

Mirosław DĄBROWSKI<sup>1)</sup>, Elżbieta OGONOWSKA-SCHWEITZER<sup>2)</sup>

## ROZWÓJ UKŁADÓW DO KALORYMETRYCZNEGO POMIARU STRAT MOCY MASZYN ELEKTRYCZNYCH

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono przegląd układów kalorymetrów do pomiaru całkowitych strat mocy maszyny elektrycznej oraz zaproponowano ich klasyfikację. Szczególną uwagę zwrócono na strukturę układu zapewniającą dużą dokładność pomiaru strat.

Przedstawiono układ zaprojektowany i wykonany w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki do badania silników indukcyjnych niskiego napięcia. Porównano wyniki badań uzyskane za pomocą metody kalorymetrycznej z wynikami tzw. metodą bezpośrednią.

## DEVELOPMENT OF CALORIMETRIC SYSTEMS FOR MEASUREMENT OF ELECTRICAL MACHINE TOTAL LOSSES

**Summary.** In the paper systems of calorimeters for measuring the losses of electrical machines are described. The proposal of their classification is presented. The calorimetric system for measurement of losses of electrical machines designed and constructed in the Department of Electrical Machines of the Electrotechnical Institute is described. The results of calorimetric measurements and of direct measurements of the input and output power are compared.

**Key words:** calorimetric system, measurement, power losses, electrical machines

### 1. WPROWADZENIE

Pomiar ilości ciepła wydzielającego się podczas różnych procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych polega na określeniu: zmiany temperatury ciała o znanej pojemności cieplnej, zmiany ilości masy substancji, która przeszła z jednej fazy w drugą oraz ilości rozproszonej energii elektrycznej lub mechanicznej przekształconej w ciepło. Ilości ciepła mierzy się w kalorymetrach o odpowiedniej budowie obieranej w zależności od zakresu temperatur, w których przeprowadza się pomiar, od ilości mierzonego ciepła oraz od wymaganej dokładności uzyskiwanych wyników. Układ kalorymetru stanowią wszystkie jego części, pomiędzy które rozkłada się mierzona ilość ciepła. Zakres temperatur, w których mierzy się ilość ciepła, we współczesnej kalorymetrii jest szeroki, zawiera się bowiem w przedziale od około 4 do 4000 K. Podobnie czas trwania procesu może być rozległy – od ułamka sekundy do kilku dni. Bardzo duży jest także zakres wartości mierzonego ciepła – od  $10^{-4}$  aż do tysięcy dżuli.

Na podstawie pomiaru ilości ciepła wyznacza się straty energii w urządzeniach, a także ciepło właściwe, ciepło utajone zmiany stanu skupienia (ciepło topnienia, ciepło parowania), efekt cieplny reakcji chemicznej, ciepło tworzenia roztworu, wartość opałową paliw oraz sporządza się bilans energetyczny tych procesów.

Ze względu na zależność pomiędzy temperaturą kalorymetru, temperaturą osłony oraz ilością ciepła wydzielonego w jednostce czasu różni się kalorymetry:

- ze zmienną temperaturą,
- wodne,
- metalowe,
- ze stałą temperaturą,

<sup>1)</sup> Prof. dr hab inż., Instytut Elektrotechniki, 04-703 Warszawa, ul. Pożaryskiego 28, tel./fax.: (0-22) 812 12 46, e-mail: dabrom@put.poznan.pl

<sup>2)</sup> Mgr inż., Instytut Elektrotechniki, 04-703 Warszawa, ul. Pożaryskiego 28, tel./fax.: (0-22) 812 12 46, e-mail: e.ogonowska@iel.waw.pl

- kompensacyjne,
- lodowe,
- parowe,
- przepływowe.

