

Jan Leks

Instytut Metrologii i Maszyn Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

BEZDOTYKOWY POMIAR TEMPERATURY
WIRUJĄCEGO KOMUTATORA MASZyny ELEKTRYCZNEJ

Streszczenie. W artykule opisano sposób realizacji bezdotykowego pomiaru temperatury wirującego komutatora maszyny elektrycznej, oparty na efekcie promieniowania podczerwonego.

Przez pozorne zwiększenie współczynnika emisyjności istnieje możliwość obiektywnego pomiaru temperatury komutatora bez względu na stan jego powierzchni. Opisano praktyczne rozwiązanie przyrządu pomiarowego pracującego według tej zasady.

Pomiar temperatury powierzchni wirującego komutatora maszyny elektrycznej w szczególności maszyny wysokonapięciowej metodami dotykowymi jest praktycznie niemożliwy. Umieszczenie na komutatorze czujnika pomiarowego wraz z urządzeniem do bezprzewodowego przesyłania sygnału pomiarowego nie zawsze jest możliwe technicznie, a ponadto działanie takiego urządzenia jest utrudnione ze względu na silne pola elektromagnetyczne badanej maszyny.

Zbliżenie urządzenia pomiarowego do powierzchni badanego komutatora na określoną odległość nie stwarza trudności, jest bezpieczne i nie powoduje praktycznie żadnych zmian w warunkach pracy badanego obiektu.

Zasadniczo trudność realizacji bezdotykowego pomiaru temperatury komutatora wynika z małej emisyjności jego powierzchni i ze stosunkowo dużych zmian emisyjności w zależności od barwy i stanu powierzchni komutatora.

1. Podstawowe zależności

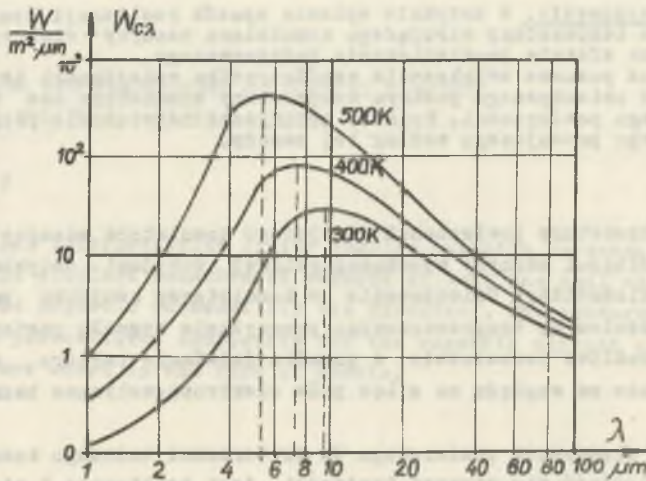
Nagrzane ciało emituje energię na różnych długościach fal. Energia kwantu promieniowania jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali na jakiej został on wypromieniowany. Widmowy rozkład emisji energetycznej (emitancji) ciała doskonale czarnego (CDC) opisuje prawo Plancka [1].

$$W_{e\lambda} d\lambda = \frac{2\pi^5 h c^2}{15 \lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]} d\lambda \quad (1)$$

przy czym:

- $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ - stała Plancka,
 - długość fali
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ - stała Boltzmana,
 $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ - prędkość światła,
 T - temperatura ciała,

Ilustrację prawa Plancka w zakresie podczerwonej części widma przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Emitancja widmowa dla trzech temperatur CDC w podczerwonej części widma

Z zależności (1) można znaleźć długość fali λ_m przy danej temperaturze T emitera, dla której emitancja ciała osiąga wartość maksymalną

$$\lambda_m = \frac{C_2}{T} \quad (2)$$

przy czym: $C_2 = 2898 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{K}$ - stała Wiena.

Z zależności (1) można także obliczyć całkowitą emisję energetyczną CDC

$$W_0 = \int_0^{\infty} W_{0\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (3)$$

przy czym $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ - stała Stefana Boltzmana.

