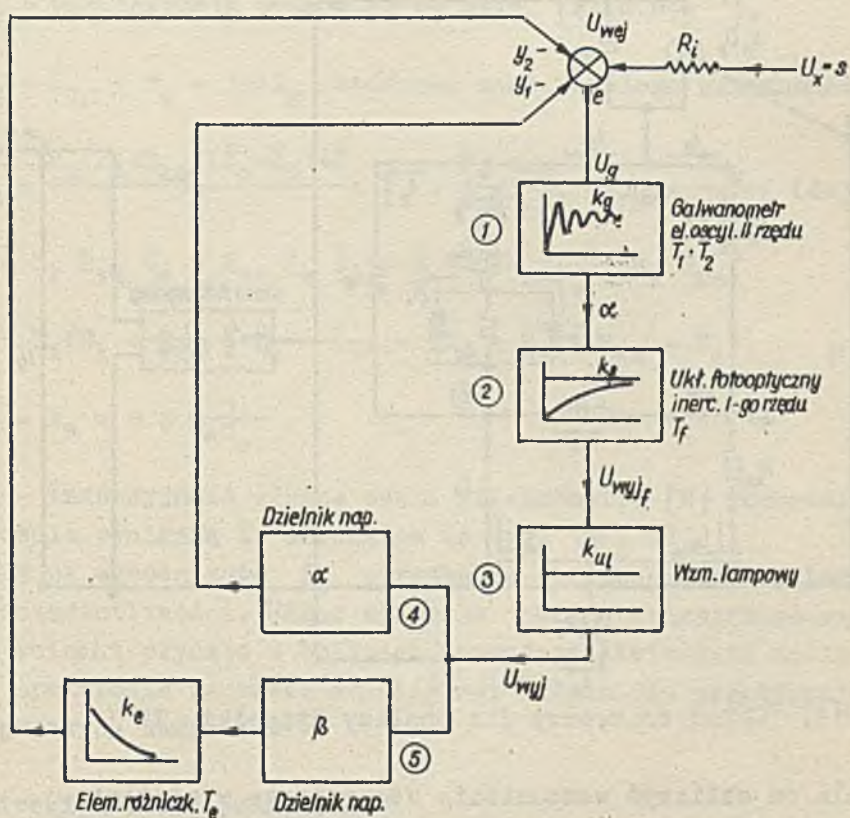
$$K_c(p) = \frac{K_{ufg} \cdot k_{ul}}{(1+pT_1)(1+pT_2)(1+pT_f)} \left[ k_\alpha + \frac{k_\beta k_e p}{(1+pT_e)} \right], \quad (23)$$

gdzie:

$$K_{ufg} = k_f \cdot k_g \text{ a pozostałe oznaczenia wynikają z rys. 12.}$$

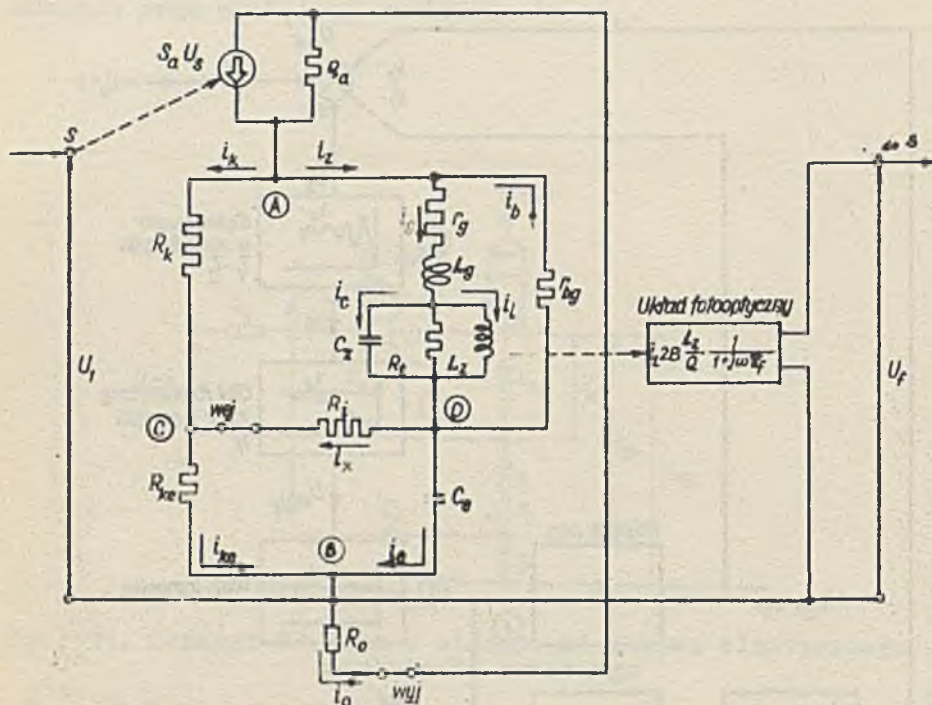
Wzór powyższy nie jest dla praktyki dostatecznie ścisły. Wynika to stąd, że poszczególne człony układu traktowane są tutaj jako wyodrębnione, wzajemnie się nie obciążające, co w rzeczywistości nie jest spełnione.





Rys. 12. Schemat strukturalny WF jako układu automatycznej regulacji

Dokładniejsza analiza wymaga wprowadzenia analogów układu galwanometrycznego i fotoelektrycznego dla uzyskania zunifikowanego pod względem wielkości i jednostek układu. Metoda ta prowadzi do schematu zastępczego przedstawionego na rys. 13.



Rys. 13. Układ zastępczy dla analizy dynamiki WF

Pozwala on obliczyć wzmocnienie wzmacniacza w postaci:

$$\hat{K}_c = \frac{\hat{U}_f}{\hat{U}_1} = 2 B \frac{L_z}{Q} \cdot \frac{1}{1+j\omega T_f} \cdot \frac{D-id}{D^2+d^2} \cdot \frac{r_{bg}}{\hat{Z}_g+r_{bg}} \cdot \frac{1}{\hat{Z}_m + \frac{R_o+\varphi_a}{K_a}} \cdot \frac{R_{ke}(R_k + \hat{Z}_z) + R_i(R_k + R_{ke})}{\hat{N}}$$

gdzie:

$$L_z = \frac{Q^2}{D} - \text{indukcyjność analogu galwanometru [H],}$$

$$Q - \text{stała dynamiczna galwanometru } \left[ \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{A}} \right],$$

$D$  - jednostkowy mom. zwrotny galwanometru  $\left[\frac{N \cdot m}{rad}\right]$ ,

$$d = \frac{\omega L_z}{R_t}; \quad R_t = \frac{Q^2}{R_r},$$

$R_r$  - współczynnik oporów ruchu galw.  $[\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{sek}^{-1}]$ ,

$\hat{Z}_g = \hat{Z}_{LC} + r_g + j\omega L_g$  oporność zast. analogu galwanometru,

$$\hat{Z}_m = \frac{R_i(R_k + R_{ke})(\hat{Z}_e + \hat{Z}_z) + \hat{P}}{\hat{N}}; \quad \hat{Z}_z = \frac{\hat{Z}_g r_{bg}}{\hat{Z}_g + r_{bg}}; \quad \hat{Z}_{LC} = \frac{\omega L_z}{D^2 + d^2} (d + jD),$$

$$\hat{P} = R_k R_{ke} \hat{Z}_e + R_{ke} \hat{Z}_e \hat{Z}_z + \hat{Z}_e \hat{Z}_z R_k + \hat{Z}_z R_k R_{ke},$$

$$\hat{N} = R_i(R_k + R_{ke} + \hat{Z}_e + \hat{Z}_z) + (R_k + \hat{Z}_z)(R_{ke} + \hat{Z}_e),$$

$$\hat{Z}_e = X_e = -j \frac{1}{\omega C_e}.$$

$L_g$  - indukcyjność własna cewki galwanometru  $[H]$  pozostałe oznaczenia wynikają ze schematów na rys. 11 i 12.