W kalorymetrach ze zmienną temperaturą wyznacza się przyrost ilości ciepła, wyrażony wzorem:

$$\Delta Q = q \Delta \vartheta, \quad (1)$$

w którym:  $q$  – ilość ciepła potrzebna do ogrzania albo ochłodzenia układu kalorymetrycznego o  $1^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta \vartheta$  – zmiana temperatury kalorymetru (przyrost lub spadek) w czasie pomiaru, na podstawie zmiany temperatury kalorymetru.

W kalorymetrach o stałej temperaturze ilość ciepła wyznacza się na podstawie zmiany masy substancji zmieniającej stan skupienia (topnienie ciała stałego lub parowanie cieczy).

Kalorymetry przepływowe pracują przy ustalonym natężeniu przepływu płynów. Przykładem kalorymetru przepływowego jest kalorymetr Junkersa do pomiaru wartości opałowej paliw ciekłych i gazowych, przez który przepływają spaliny i woda w sposób ciągły. Pomiar ilości spalonego paliwa, masy i temperatury pary, a także przyrostu temperatury wody pozwala na obliczenie wartości opałowej paliwa.

Układ kalorymetryczny otacza się zazwyczaj osłoną (a nieraz kilkoma osłonami), której temperatura jest kontrolowana [3, 8]. W zależności od rodzaju osłony rozróżnia się kalorymetry z osłoną:

- izotermiczną,
- adiabatyczną.

W kalorymetrach z osłoną izotermiczną pomiar zawsze przebiega przy stałej temperaturze. Zadana wartość temperatury osłony jest utrzymywana na stałym poziomie z dokładnością nawet do  $\pm 0,001^{\circ}\text{C}$ . Poprawkę na wymianę ciepła z otoczeniem można w tym przypadku dokładnie obliczyć. Kalorymetry z osłoną izotermiczną stosuje się najczęściej do badania ilości ciepła we względnie szybkich procesach – na przykład, do wyznaczania ciepła spalania, ciepła rozpuszczania oraz ciepła właściwego. Kalorymetry te nie są przydatne w badaniu procesów długotrwałych, trwających np. godzinę lub dłużej, ponieważ poprawka na wymianę ciepła jest wówczas duża. Kalorymetr izotermiczny był pierwszym praktycznie zastosowanym układem tego rodzaju.

W kalorymetrach adiabatycznych nie zachodzi wymiana ciepła z otoczeniem. Wytworzone w czasie eksperymentu ciepło jest wykorzystane do zwiększenia temperatury kalorymetru. Brak wymiany ciepła pomiędzy otoczeniem a kalorymetrem jest osiągany poprzez umieszczenie naczynia wraz z badanym obiektem w obudowie zewnętrznej. Przez zastosowanie elektronicznego sprzężenia zwrotnego w kalorymetrach z osłoną adiabatyczną temperaturę osłony utrzymuje się praktycznie taką samą jak w samym kalorymetrze, co znacznie zmniejsza poprawkę na wymianę ciepła uzależnioną od dokładności zachowania warunków adiabatycznych. Kalorymetry z osłoną adiabatyczną służą do badania zarówno szybkich, jak i wolnych procesów (od kilku minut do kilku godzin).