Z zależności (3) po uwzględnieniu pola A powierzchni promieniującego emitera oraz temperatury otoczenia T_2 , otrzymuje się wyrażenie na moc promieniowania

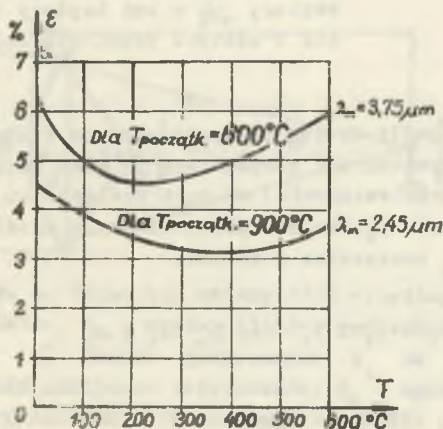
$$P_0 = \sigma A(T_1^4 - T_2^4), \quad (4)$$

Zależności (1), (3), (4) są słuszne dla każdego ciała rzeczywistego po uwzględnieniu jego zdolności emisyjnej (emisyjności) ϵ .

Emisyjność ϵ ciała rzeczywistego zdefiniowano jako stosunek emisji energetycznej ciała W do emisji energetycznej W_0 CDC o tej samej temperaturze.

$$\epsilon \stackrel{\text{def}}{=} W/W_0 < 1 \quad (5)$$

Emisyjność ϵ ciała rzeczywistego zależy od temperatury ciała oraz od długości fali. Zależność emisyjności miedzi o przeciętnie czystej i gładkiej powierzchni w funkcji temperatury powierzchni przedstawiono na rys.2



Rys. 2. Zależność emisyjności ϵ miedzi od temperatury

Z badań emisyjności różnych komutatorów wynika, że dla komutatorów współpracujących ze szczotkami metalowymi można przyjąć średnią wartość $\epsilon = 0,02$, a dla komutatorów współpracujących ze szczotkami grafitowymi można przyjmować przeciętną wartość $\epsilon = 0,5$.

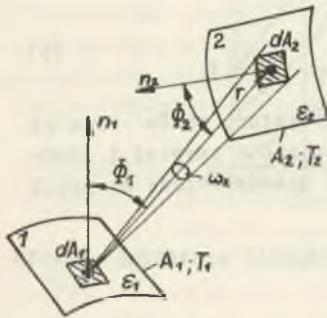
Przyjmując, że podczas normalnej eksploatacji maszyny elektrycznej temperatura komutatora nie przekracza 250°C (523K), można obliczyć z zależności (4) całkowitą moc emitowaną przez powierzchnię 1 cm^2 komutatora dla granicznych wartości emisyjności.

Przy temperaturze komutatora $T = 323\text{K}$ całkowita moc promieniowania $P_0 = 0,61\text{ mW}$ dla $\epsilon = 0,02$ oraz $P_0 = 15,3\text{ mW}$ dla $\epsilon = 0,5$, a przy temperaturze komutatora $T = 523\text{K}$ całkowita moc promieniowania $P_0 = 8,1\text{ mW}$ dla $\epsilon = 0,02$ oraz $P_0 = 202\text{ mW}$ dla $\epsilon = 0,5$.

2. Geometria układu: komutator - czujnik

W rzeczywistym układzie pomiarowym czujnik może odbierać tylko pewną część mocy promieniowania obiektu badanego.

Sytuację w przypadku pomiaru temperatury komutatora ilustruje rys. 3.



Rys. 3. Geometria ciał wymieniających energię przez promieniowanie

1 - źródło promieniowania, 2 - odbiornik promieniowania, A_1 - pole powierzchni źródła, A_2 - pole powierzchni czynnej odbiornika, ϵ_1 - emisyjność źródła, ϵ_2 - emisyjność powierzchni odbiornika, n_1, n_2 - normalne do powierzchni 1 i 2, r - promień - wektor, ω_2 - kąt bryłowy w którym odbiornik 2 odbiera promieniowanie, ze źródła 1