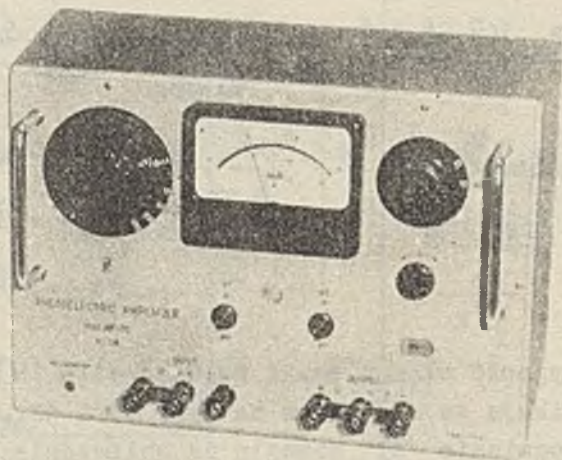
Wzór na wzmocnienie  $\hat{K}_C$  pozwala na obliczenie charakterystyki częstotliwości. Układ wykazuje inercję dziewiątego rzędu, a wnioski płynące z obliczeń pozwalają stwierdzić możliwość spełnienia warunków stabilności układu dla praktycznie występujących wartości.

#### 4. Wnioski i uwagi praktyczne

Czynnikiem, który skłonił autora do przeprowadzenia przedstawionej powyżej analizy wzmacniacza fotoelektrycznego było stale wzrastające zapotrzebowanie na precyzyjny wzmacniacz pomiarowy prądu stałego.

Od roku 1955 do chwili obecnej wyprodukowano w Zakładzie Optyki i Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Śląskiej dla potrzeb krajowych oraz na eksport ponad 570 szt. wzmacniaczy kilku typów poczynawszy od KWF-554 przez WF-581 i WF-70 (rys. 14) do produkowanego obecnie kompensatora fotoelektrycznego WF-112 (rys. 15). Ten ostatni model pozwala na pomiar napięć od  $10 \mu V$

do 2V w pięciu zakresach. Pomiar prądu obejmuje wartości od 100 nA do 10 mA w pięciu zakresach. Prąd wyjściowy wynosi nominalnie 10 lub 20 mA. Wzmacniacz pozwala na wzmacnianie sygnałów o częstotliwości od zera do 200 Hz w zależności od zakresu mierzonych wielkości. Klasa dokładności wynosi 0,2%.



Rys. 14. Wzmacniacz fotoelektryczny WF 70 (produkcji Zakładu Doświadczalnego Optyki i Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Śląskiej w Gliwicach)

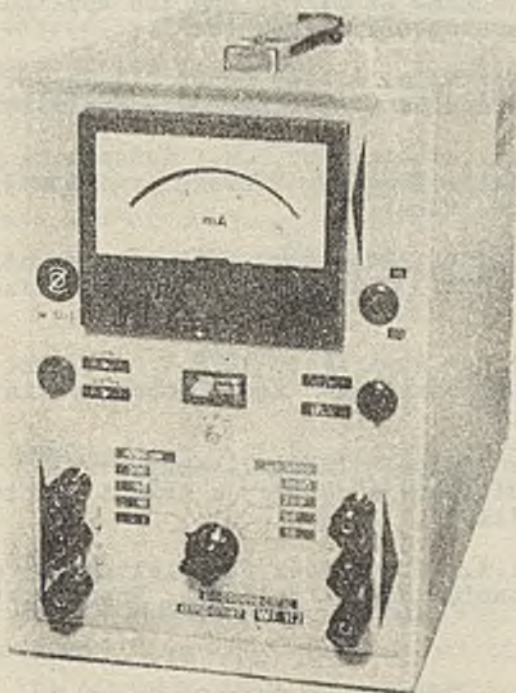
Wzmacniacz charakteryzuje się b. dużym wzmocnieniem mocy przy b. małym poziomie mocy sterowania. Przy pomiarach napięcia wzmacniacz posiada dużą wartość oporności wejściowej rzędu kilkudziesięciu  $k\Omega$  do kilkudziesięciu  $M\Omega$ .