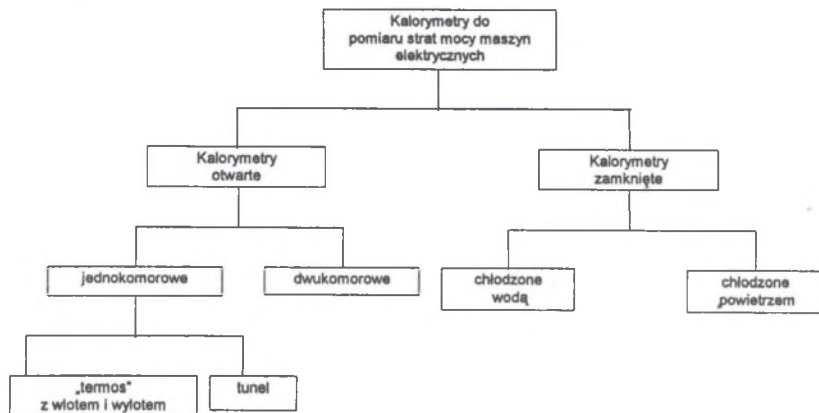
## 2. POMIARY KALORYMETRYCZNE STRAT MOCY W MASZYNACH ELEKTRYCZNYCH

Przez pojęcie metody kalorymetrycznej rozumie się stosowanie odpowiedniego kalorymetru oraz odpowiedniego algorytmu pomiarowego, tj. połączenie sprzętu oraz sposobu postępowania. Jeśli chodzi o zastosowanie tej metody do pomiaru strat mocy wywiązujących się w urządzeniach elektrycznych w postaci ciepła, to łączny dobór sprzętu i procedury pomiarowej jest nieodzowny do uzyskania dokładnych wyników.

### 2.1. Podział kalorymetrów

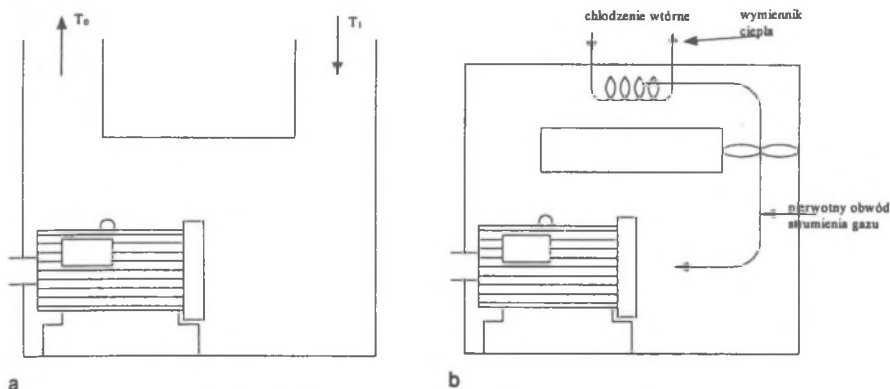
Od kilkudziesięciu lat prowadzone są próby wykorzystania metody kalorymetrycznej do pomiaru strat mocy w różnych urządzeniach elektrycznych, np. w transformatorach [2], w układach energoelektrycznych [7], w prądnicach elektrycznych [12], a przede wszystkim w maszynach elektrycznych, zwłaszcza w silnikach indukcyjnych średniej mocy [1; 4; 5; 6; 8].

Na rys. 1. przedstawiono podział kalorymetrów stosowanych do pomiaru strat w maszynach elektrycznych.



Rys. 1. Podział kalorymetrów stosowanych do pomiaru strat mocy  
Fig. 1. Types of calorimeters applied to losses measurement

Do pomiaru strat w maszynach elektrycznych stosuje się zarówno kalorymetry zamknięte, jak i otwarte (rys. 2), chociaż zalecenia normy IEC [9] odnoszą się do kalorymetrów otwartych.

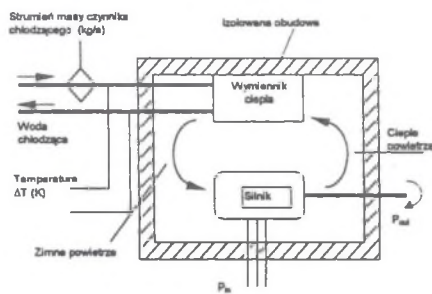


Rys. 2. Kalorymetr typu: a - otwartego, b - zamkniętego  
Fig. 2. Calorimeter: a - open, b - closed

Na rys. 3 i 4 pokazano kalorymetry typu zamkniętego [1, 6] do pomiaru strat w silnikach asynchronicznych chłodzonych powietrzem (rys. 3) oraz chłodzonych wodą (rys. 4). W kalorymetrach zamkniętych mierzone jest ciepło pochłaniane przez specjalne wymienniki ciepła umieszczone na wylocie czynnika chłodzącego (powietrze lub woda). Ciepło właściwe i gęstość czynnika chłodzącego są w tych kalorymetrach dokładnie znane.