Z rys. 3 wynika, że jeśli źródło promieniowania 1 (badany element komutatora) ma pole powierzchni A_1 , temperaturę T_1 oraz emisyjność ϵ_1 , a odbiornik 2 (detektor promieniowania) ma pole powierzchni czynnej A_2 i emisyjność tej powierzchni ϵ_2 , to moc promieniowania źródła 1 oddziaływująca na powierzchnię A_2 odbiornika 2 wynosi:

$$dP_1 = \epsilon_1 \sigma T_1^4 \cos \Phi_1 dA_1 d\omega_2$$

ponieważ:

$$d\omega_2 = \frac{\cos \Phi_2}{\pi r^2} dA_2$$

to

$$P_1 = \epsilon_1 \sigma T_1^4 dA_1 \int_{A_2} \cos \Phi_1 \cos \Phi_2 \frac{dA_2}{R^2} \quad (6)$$

przy czym: r - promień (wektor).

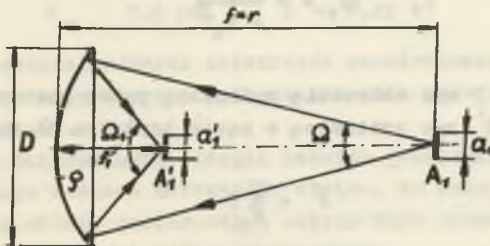
Uwzględniając temperaturę T_2 detektora promieniowania oraz prawo Kirchhoffa [1] na podstawie zależności (4) oraz (6) można wyznaczyć moc promieniowania P_2 odbieraną przez detektor promieniowania

$$P_2 = \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \int_{A_2} \cos \Phi_1 \cos \Phi_2 \frac{dA_2}{R^2} \quad (7)$$

W praktyce w celu zmniejszenia wpływu krzywizny powierzchni komutatora obszar promieniujący, z którego promieniowanie odbiera detektor promieniowania powinien mieć możliwie małe pole powierzchni.

Powierzchnia czynna detektora promieniowania wynika z jego konstrukcji. Dla fotorezystora typu RPY52 powierzchnia czynna jest kwadratem o boku 5 mm. W tej sytuacji moc P_2 pobierana przez detektor promieniowania można zwiększyć jedynie przez zwiększenie wartości funkcji podcałkowej. Praktycznie można to osiągnąć przez takie usytuowanie detektora 2 względem źródła promieniowania 1, aby normalna do powierzchni emitującej źródła była normalną do powierzchni czynnej detektora.

Dalsze zwiększenie odbieranej przez detektor promieniowania mocy można uzyskać przez zastosowanie układu optycznego pokazanego na rys. 4.



Rys. 4. Geometria zwierciadła wklęsłego

D - średnica zwierciadła, a_1 - wymiar liniowy powierzchni A_1 , a_1' - wymiar liniowy powierzchni A_1' obrazu powierzchni A_2 na detektorze promieniowania, ρ - zdolność odbijania zwierciadła, f_1 - ogniskowa zwierciadła, $f = r$ - odległość zwierciadła od powierzchni A źródła promieniowania

Na rys. 4 oznaczono przez f odległość zwierciadła od źródła promieniowania, przez f_1 ogniskową metalowego zwierciadła wklęsłego, a przez D średnicę zwierciadła.

Dla uproszczenia przyjęto, że powierzchnia A_1 źródła i powierzchnia A_1' obrazu utworzonego na powierzchni A_2 detektora są kwadratami o bokach odpowiednio a_1 , a_1' .

$$A_1 = a_1^2, \quad A_1' = a_1'^2$$

Z rys. 4 wynika

$$\frac{a_1'}{a_1} = \frac{a_1}{f} \quad (8)$$

czyli

$$\frac{A_1'}{A_1} = \frac{f^2}{f_1^2} \quad (9)$$

Dla $f/D \gg 1$ można napisać w przypadku zwierciadła wklęsłego

$$\Omega = \pi \frac{D^2}{4 f^2} \quad (10)$$

oraz

$$\Omega_1 = \pi \frac{D^2}{4 f_1^2} \quad (11)$$

Oznaczając przez P moc oalkowitą emitowaną przez powierzchnię A_1 w kącie bryłowym \mathcal{X} , a P' moc emitowaną w kącie bryłowym Ω można napisać

