

## **METODA POMIARU ENERGII UŻYTECZNEJ W PROCESIE TECHNOLOGICZNYM PRZETWÓRSTWA ŻYWNOŚCI OPARTA NA STRATACH POSZCZEGÓLNYCH SILNIKA ELEKTRYCZNEGO I MASZYNY ROBOCZEJ**

Paweł Janus

**Streszczenie:** Na podstawie rozważań teoretycznych strat poszczególnych trójfazowego silnika elektrycznego i maszyny roboczej napędzanej przez ten silnik sformułowano modele matematyczne do określenia zużycia energii użytecznej w procesie technologicznym. Zaletą opracowanej metody jest to, że podczas jej stosowania nie są konieczne specjalne postoje zestawu silnik–maszyna robocza w celu połączenia aparatury pomiarowej z silnikiem. W pracy podano przykład zastosowania tej metody do określenia wskaźników jednostkowego zużycia energii użytecznej w procesie rozdrabniania ziaren pszenicy.

**Słowa kluczowe:** energia, pomiar energii, żywność, silnik elektryczny, maszyna robocza

### **WSTĘP**

W zakładach przemysłu spożywczego technolodzy i energetycy często nie wiedzą dokładnie, jakie jest zużycie energii w niektórych podstawowych procesach technologicznych, w których maszyny są napędzane indywidualnymi silnikami elektrycznymi. Fakt ten można tłumaczyć brakiem opracowań, które wskazywałyby, w jaki sposób należy wykonać pomiary zużycia energii bez konieczności zatrzymywania maszyny roboczej na dłuższy czas [Janus i Rywotycki 2001]. Technolodzy wiedzą bowiem, że przerwy w procesie produkcyjnym pogarszają ekonomikę produkcji zakładu [Hicks 1993] i dlatego unikają przestojów. Z kolei dla energetyków znajomość wartości wskaźników zużycia energii w poszczególnych podstawowych procesach technologicznych jest bardzo istotna, ze względu na racjonalną gospodarkę energetyczną zakładu [Singh 1978, Metoda obliczania... 1987, Wojdalski i in. 1998]. W literaturze technicznej podaje się różne metody wyznaczania mocy na wale silnika elektrycznego napędzającego maszynę roboczą [Latek 1984], ale stosowanie ich w praktyce przemysłowej pociąga za sobą długie postoje maszyn, które są niezbędne do zmontowania stanowiska pomiarowego.

---

Spośród wielu metod pomiaru energii, jedynie metodę wyznaczania poszczególnych rodzajów strat mocy w silniku elektrycznym i maszynie roboczej można, po pewnej modyfikacji, przystosować do pomiaru mocy użytecznej, to jest mocy doprowadzonej do procesu technologicznego. Pozostałe metody można także wykorzystać do tego celu, ale są niechętnie stosowane, gdyż wymagają na przykład zainstalowania na wale silnika odpowiedniego momentomierza [Przyrząd... 1988] lub wzorcowania silnika za pomocą specjalnie skonstruowanej hamownicy indukcyjnej [Domagała 1985 a, 1985 b] bądź hamowni komutatorowej [Domagała 1995], co pociąga za sobą niepożądane postoje układu silnik–maszyna robocza. Opracowana przez autora i zaprezentowana w niniejszej publikacji metoda pozwala wykonywać pomiary bez dużych przerw w procesie produkcyjnym.

## MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Metoda polega na wyznaczeniu poszczególnych rodzajów strat w silniku elektrycznym [Latek 1984] i w maszynie roboczej [Janus i Rywotycki 2001]. W rozważaniach przyjęto najczęściej stosowany w praktyce indywidualny układ napędowy, dla którego można sformułować następujące równanie mocy

$$P_u = P_1 - \sum \Delta P - \Delta P_{mu} \quad (1)$$

gdzie:  $P_u$  – moc użyteczna w urządzeniu technologicznym,  
 $P_1$  – moc elektryczna doprowadzona do silnika,  
 $\sum \Delta P$  – suma wszystkich strat mocy w silniku elektrycznym,  
 $\Delta P_{mu}$  – strata mocy mechanicznej w maszynie roboczej.