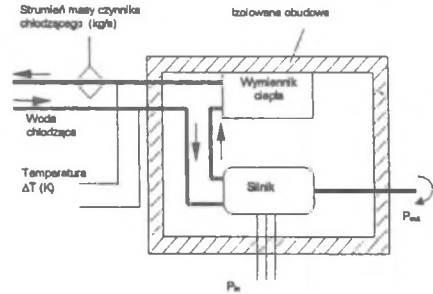
Zazwyczaj kalorymetry zamknięte [6] z obiegiem powietrza są wyposażone w duży wentylator wymuszający ruch powietrza w kierunku wymiennika ciepła. Wprowadza to do obiegu straty własne wentylatora, a tym samym powoduje dodatkowo błąd pomiaru strat badanego silnika. Zastosowanie sterowania automatycznego strumieniem powietrza i jego powiązanie z pomiarem wartości natężenia

nia przepływu, ciśnienia, wilgotności i temperatury na wlocie zwiększa wprowadzie dokładność pomiarów kalorymetrycznych, ale kosztem komplikacji układu pomiarowego.



Rys. 3. Kalorymetryczny pomiar strat silnika chłodzonego powietrzem

Fig. 3. Calorimetric measurement of losses for air-cooled motors



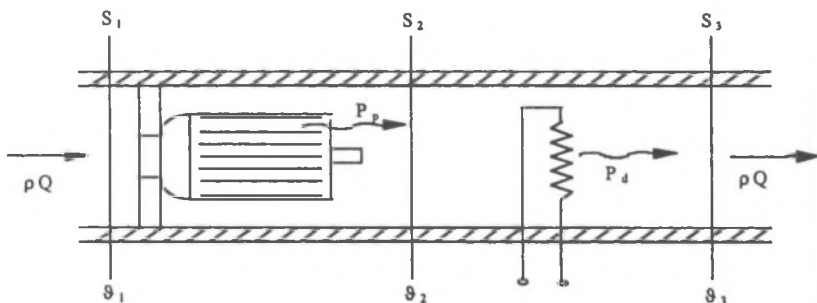
Rys. 4. Kalorymetryczny pomiar strat silnika chłodzonego wodą

Fig. 4. Calorimetric measurements of losses for water-cooled motors

Do pomiaru strat metodą kalorymetryczną stosowane są również kalometry otwarte.

W kalorymetrach otwartych ilość wydzielonego ciepła określa się na podstawie pomiaru różnicy średniej temperatury czynnika unoszącego ciepło na wlocie i na wylocie kalorymetru. Kalometry otwarte mogą być jedno- lub dwukomorowe. Kalometry jednokomorowe mogą mieć postać „termosu” z wlotem i wylotem powietrza lub postać tunelu – rys. 5.

W kalorymetrze typu otwartego, w którym powietrze jest pobierane z otoczenia oraz jest wyprowadzane do tego samego otoczenia, ciepło właściwe i gęstość czynnika unoszącego ciepło zależą od właściwości składowych gazów i od ich wilgotności względnej. Zakłada się, że ciepło właściwe i gęstość powietrza są takie same w każdym punkcie przekroju kanału na wlocie i na wylocie kalorymetru. Zastosowanie otwartego kalorymetru do wyznaczenia wytwarzanego ciepła wymaga jednoczesnych pomiarów wilgotności względnej, ciśnienia oraz średniej temperatury strugi powietrza, a także znajomości rozkładu strumienia w przekroju kanału na wlocie i na wylocie.