$$P' = \frac{\Omega}{\mathcal{X}} P \quad (12)$$

Po uwzględnieniu powierzchni A_1 źródła i A_1' jego obrazu na powierzchni detektora promieniowania oraz zdolności odbijania ϱ zwierciadła, oświetlenie energetyczne powierzchni detektora [1] wynosi

$$P_1' = P \varrho \frac{A_1'}{A_1} \quad (13)$$

Uwzględniając ponadto wzory (9), (10) i (12) otrzymuje się

$$P'_1 = P \varrho \frac{D^2}{4 T_1^2} \quad (14)$$

Na podstawie wzorów (7) i (14) moc odbierana przez detektor promieniowania wynosi

$$P'_2 = \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \varrho \frac{D^2}{4 T_1^2} \quad (15)$$

Przedstawione zależności umożliwiają zaprojektowanie układu optycznego miernika temperatury komutatora oraz pozwalają na właściwy dobór detektora promieniowania.

3. Detektor promieniowania

Z zależności (2) wynika, że dla temperatur komutatora z przedziału (300 K ÷ 523 K), maksymalne emitancje zawierają się w przedziale długości fal (9,8 μm ÷ 5,6 μm).

Dla tego zakresu temperatur kwanty promieniowania mają energię

$$E = \frac{h\nu}{\lambda} \quad (16)$$

dla $T = 300\text{K}$ λ_m 9,8 μm , $E \approx 0,13$ eV

dla $T = 523\text{K}$ λ_m 5,6 μm , $E \approx 0,22$ eV

Z analizy własności różnych detektorów promieniowania wynika, że do pomiaru temperatury komutatora w podanym zakresie nadają się jedynie detektory fotoprzewodzące.

Z porównania maksymalnych energii kwantów promieniowania z szerokością pasma zabronionego różnych materiałów wynika, że choć zapewnić odpowiednio dużą czułość układu pomiarowego, należy użyć detektora wykonanego z materiału małej szerokości pasma zabronionego.

Najmniejsze szerokości pasma zabronionego mają detektory wykonane z domieszkowanego germanu (ok. 0,01 eV) ochłodzone do temperatury 77K. W temperaturze 300K szerokość pasma zabronionego tych detektorów wzrasta do wartości ok. 0,68 eV, co odpowiada granicznej długości fali, przy której detektory te mogą jeszcze pracować $\lambda_g = 1,82 \mu\text{m}$.

Wynika stąd, że nieochłodzony detektor germanowy nie będzie pracował w zakresie długości fal (5,6 ÷ 9,8) μm .

Szerokość pasma zabronionego dla antymonku indu (InSb) w temperaturze 300K jest równa ok. 0,18 eV ($\lambda_g = 6,9 \mu\text{m}$), a dla siarczku ołowiu (PbS), 0,4 eV ($\lambda_g = 3,1 \mu\text{m}$).

Ponieważ graniczna długość fal λ_g w temperaturze 300K dla InSb jest stosunkowo duża (6,9 μm), to fotorezystor wykonany z InSb będzie pracował w zakresie fal (5,6 ÷ 6,9) μm .

Fotorezystor (InSb) typu RPY77 ma w temperaturze otoczenia 300K czułość $s = 1,7 \frac{\mu\text{V}}{\mu\text{W cm}^2}$ przy emitancji źródła promieniowania $1 \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$.

Stosunek sygnału do szumu w tej temperaturze wynosi 243.

Fotorezystor (PbS) typu 61SV ma w temperaturze 300K czułość $s = 1,3 \frac{\mu\text{V}}{\mu\text{W cm}^2}$ przy emitancji źródła promieniowania $1 \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$, stosunek sygnału do szumu równy jest 1000.

Z przedstawionych parametrów detektorów promieniowania wynika, że do pomiaru temperatury komutatora można wykorzystać fotorezystor 61 SV lub RPY77.

4. Koncepcja układu pomiarowego

Z przedstawionych zależności podstawowych promieniowania wynika, że do pomiaru temperatury komutatora należy wybrać taki układ pomiarowy, w którym można uzyskać niezależność wyniku pomiaru temperatury komutatora od jego emisyjności.