Podział sumy wszystkich strat mocy  $\sum \Delta P$  na poszczególne rodzaje strat w silniku elektrycznym zaprezentowano na rysunku 1. Straty te opisują następujące równania:

Strata mocy podczas biegu jałowego silnika

$$\Delta P_o = \Delta P_z + \Delta P_m = P_o - 3 \cdot I_o^2 \cdot R_1 \quad (2)$$

Strata mocy w uzwojeniach fazowych stojana w czasie obciążenia silnika

$$\Delta P_{u1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad (3)$$

Strata mocy w uzwojeniu wirnika

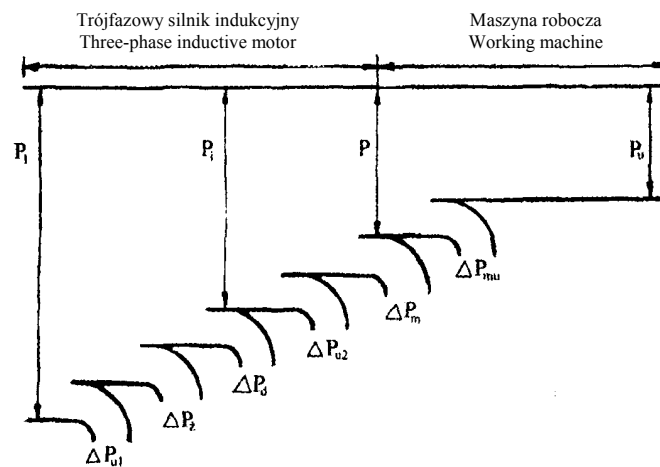
$$\Delta P_{u2} = s \cdot P_i = s \cdot [P_1 - (\Delta P_{u1} + \Delta P_z + \Delta P_d)] \quad (4)$$

Strata mocy dodatkowej występująca w silniku

$$\Delta P_d = 5 \cdot 10^{-3} \cdot P_n \cdot \left( \frac{I_1}{I_n} \right)^2 \quad (5)$$

gdzie:  $\Delta P_z$  – strata mocy w żelazie stojana silnika,  
 $\Delta P_m$  – strata mocy mechanicznej w silniku,

- $P_o$  – moc elektryczna pobrana przez silnik z sieci podczas biegu jałowego,  
 $3 \cdot I_o^2 \cdot R_1$  – strata mocy w uzwojeniu stojana przy biegu jałowym silnika,  
 $I_o$  – prąd biegu jałowego silnika,  
 $R_1$  – rezystancja uzwojenia fazowego stojana,  
 $I_1$  – prąd fazowy stojana przy dowolnym obciążeniu silnika,  
 $s$  – poślizg silnika,  
 $P_i$  – moc wewnętrzna silnika,  
 $P_n$  – moc znamionowa silnika,  
 $I_n$  – prąd znamionowy silnika.



Rys. 1. Wykres Sankeya układu silnik–maszyna robocza:  $P_1$  – moc elektryczna silnika,  $\Delta P_{u1}$  – strata mocy w uzwojeniu stojana,  $\Delta P_2$  – strata mocy w stali stojana,  $\Delta P_d$  – dodatkowa strata mocy silnika,  $P_i$  – moc wewnętrzna silnika,  $\Delta P_{u2}$  – strata mocy w uzwojeniu wirnika,  $\Delta P_m$  – strata mechaniczna mocy silnika,  $P$  – moc mechaniczna silnika,  $\Delta P_{mu}$  – strata mocy w maszynie roboczej,  $P_u$  – moc użyteczna maszyny roboczej

Fig. 1. Sankey's graph for the motor – working machine system:  $P_1$  – electric power of the motor,  $\Delta P_{u1}$  – loss of power in the winding of the stator,  $\Delta P_2$  – loss of power in the steel of the stator,  $\Delta P_d$  – additional loss of power in the motor,  $P_i$  – internal power of the motor,  $\Delta P_{u2}$  – loss of power in the winding of the rotor,  $\Delta P_m$  – mechanical loss of power of the motor,  $P$  – mechanical power of the motor,  $\Delta P_{mu}$  – loss of power in the working machine,  $P_u$  – effective power of the working machine

Strata mocy podczas biegu jałowego silnika  $\Delta P_o$  stanowi grupę strat stałych i różni się od mocy elektrycznej pobieranej przez silnik z sieci przy biegu jałowym  $P_o$  o niewielką stratę mocy  $3 \cdot I_o^2 \cdot R_1$  występującą w uzwojeniach fazowych stojana pod wpływem przepływającego prądu biegu jałowego  $I_o$ .