Rys. 5. Kalorymetr otwarty – tunel

Fig. 5. Open type – tunnel calorimeter

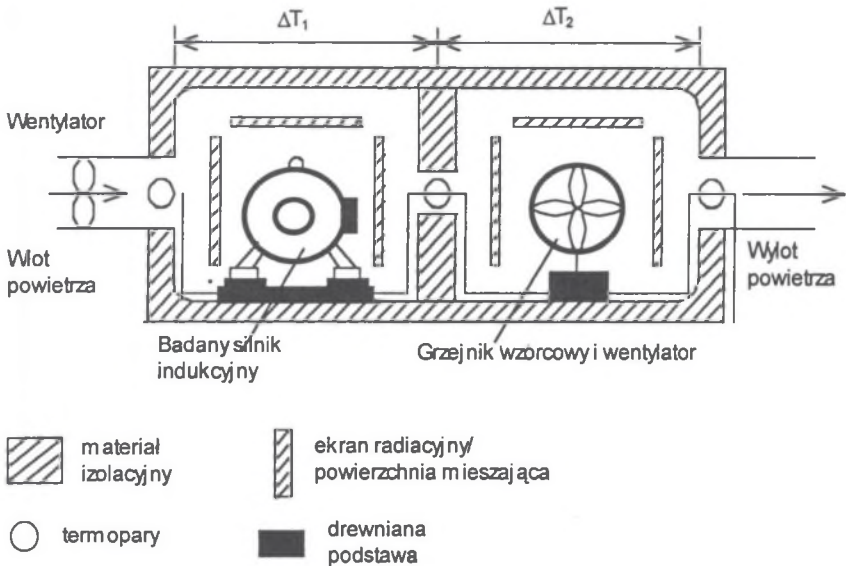
Normy [10, 13] zalecają posługiwanie się metodą kalorymetryczną do wyznaczania strat głównie w prądnicach dużej mocy, ale podane w nich zasady mogą być stosowane również przy badaniu innych maszyn elektrycznych, np. silników zasilanych z falowników.

Stosowane są także układy kalorymetrów otwartych dwukomorowych (rys. 6), w których dodatkowy grzejnik oraz silnik są umieszczone w oddzielnych komorach. Straty mocy są wyznaczone z zależności

$$P_v = P_d \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}, \quad (2)$$

w której:  $P_v$  – wartość strat w silniku;  $P_d$  – moc dostarczona do grzejnika;  $\Delta T_1 = T_2 - T_1$  – przyrost temperatury czynnika chłodzącego wywołany przez ciepło wydzielające się z silnika;  $\Delta T_2 = T_3 - T_2$  – przyrost temperatury czynnika chłodzącego wywołany przez ciepło wydzielające się z grzejnika.

Kalorymetr przedstawiony na rys. 6 był zastosowany do pomiaru strat mocy silnika indukcyjnego klatkowego o wysokiej sprawności, o mocy 7,5 kW [12]. Kalorymetr ten pozwala mierzyć straty do 1000W. Główną zaletą tego typu kalorymetrów jest skrócenie czasu trwania pomiarów strat, np. do ok. 3 godz. Wynika to z okoliczności, że wzorcowanie kalorymetru oraz pomiar strat silnika są przeprowadzane w tym samym czasie, a więc wykonywana jest tylko jedna próba silnika.



Rys. 6. Kalorymetr dwukomorowy  
Fig. 6. Double chamber calorimeter

Założono, że całe ciepło wydzielone wewnątrz kalorymetru jest wyprowadzane na zewnątrz w wyniku wymuszonej konwekcji. Dlatego w stanie cieplnie ustalonym straty silnika  $P_{\text{silnika}}$  mogą być określone jako funkcja mocy cieplnej grzejnika  $P_{\text{grzejnika}}$  i wzrostu temperatury powietrza w każdej komorze  $\Delta T_1$  i  $\Delta T_2$

$$P_{\text{silnika}} = P_{\text{grzejnika}} \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}. \quad (3)$$