Na podstawie prawa Kirchhoffa [2] można napisać dla każdego ciała nieprzeźroczystego

$$\alpha + \varrho = 1$$

ponieważ zawsze jest: $\alpha = \epsilon$
to

$$\varrho = 1 - \epsilon \quad (18)$$

W przypadku komutatora można napisać

$$W_k = \epsilon_k W_{ck} \quad (19)$$

przy czym:

W_k - emitancja komutatora,

ϵ_k - emisyjność komutatora,

W_{ck} - emitancja CDC o temperaturze badanego komutatora.

Z wzoru (3) wynika

$$W_{ok} = \sigma T_k^4 \quad (20)$$

Przyjmując dodatkowe źródło promieniowania Z_1 jako wzorzec CDC, można napisać

$$W_{o1} = \sigma T_1^4 \quad (21)$$

przy czym:

W_{o1} - emitancja źródła promieniowania Z_1 ,

T_1 - temperatura źródła Z_1 .

Jeżeli promieniowanie ze źródła Z_1 skierowane będzie na badany komutator, tak aby detektor promieniowania odbierał promieniowanie własne komutatora W_k oraz odbite od powierzchni komutatora promieniowanie źródła Z_1 , to promieniowanie W_F odbierane przez detektor promieniowania można opisać zależnością:

$$W_F = W_k + \rho_k W_{o1} \quad (22)$$

przy czym:

ρ_k - współczynnik odbicia (refleksji) powierzchni komutatora dla promieniowania ze źródła Z_1 .

Po uwzględnieniu wzorów (18) i (19) z zależności (22) otrzymuje się:

$$W_F = \epsilon_k W_{ok} + (1 - \epsilon_k) W_{o1} \quad (23)$$

Zmieniając temperaturę T_1 źródła Z_1 , można doprowadzić do stanu, w którym będzie:

$$W_{o1} = W_{ok} \quad (24)$$

Zależność (22) przyjmie wówczas postać

$$W_F = W_{ok} = \sigma T_k^4 = \sigma T_1^4 \quad (25)$$

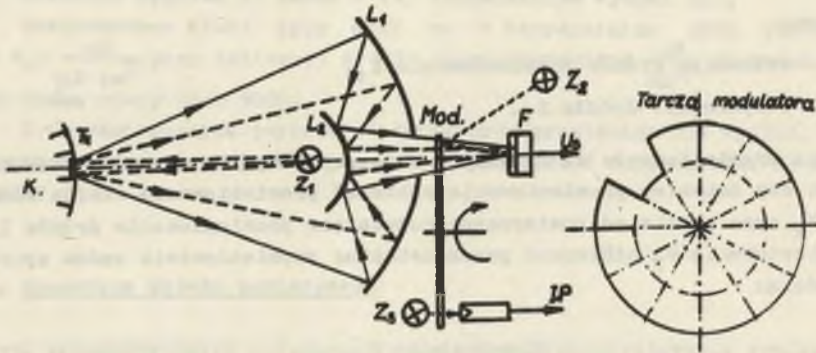
Z przytoczonych zależności wynika, że należy porównywać promieniowanie komutatora i odbite od jego powierzchni promieniowanie źródła Z_1 z promieniowaniem źródła Z_1 .

W chwili stwierdzenia równości (24) należy zmierzyć temperaturę źródła Z_1 , gdyż jest ona wówczas równą temperaturze komutatora.

Stosując w układzie optycznym zwierciadła, korzystnie jest wprowadzić dwa źródła promieniowania, przy czym parametry promieniowania tych źródeł powinny być takie same.

Wprowadzenie do układu oprócz źródła Z_1 źródła Z_2 nie zmienia koncepcji układu, natomiast pozwala znacznie uprościć układ optyczny przyrządu.

Układ optyczny przyrządu pomiarowego, w którym zastosowano dwa identyczne źródła promieniowania Z_1 i Z_2 pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Schemat układu optycznego osujnika pomiarowego

Realizację procesu porównywania promieniowania umożliwia wirująca tarcza zębata modulatora.

Zęby tarczy są wypolerowane tak, że są zwierciadłami dla promieniowania ze źródła Z_2 .