Drugą grupę straty mocy w silniku stanowią zmienne straty obciążeniowe, do których należą straty mocy w uzwojeniach stojana  $\Delta P_{u1}$ , strata mocy w uzwojeniach wirnika  $\Delta P_{u2}$  i dodatkowa strata mocy  $\Delta P_d$ .

Wymienione straty stałe i obciążeniowe stanowią całkowitą stratę mocy silnika

$$\sum \Delta P = \Delta P_z + \Delta P_m + \Delta P_{u1} + \Delta P_{u2} + \Delta P_d \quad (6)$$

Stratę mocy mechanicznej silnika  $\Delta P_m$  można bardzo dokładnie określić na podstawie równania [Latek 1984]

$$\Delta P_m = \frac{GD^2 \cdot n_o^2}{37,2 \cdot T} \quad (7)$$

gdzie:  $GD^2$  – moment zamachowy silnika (N·m<sup>2</sup>),  
 $n_o$  – prędkość obrotowa biegu jałowego silnika (rd/s),  
 $T$  – stała czasowa wybiegu silnika (s).

Moment zamachowy  $GD^2$  podaje się w katalogu maszyn elektrycznych lub można go wyznaczyć na podstawie zależności

$$GD^2 = 39\,200 D^4 \cdot l \quad (8)$$

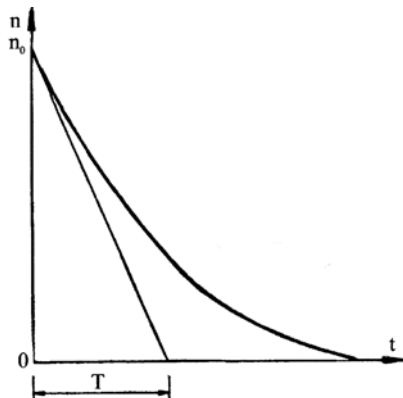
gdzie:  $D$  – średnica wirnika (m),  
 $l$  – czynna długość wirnika (m).

Prędkość obrotową biegu jałowego silnika  $n_o$  i stałą czasową  $T$ , występujące w zależności [Latek 1984], należy określić na podstawie wyznaczonej doświadczalnie krzywej wybiegu silnika (rys. 2).

Stratę mocy w maszynie roboczej wyznacza się za pomocą równania

$$\Delta P_{mu} = P_o' - P_o + 3 \cdot R_1 \cdot (I_o'^2 - I_o'^2) \quad (9)$$

gdzie:  $P_o'$ ,  $I_o'$  – moc elektryczna i natężenie prądu silnika podczas biegu jałowego maszyny roboczej.



Rys. 2. Teoretyczna krzywa wybiegu silnika:  $n_o$  – prędkość obrotowa biegu jałowego,  $T$  – stała czasowa

Fig. 2. Theoretical curve of the coasting of the motor:  $n_o$  – rotary velocity of idling,  $T$  – time constant

Na podstawie równań (1-7) i (9), po dokonaniu niezbędnych przekształceń matematycznych, otrzymuje się wyrażenie na moc użyteczną  $P_u$  procesu technologicznego, przebiegającego w maszynie roboczej (rys. 1)

$$P_u = \frac{n}{n_1} \cdot (P_1 - A \cdot I_1^2 + B) - B + C \quad (10)$$

gdzie:  $n$  – prędkość obrotowa silnika przy dowolnym obciążeniu (rd/s),

$n_1$  – prędkość obrotowa magnetycznego pola wirującego (rd/s),

$A, B, C$  – wielkości stałe.

Wielkości  $A, B, C$  wyrażają się zależnościami

$$A = 3 \cdot R_1 + 0,005 \cdot \frac{P_n}{I_n^2} \quad (11)$$

$$B = 3 \cdot I_o^2 \cdot R_1 - P_o + \frac{GD^2 \cdot n_o^2}{37,2 \cdot T} \quad (12)$$

$$C = 3 \cdot I_o^2 \cdot R_1 - P_o' \quad (13)$$

gdzie: moc znamionowa  $P_n$  i prąd znamionowy  $I_n$  silnika podane są na jego tabliczce znamionowej.

Energię użyteczną zużytą w czasie procesu technologicznego opisuje równanie

$$W_u = P_u \cdot t \quad (14)$$

gdzie:  $W_u$  – energia użyteczna (kJ),

$P_u$  – moc użyteczna (kW),

$t$  – czas trwania procesu (s).