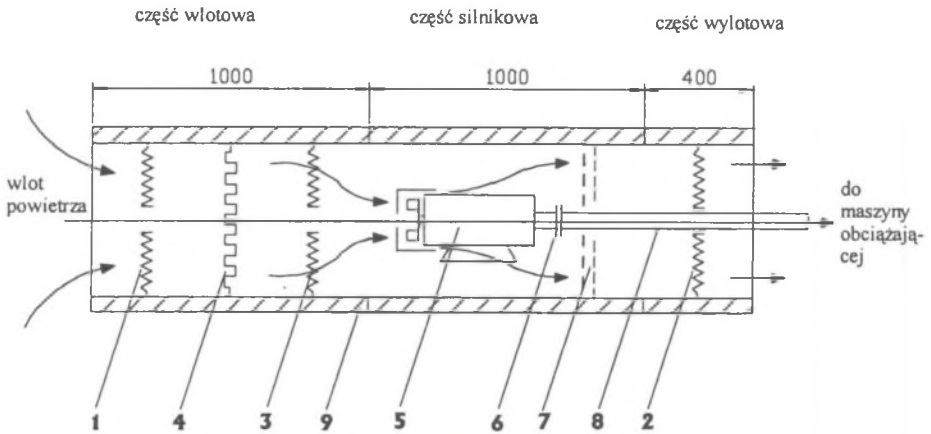
Dokładność pomiaru strat zwiększy się, jeśli uwzględnione zostanie ciepło uciekające poprzez ściany kalorymetru oraz zmiany ciepła właściwego powietrza pod wpływem zmian temperatury.

## 2.2. Układ pomiarowy zastosowany w laboratorium

W artykule przedstawiono układ do pomiarów kalorymetrycznych strat mocy silników indukcyjnych zaprojektowany i zbudowany w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki. Jest to jednokomorowy tunelowy kalorymetr typu otwartego. Układ pomiarowy obejmuje:

- komorę pomiarową (kalorymetr),
- przyrządy do pomiaru przyrostu temperatury czynnika chłodzącego w tunelu oraz do pomiarów parametrów stanu pracy badanego silnika,
- regulowane zasilacze silnika,
- urządzenie obciążające silnik.

Schemat komory pomiarowej przedstawiono na rys. 7. Komora ma kształt tunelu o stałym wzdłuż jego długości przekroju kwadratowym o boku 60 cm. Tunel jest wykonany z drewna, a jego zewnętrzna powierzchnia jest dodatkowo izolowana cieplnie za pomocą płyt styropianowych o grubości 5 cm.



Rys. 7. Szkic komory pomiarowej;

1 – siatka pomiarowa na wlocie, 2 – siatka pomiarowa na wylocie, 3 – dodatkowa siatka pomiarowa dla kontroli zwrotnego cieplnego oddziaływania silnika, 4 – element grzewczy, 5 – badany silnik, 6 – sprzęgło z wkładką izolacyjną, 7 – przegroda wyrównująca rozkład prędkości powietrza, 8 – wał z przegubami Cardana, 9 – cieplnie izolowane ściany komory

Fig. 7. Scheme of the measurement chamber;

1 – the measuring net on inlet, 2 – the measuring net on outlet, 3 – additional measuring net for verification of thermal motor interaction, 4 – heating net, 5 – motor, 6 – shaft coupled with heat insulation, 7 – equalise plates, 8 – Cardan shaft, 9 – chamber insulated walls

Straty całkowite i sprawność wyznaczano dla silnika nagrzanego, bezpośrednio po próbie nagrzewania metodą bezpośredniego obciążenia. Silnik zasilano zarówno ze źródła napięcia o stałej częstotliwości i o korygowanej wartości napięcia tak, aby podczas całego pomiaru można było utrzymywać stałą wartość napięcia  $U = U_N$ .

Obciążeniem silnika była sprzęgnięta z nim maszyna prądu stałego zastosowana jako hamownica.