Dla prawidłowej pracy przyrządu, zęby tarczy modulatora muszą być tak wypolerowane, aby zachodziła równość:

$$W_{01} = \rho_{\text{mod}} W_{02} \quad (26)$$

przy czym:

ρ_{mod} - współczynnik odbicia powierzchni zęba tarczy modulatora,

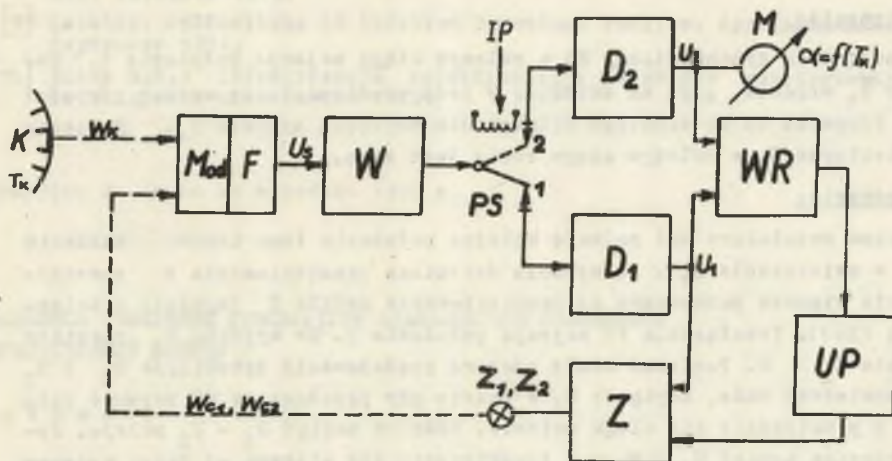
W_{02} - emitancja źródła Z_2 .

Część elektryczną przyrządu pomiarowego pokazano na rys. 6.

5. Opis działania wykonanego przyrządu pomiarowego

Na rys. 5 przedstawiono schemat budowy czujnika pomiarowego, w którym realizowane są zależności (23) i (26).

Układ elektryczny przyrządu pomiarowego pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Schemat funkcjonalny bezdotykowego miernika temperatury komutatora

Działanie czujnika pomiarowego polega na detekcji promieniowania (opisanego zależnością (23) i promieniowania opisanego zależnością (26)). Proces detekcji odbywa się na przemian z częstotliwością wyznaczoną przez prędkość obrotową tarczy modulatora oraz ilość zębów na jej obwodzie.

Szerokość zębów i szczelin tarczy jest taka sama.

Pracę przyrządu pomiarowego można opisać przez następujące fazy działania:

Faza pierwsza:

Przyrząd pomiarowy jest wyłączony. Przełącznik PS zajmuje położenie 2. Napięcie sygnału $U_g = 0$, napięcia wyjściowe na detektorach szczytowych D_1 i D_2 są równe zero. Źródło napięcia regulowanego Z jest wyłączone przez układ progowy UP. Źródła promieniowania Z_1 i Z_2 mają temperaturę otoczenia.

Faza druga:

Ząb tarczy modulatora Mod otwiera otwór w zwierciadle L_1 (rys. 5). Detektor promieniowania F odbiera promieniowanie W_k komutatora. Na wyjściu detektora F pojawia się napięcie sygnału U_g . Przełącznik synchroniczny PS zajmuje położenie 1. Na wyjściu detektora D_1 pojawia się napięcie U_1 . Za-

leżnie od wartości napięcia U_1 ustala się napięcie źródła Z ($U_2 = 0$). Różnica napięć $U_1 - U_2 = U_1$ jest wzmacniona we wzmacniaczu różnicowym WR. Jeżeli wartość napięcia U_1 jest co najmniej równa napięciu odpowiadającemu progowi działania układu progowego UP, to układ progowy przechodzi w stan włączenia (włącza napięcie źródła Z na źródła promieniowania Z_1, Z_2). W przypadku niedziałania układu progowego UP dalsza faza działania przyrzędu nie nastąpi.