Wskaźnik jednostkowego zużycia energii użytecznej w odniesieniu do ilości materiału przerobionego podczas procesu technologicznego określa się za pomocą zależności [Metoda obliczania... 1987]

$$k = \frac{W_u}{m} \quad (15)$$

gdzie:  $k$  – wskaźnik jednostkowego zużycia energii (kJ/kg),

$m$  – masa przerobionego materiału podczas badanego procesu technologicznego (kg).

Wskaźnik wyrażony zależnością (15) może być wykorzystany także przy doborze silnika energooszczędnego [Flizikowski i Bieliński 2000].

W okresie poprzedzającym badania zużycia energii należy wykorzystać wszelkie postoje układu silnik–maszyna robocza i w podanej niżej kolejności wykonać:

– pomiar rezystancji uzwojeń fazowych stojana  $R_1$ ,

– próbę wybiegu silnika w celu zmierzenia prędkości obrotowej biegu jałowego  $n_o$  i wyznaczenia stałej czasowej  $T$  (rys. 2),

– próbę biegu jałowego silnika i wykonanie pomiarów mocy elektrycznej  $P_o$  i natężenia prądu  $I_o$ ,

– próbę biegu jałowego maszyny roboczej i zmierzenia mocy elektrycznej  $P_o'$  oraz natężenia prądu  $I_o'$ .

Na podstawie powyższych pomiarów i prób otrzymuje się wartości, które są niezbędne do obliczenia stałych A, B, C.

Podczas badania obciążonej maszyny roboczej, kiedy przebiega w niej proces technologiczny, należy rejestrować zmiany obciążenia prądowego  $I_1$ , mocy pobieranej z sieci elektrycznej  $P_1$  i prędkości obrotowej silnika  $n$ .

Opracowaną metodę zaprezentowano na przykładzie badania wpływu wilgotności ziaren na zużycie energii użytecznej podczas przerobu pszenicy na mąkę.

Podczas badań stosowano dwie nieznane odmiany pszenicy, które w pracy oznaczono literami X i Y. Materiał został tak dobrany, aby między badanymi odmianami występowały istotne różnice pod względem twardości pszenicy. Pszenica X miała niską szklistość – była miękka, a pszenica Y miała dużą szklistość – była twarda. Z obu odmian badanej pszenicy odważano po sześć porcji o masie 40 kg każda, po czym porcje te nawilżano do czterech różnych wilgotności. Po 40 h leżakowania uzyskano następujące wilgotności:

- dla pszenicy X: 12,0; 13,9; 15,8; 18,0 (%),
- dla pszenicy Y: 11,7; 14,0; 15,9; 17,8 (%).

Wilgotność ziaren pszenicy oznaczano metodą grawimetryczną, a ilość wody potrzebnej do nawilżania ziaren według metody, którą powszechnie stosuje się w przemyśle [Janus i Rywotycki 2001].

Ziarna pszenicy o podanych wilgotnościach rozdrabniano za pomocą trzech przemysłowych młynków – w dwóch powtórzeniach. Młyny napędzane były trójfazowymi silnikami indukcyjnymi. Podczas badań mierzono za pomocą elektronicznych rejestratorów moc elektryczną  $P_1$ , natężenie prądu  $I_1$  i prędkość obrotową  $n$  silnika. Moc użyteczną  $P_u$  wyznaczano według modelu (10), energię użyteczną  $W_u$  – za pomocą równania (14), a wskaźnik jednostkowego zużycia energii użytecznej  $k$  – według zależności (15).

Niektórzy autorzy [Flizikowski i Bieliński 2000] podają równania na roczne zużycie energii przez silniki asynchroniczne standardowe i energooszczędne, których w tej pracy nie można wykorzystać.

## WYNIKI

Wyniki badań wskaźników jednostkowego zużycia energii przy różnych wilgotnościach ziarna, zaprezentowano na rysunkach 3 i 4. Na rysunku 3 podano wskaźniki dla pszenicy miękkiej X, a na rysunku 4 – dla pszenicy twardej Y.