W przedstawionej metodzie badań kalorymetrycznych posłużono się doświadczalnym wyznaczeniem strat mocy rozproszonych  $P_r$ , tj. mocy nie podgrzewających siatki pomiarowej na wylocie tunelu kalorymetru. Przed przystąpieniem do właściwych badań silnika w stanie obciążenia przeprowadzono dwa pomiary w stanie biegu jałowego. Jeden pomiar zmierzał do wyznaczenia różnic temperatur siatek  $\Delta\theta_{s0}$  przy silniku jako jedynym źródle ciepła w komorze, a drugi – do wyznaczenia przyrostu temperatury  $\Delta\theta_{s0}$ , przy którym w komorze oprócz silnika był włączony grzejnik zapewniający dodatkowe źródło ciepła  $P_{g0}$ .

Dopiero po tym wstępnym etapie przeprowadzano próbę nagrzewania i próbę obciążenia. Po osiągnięciu stanu cieplnie ustalonego silnika zgodnie z wymaganiami normy [10] mierzono różnicę temperatury  $\Delta\theta_s$  siatek na wlocie i na wylocie tunelu. Następnie natychmiast – bez odłączania silnika od źródła zasilania – doprowadzano moc  $P_g$  do siatki grzewczej. Po czasie  $t_p$  (określonym

na podstawie wyznaczonej stałej czasowej siatki grzewczej) mierzono różnicę temperatur siatek na wlocie i na wylocie  $\Delta\theta_{sg}$ .

Zaproponowana metoda pomiaru nie wymaga pomiaru wydatku czynnika chłodzącego oraz znajomości masy właściwej czynnika chłodzącego, będącej funkcją jego wilgotności i temperatury.

### 3. WYNIKI POMIARÓW

W tabeli 1 zestawiono wyniki pomiaru strat mocy różnych silników wykonane metodą kalorymetryczną i jednocześnie metodą bezpośrednią.

Tabela 1  
Straty silników zmierzone metodą kalorymetryczną i metodą bezpośrednią

U [V]	f [Hz]	P <sub>1</sub> [W]	P <sub>N</sub> [W]	P <sub>t kal</sub> [W]	P <sub>t</sub> [W]
400	50	2568	2200	358,1	345,1
380	50	5003	4000	775,8	818,2
380	50	6406	5500	790,5	871
380	50	11770	9200	1093,4	1205

Metoda kalorymetryczna pozwala na pomiar strat mocy silników zasilanych za pośrednictwem półprzewodnikowych przetworników częstotliwości i napięcia. W tabeli 2 zestawiono wyniki pomiaru strat silnika o mocy P<sub>N</sub> = 5,5 kW zasilanego z falownika przy różnych częstotliwościach napięcia zasilającego.

Tabela 2  
Straty silnika zasilanego z falownika, zmierzone metodą kalorymetryczną i metodą bezpośrednią przy różnych częstotliwościach napięcia zasilającego

U [V]	f [Hz]	P <sub>1</sub> [W]	P <sub>t kal</sub> [W]	P <sub>t</sub> [W]
390	60	8103	2188	1775
374	40	5241	849	846
323	30	4046	1019,5	804

gdzie: U – napięcie zasilające silnik, f – częstotliwość napięcia zasilającego, P<sub>1</sub> – moc wejściowa, P<sub>N</sub> – moc znamionowa, P<sub>t kal</sub> – straty mocy zmierzone metodą kalorymetryczną, P<sub>t</sub> – straty mocy zmierzone metodą bezpośrednią.

### 4. ZAKOŃCZENIE

Dokładność pomiarów strat mocy silników elektrycznych metodą kalorymetryczną zależy od układu kalorymetrycznego oraz od zastosowanych przyrządów do pomiaru mocy i do pomiaru temperatury. Głównymi źródłami niedokładności metody kalorymetrycznej są: niedokładność zastosowanych przyrządów pomiarowych, pochłanianie oraz ucieczka ciepła przez ściany kalorymetru, a ponadto nie w pełni ustalony stan cieplny układu.