Faza trzecia:

Przełącznik synchroniczny PS w dalszym ciągu zajmuje położenie 1. Napięcie U_1 wzrasta, gdyż na detektor F pada promieniowanie według równości (23). Prowadzi to do ciągłego zwiększania napięcia sygnału U_s . Napięcie na detektorze D_2 w dalszym ciągu równe jest zero.

Faza czwarta:

Taroz modulatora Mod zajmuje kolejne położenie (zab tarczy zasłania otwór w zwierciadle L_1). Na wyjściu detektora promieniowania F powstaje napięcie sygnału pochodzące od promieniowania źródła Z_2 (zgodnie z zależnością (26)). Przełącznik PS zajmuje położenie 2. Na wyjściu D_2 powstaje napięcie $U_2 > 0$. Ponieważ stałe czasowe rozładowania detektorów D_1 i D_2 są odpowiednio duże, napięcie U_1 w czasie gdy przełącznik PS zajmuje położenie 2 praktycznie nie ulega zmianie. Różnica napięć $U_1 - U_2$ maleje. Jeżeli różnica napięć $U_1 - U_2 = 0$ (praktycznie nie większa od progu wyłączenia układu UP), to można przyjąć, że została zrealizowana zależność (24). Napięcie progowe wyłączenia i włączenia układu UP wpływa odpowiednio na błąd pomiaru i na minimalną wartość mierzonej temperatury. Napięcia progowe działania układu UP powinny być możliwie małe. W przypadku, gdy różnica napięć będzie większa od napięcia progowego wyłączenia układu UP, po fazie otwartej nastąpi sytuacja podobna jak w fazie trzeciej.

Faza piąta:

Po wystąpieniu równości (24) ($U_1 - U_2 = 0$) następuje odłączenie źródła Z poprzez układ progowy UP. Wskutek tego zmniejsza się napięcie sygnału U_s oraz odpowiednio maleją napięcia U_1 i U_2 . Przy kolejnych położeniach taroz modulatora Mod następuje włączenie źródła Z jak w fazie drugiej oraz wyłączenie po wystąpieniu stanu jak w fazie otwartej. Średnia wartość napięcia mierzona przez miernik M odpowiada mierzonej temperaturze T_k .

LITERATURA

- [1] Simon I.: Promieniowanie podczerwone. (tłum. z ang.) PWN Warszawa 1968.
- [2] Nowicki R.: Pomiary energii promienistej WNT Warszawa 1969.
- [3] Miller D.: Pirometry WNT Warszawa 1970.

- [4] Michalski L., Eokersdorf: Pomiary temperatury WNT Warszawa 1971.
- [5] Romer E.: Miernictwo przemysłowe PWN Warszawa 1970.
- [6] Kamler J., Mańk A.: Odbiorniki fotoelektryczne i ich zastosowanie. WNT Warszawa 1966.
- [7] Wasiljew A.M., Łanelsman A.P.: Połuprowodnikowyje fotopreobrazowateli. Izdatielstwo Sowietsskoje radio. Moskwa 1971.
- [8] Heimann R.: Berührungsglose Temperaturbestimmung an laufenden Fäden. ATM. November 1973.
- [9] Katalog: Applications of infrared detectors Philips. Application book September 1971.
- [10] Žižin G.N.: Infračrvenaja spektroskopija wysokowo razrieszenija. Izdatielstwo Mir. Moskwa 1972.

Przyjęto do druku we wrześniu 1974 r.

КОСВЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ КОЛЛЕКТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Р е з ю м е

Описан способ косвенного измерения температуры вращающегося коллектора электрической машины, основанный на использовании эффекта инфракрасного излучения.

Мнимое повышение коэффициента эмиссионной способности создает возможность объективного измерения температуры коллектора независимо от состояния его поверхности. Описана конструкция измерительного прибора, в основу работы которого положен этот принцип

THE CONTACTLESS TEMPERATURE MEASUREMENT OF THE ELECTRICAL MACHINE ROTATING COMMUTATOR

S u m m a r y

The article presents the way of realization of the contactless temperature measurement of the electrical machine rotating commutator. This method is based on the infrared radiance effect. There is a change to make the objective measurement of commutator temperature irrespective of its surface state by apparent increasing of the emission coefficient. The practical solution of the measuring instrument working on this base is described.