Dla pszenicy miękkiej o wilgotności  $w \in < 12; 18 >$  % (rys. 3) wskaźnik jednostkowego zużycia energii użytecznej zawarty jest w przedziałach:

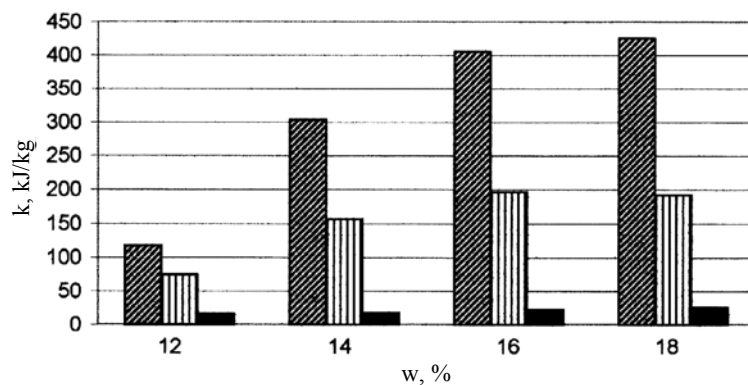
- dla śrutowania  $k \in < 118,09; 425,59 >$  kJ/kg,
- dla przemiału  $k \in < 73,93; 196,59 >$  kJ/kg,
- dla wymielania  $k \in < 16,50; 26,20 >$  kJ/kg.

W przypadku śrutowania pszenicy miękkiej wskaźnik jednostkowego zużycia energii rośnie nieliniowo ze wzrostem wilgotności według równania  $k = -10,36w^2 +$

$361,92w - 2734,12$  przy współczynniku determinacji  $R^2 = 0,944$  i odchyleniu standardowym  $S_{xy} = 47,44$ . Dla przemiału pszenicy miękkiej  $k = -6,112w^2 + 185,21w - 1352$ ;  $R^2 = 0,930$ ;  $S_{xy} = 23,80$ . Dla wymielania pszenicy miękkiej  $k = -0,90w^2 + 20,06w - 175,02$ ,  $R^2 = 0,952$ ;  $S_{xy} = 3,37$ .

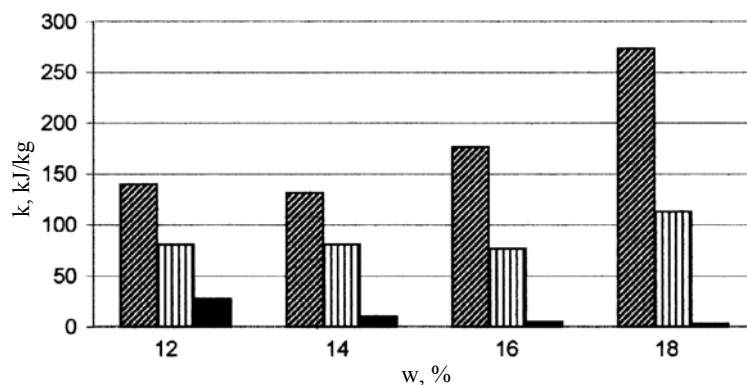
Dla pszenicy twardej o wilgotności  $w \in < 12; 18 > \%$  (rys. 4) współczynnik jednostkowego zużycia energii użytecznej zawarty jest w przedziałach:

- dla śrutowania  $k \in < 140,13; 273,32 > \text{kJ/kg}$ ,
- dla przemiału  $k \in < 80,60; 113,08 > \text{kJ/kg}$ ,
- dla wymielania  $k \in < 27,87; 3,16 > \text{kJ/kg}$ .



Rys. 3. Zależność wskaźnika jednostkowego zużycia energii użytecznej od wilgotności dla pszenicy miękkiej  $k = f(w)$ : słupki lewe – śrutowanie, słupki środkowe – przemiał, słupki prawe – wymielanie

Fig. 3. Dependence of the coefficient of effective energy unit consumption on moisture for soft wheat  $k = f(w)$ : left bars – grinding, central bars – milling, right bars – grind



Rys. 4. Zależność wskaźnika jednostkowego zużycia energii użytecznej od wilgotności dla pszenicy twardej  $k = f(w)$ : słupki lewe – śrutowanie, słupki środkowe – przemiał, słupki prawe – wymielanie

Fig. 4. Dependence of the coefficient of effective energy unit consumption on moisture for durum wheat  $k = f(w)$ : left bars – grinding, central bars – milling, right bars – grind

Dla śrutowania  $k = 6,62w^2 - 176,34w + 1304,24$ ;  $R^2 = 0,904$ ;  $S_{xy} = 52,16$ . Dla przemiału  $k = 0,93w^3 - 40,12w^2 + 559,57w - 2523,20$ ;  $R^2 = 0,982$ ;  $S_{xy} = 21,32$ . Dla wymielania  $k = 0,09w^5 - 7,25w^4 + 220,67w^3 - 3338w^2 + 25075w - 74776$ ;  $R^2 = 1$ ;  $S_{xy} = 5,84$ .