Przy pomiarach prądu oporność wejściowa jest b. mała (rzędu dziesiątków do setek  $m\Omega$ ).

Trwałość wszystkich elementów i zespołów wzmacniacza (z wyjątkiem fotokomórek) przekracza 5000 godz.

Wnioski wynikające z analizy teoretycznej zostały zużytkowane przy projektowaniu WF-112. Przeprowadzone pomiary i zdjęte charakterystyki potwierdziły z dużą dokładnością przewidywania obliczeń teoretycznych.

WF-112 stanowi obecnie jeden z najbardziej uniwersalnych wzmacniaczy prądu stałego o niespotykanie szerokim zakresie mierzonych wielkości i zastosowań.



Rys. 15. Wzmacniacz fotoelektryczny WF-112 (produkcji Zakładu Doświadczalnego Optyki i Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Śląskiej w Gliwicach)

## LITERATURA

- [1] Merz L.: ATM-Z-64-3. Dez. 1937 "Lichtelektrische Gleichstromverstärker".
- [2] Merz L.: Arch. für Elektrot. 1. 1937, str. 1-23 "Theorie der selbstkompensierenden Gleichstromverstärker mit direct wirkender mechanischer Steuerung".
- [3] Gall D.C.: J. Inst. Electr. Engrs 89 (1942) str. 434-446 "A direct curent amplifier and its application to industrial measurements and control".
- [4] Kandiach K.: Proc. I.E.E. (Part II) Nr 70. Aug. 1952. str. 314-326. "High - Gain - DC - Amplifiers".
- [5] Seliber B.A., Rabinowicz S.G.: Awtomatika i Tielemechanika 1956 str. 728-745. "Fotokompenationnyje usilitieli postojannowo toka".
- [6] Tkaszenko A.N.: Awtomatika i Tielemechanika 1961 Nr 12 str. 1673-1681. "O dynamikie fotoelektriczeskich usilitieli".
- [7] Kwieciński A.: Acta Imeco 1958 t. IV, str. 130-142. "Photoelektrischer Verstärker als Element der interierenden Schaltungen".
- [8] Minc M.B.: Izmieritilnaja Tiechnika Nr 2. 1963. str. 35-38. "Połozitielnyje obratnyje swiazi w fotokompensacionnych usitielach".
- [9] Kwieciński A.: Wzmacniacz fotoelektryczny w układzie Kompensacji napięciowej i prądowej. Praca doktorska 1964 r.

Rękopis złożony w Redakcji w dniu 25.II.1968 r.

ФОТОГАЛЬВАНОМЕТРИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
В КОМПЕНСАЦИОННОЙ СХЕМЕ

## Р е з ю м е

Статья представляет собой попытку анализа в возможно сконцентрированной форме основных проблем, касающихся фотогальванометрических компенсационных усилителей постоянного тока.

Представление материала вытекает из требований практики; особенно тщательно исследованы статические проблемы; динамика системы рассмотрена только с точки зрения выполнения условия стабильности.

Материал, содержащийся в нижеприведённой работе, может быть полезен как для конструкторов, так и для научных работников, пользующихся фотогальванометрическим усилителем в лабораторной практике.

## SELF COMPENSATING PHOTO-ELECTRIC GALVANOMETER AMPLIFIER

## S u m m a r y

A short treatment of the theory of the photoelectric galvanometer amplifier is given. Description of the static and dynamic properties of the circuit, especially the errors are discussed. The material can be useful in the design and use of the photoelectric galvanometer amplifiers.