### LITERATURA

1. Aglén O.: Calorimetric measurement of losses in air-cooled and water-cooled asynchronous motors. International Conference on Electrical Machines 1996, Manchester 10 - 12 September 1996, Volume III, pp 256 – 261.
2. Apeldoorn O., Kriegel K.: Optimal Design of Transformers for High-Power High-Frequency Applications. International Conference EPE'95 Sevilla, pp. 1007–1012.
3. Bakinowska K.: Podstawowe pomiary cieplne. WNT, Warszawa 1995.

4. Binns K. J., Turner D. R., Warne D. F., Shamsadeen B. N.: A Balanced Calorimeter Measurement of Induction Motor Losses. 5th International Conference on Electrical Machines and Drives, London 1991, IEE Conf. Publ. No. 341.
5. Binns K. J., Turner D. R., Warne D. F., Shamsadeen B. N.: Accurate measurements of induction motor losses using balance calorimeters. Proc. IEE 1991, vol. 138, pp. 233–242.
6. Bradley K. J., A. Ferrah, R. Magill, P. Mcleod, J.C. Clare, P. Wheeler, P. Sewell: Precision Calorimetry for Stray Load Loss Determination. Energy Efficiency in Motor Driven Systems", London 20–22 September 1999, pp. 343–352.
7. Brown A. J., Mellory P. H.: Investigation into Effects of Different Anti-Parallel Diode Ratings Upon a Three Phase Sine Wave Inverter Using Calorimetric Test Measurements. Power Conversion PCIM'98, 26 - 28 May Norymberga 1998, pp. 751–760.
8. Buccianti R., Di Gerlando A., Spada P.: Application of calorimetric method for assessing the energy efficiency of low voltage asynchronous motors. L'Energia Elettrica 1986, pp. 196–208.
9. IEC 34-2:1972 Amendment 2:1996.11 Rotating electrical machines – Part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles).
10. IEC 34-2A:1974:1974 First supplement to Publication 34-2 (1972). Rotating electrical machines – Part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles). Measurement of losses by the calorimetric method.
11. Jalilian A., Gosbell V. J., Perera B. S. P., Cooper P.: Double Chamber Calorimeter (DCC): a New Approach to Measure Induction Motor Harmonic Losses. IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, September 1999.
12. Kawada Minoru, Kira Sadami, Fujita Hideshi: Efficiency test site for large alternators by calorimetric method. Hitachi Revue 1972, vol. 21, No. 9, pp. 363–368.
13. PN-IEC 34-2 Maszyny elektryczne wirujące. Metody wyznaczania strat i sprawności na podstawie badań (z wyłączeniem maszyn pojazdów trakcyjnych).

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Władysław Paszek

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lutego 2001 r.

### Abstract

Since all the power losses within a machine appear as generated heat, the determination of losses by their effect can be achieved by measurement of the heat output from the machine. This can be performed by calorimetric methods.

The proposal of calorimeter classification is presented in Fig. 1.

The calorimeter can thus take either an open or closed form (Fig. 2). In both cases the heat generated by the machine can be determined from the measured temperature rise, the fluid rate, the specific heat and the density of the working fluid passing through the calorimeter when assuming the enclosure has adequate thermal insulation.

In the closed cycle calorimeter form the secondary fluid can be air (Fig. 3) or water (Fig. 4).

In the open type calorimeter air is employed as the cooling medium to take away the dissipated heat by the test motor to the outside of the calorimeter. The open type calorimeter can be a single chamber – tunnel one (Fig. 5), or a double chamber one (Fig. 6). All the dissipated heat within the calorimeter is taken away by forced convection produced by a fan. Therefore, under thermally steady state condition motor losses can be estimated as a function of the reference heater input power and temperature rise across each chamber (2).

In Fig. 7 there is a scheme of the measurement chamber. The results of testing the induction motor for the load tests are given in Table 1 and Table 2.