Podczas badań stwierdzono, że ze wzrostem wilgotności ziaren pszenicy rośnie czas śrutowania, co można uzasadnić zwiększającym się współczynnikiem tarcia. Z badań wynika, że ze wzrostem wilgotności ziaren wzrasta jednostkowe zużycie energii, przy czym w przypadku pszenicy miękkiej X wzrost zużycia energii przebiega silniej niż w przypadku pszenicy twardej Y.

## WNIOSKI

1. Opracowaną metodę pomiaru energii użytecznej w procesie technologicznym zaleca się stosować wtedy, kiedy czas na połączenie aparatury pomiarowej z silnikiem napędzającym maszyną roboczą jest ograniczony. Takie ograniczenia czasu mają miejsce przede wszystkim w warunkach przemysłowych.

2. Na podstawie wartości zużycia energii użytecznej w procesie technologicznym można obliczyć istotne dla technologów i projektantów wskaźniki jednostkowego zużycia energii. Na podstawie tych wskaźników można opracować nowe i zmodernizować dotychczasowe procesy w technologii żywności.

3. Na podstawie krzywej wybiegu całego układu silnik–maszyna robocza można wnioskować o jego sprawności i konserwacji. Im krótszy jest czas wybiegu układu w porównaniu z czasem wybiegu nowego, tym większe są opory mechaniczne i tym większe są straty mocy i energii.

4. Za pomocą opracowanej metody wykazano, że jednostkowe zużycie energii użytecznej podczas rozdrabniania pszenicy wzrasta ze wzrostem wilgotności ziarna i że przy rozdrabnianiu pszenicy miękkiej zużycie energii jest większe niż przy rozdrabnianiu pszenicy twardej.

## PIŚMIENNICTWO

- Domagała A., 1985 a. Wytyczne do projektowania hamownicy indukcyjnej. *Wiad. Elektrotech.* 43 (1), 8-9.
- Domagała A., 1985 b. Projektowanie hamownicy indukcyjnej. *Wiad. Elektrotech.* 43 (2), 31-32.
- Domagała A., 1995. Sterowanie trójfazowej hamownicy komutatorowej. *Pomiary-Automatyka-Kontrola.* 21 (12), 489-492.
- Flizikowski J., Bieliński K., 2000. Projektowanie środowiskowych procesorów energii. Wyd. AT-R Bydgoszcz.
- Hicks T. C., 1993. *Fundamental concepts in the design of experiments.* 4th Ed. Saunders College Publishing, New York.
- Janus P., Rywotycki R., 2001. Wybrane zagadnienia z maszynoznawstwa przemysłu spożywczego. Wyd. AR Poznań.
- Latek W., 1984. *Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle.* WNT Warszawa.
- Metoda obliczania wskaźników jednostkowego zużycia paliw i energii w produkcji rolniczej w przetwórstwie rolno-spożywczym, 1987. *Zesz. Metod.* 71.
- Przyrząd do pomiaru momentu obrotowego i siły. 1988. Prospekt Zakładu Doświadczalno-Konstrukcyjno-Prototypowego. PIMR Poznań.



Singh R.P., 1978. Energy accounting in food process operation. Food Technol. 4, 40-44.

Wojdalski J., Domagała A., Kaleta A., Janus P., 1998. Użytkowanie energii w przemyśle rolnospożywczym. Wyd. SGGW Warszawa.

#### **METHOD OF MEASUREMENT OF EFFECTIVE ENERGY IN FOOD PROCESSING BASED ON THE INDIVIDUAL LOSSES OF THE MOTOR AND THE WORKING MACHINE**

**Abstract:** On the basis of theoretical considerations on the individual losses of a three-phase electric motor and a working machine driven by this motor, mathematical models were formulated to determine the consumption of effective energy in the technological process. The advantage of this method is that it is not necessary to have special shutdowns of the motor – working machine unit to connect the measuring apparatus to the motor. This paper presents an example of the application of this method to determine the coefficients of unit consumption of effective energy in the process of crushing wheat grain.

**Key words:** energy, measurement of energy, food, electric motor, working machine

*P. Janus, Instytut Technologii Żywności Pochodzenia Roślinnego, Akademia Rolnicza w Poznaniu, ul. Wojska Polskiego 31, 60-624 Poznań*