

Metoda wyznaczania momentu obciążenia silnika indukcyjnego na stanowisku pracy poprzez pomiar strumienia poosiowego

Janusz Petryna, Maciej Sułowicz, Arkadiusz Duda, Zbigniew Ławrowski, Krzysztof Guzicz

1. Wstęp

Problematyka wykorzystania strumienia poosiowego maszyn prądu przemiennego w diagnostyce i eksploatacji jest od dawna obecna w badaniach i publikacjach [1–8]. Od pewnego czasu obserwuje się także zainteresowanie tą tematyką ze strony przemysłu [9]. Autorzy tego opracowania również zajmują się nią od paru lat [8–9], [11–14]. Wyniki obliczeń polowych [11–12] stały się zachętą do zbadania możliwości wyznaczania obciążenia silnika poprzez pomiar strumienia przy użyciu cewki o prostej budowie.

2. Pomiar na stanowisku pracy

2.1. Pomiar na stanowisku pracy silnika wentylatora spalin

Objektem badań był silnik wentylatora spalin Sf 750 X8, $P_n = 1700$ kW, $n_n = 745$ obr./min, $U_n = 6000$ V. W stanie ustalonym na stanowisku pracy zarejestrowano przebieg czasowy napięcia na wyjściu cewki pomiarowej umieszczonej od strony wentylatora (rys. 1).

Z widma strumienia wyznaczono obroty silnika $n = 747,5 - 747,6$ obr./min w oparciu o składową $sf_0 = 0,1583$ Hz. Obliczono także wartość skuteczną napięcia cewki proporcjonalnego do pochodnej strumienia poosiowego: $U_\Psi = 23,5$ mV. Na podstawie danych znamionowych silnika i wyznaczonych obrotów wyliczono moment elektromagnetyczny: $T_e = 12910$ Nm.



Rys. 1. Silnik wentylatora spalin na stanowisku pracy w elektrowni, cewka pomiarowa umieszczone za wentylatorem

Streszczenie: W pracy przedstawiono metodę wyznaczania momentu obciążenia silnika indukcyjnego opartą na pomiarze strumienia poosiowego. Pomiar wykonano na stanowisku pracy silnika w elektrowni, zaś w stacji prób podczas obciążania uzyskano charakterystyki ilustrujące zależności momentu od strumienia i od prędkości obrotowej. Zaproponowano sposób wykorzystania pojedynczego pomiaru do oszacowania momentu. Proponowana metoda jest stosunkowo prosta do realizacji i pozwala na w pełni bezinwazyjne wyznaczanie momentu obciążenia silników indukcyjnych. Po zautomatyzowaniu pomiarów może ona zostać wykorzystana w systemach monitoringu stanu maszyny działających online.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, pomiar bezkontaktowy, strumień poosiowy, widma strumienia poosiowego, moment elektromagnetyczny, moment obciążenia, stacja prób

THE METHOD FOR CONTACTLESS DETERMINATION OF AN INDUCTION MOTOR LOAD TORQUE BASED ON THE AXIAL FLUX MEASUREMENT AT A WORKPLACE

Abstract: The paper presents a method for determining the load torque of an induction motor based on the measurement of axial flux. The measurement was carried out at the motor workplace in the power plant, while in the test station, during the loading, characteristics illustrating the dependence of the torque on the axial flux and on the rotational speed were obtained. A way of using a single measurement to estimate the torque has been proposed. The method is relatively simple to implement and allows for a fully noninvasive determination of the load torque. After automating the measurements, it can be used in online machine monitoring systems.

Keywords: induction motor, contactless measurement, axial flux, flux spectra, electromagnetic torque, load torque, testing station

2.2. Pomiar na rozdzielni

W tym samym czasie na rozdzielni zarejestrowano przebiegi czasowe prądów fazowych przy użyciu cewek Rogowskiego oraz napięć międzyfazowych z wykorzystaniem sond napięciowych.

Napięcie $U = 6381,6$ V. Prądy: $I_{s2} = 84,0$ A, $I_{s3} = 82,68$ A. Moc pobierana z sieci odczytana z pola silnika $P_1 = 1,034 \cdot 10^3$ kW.

W oparciu o te pomiary wyznaczono punkt pracy maszyny: moc, obroty i moment elektromagnetyczny wg formuł:

$$T_e = 9,55P_\Psi (1 - s) / n = 9,55P_\Psi / n_0 \quad (1)$$

gdzie:

$$P_\Psi = P_1 - 3R_s I_s^2 \quad (2)$$

P_1 – moc pobierana z sieci jako wartość średnia mocy chwilowej równej sumie $\Sigma U(t) I(t)$;

n – obroty wirnika;

n_0 – obroty synchroniczne.

Moc przesłana do wirnika (tzw. moc w szczelinie):

$$P_\Psi = P_1 - 3R_s I_s^2 = 1,031 \cdot 10^3 \text{ kW.}$$

Moment elektromagnetyczny:

$$T_e = P_\Psi (1 - s) / \omega = 9,55 \cdot P_\Psi / n_0 = 13\,128 \text{ Nm.}$$

Wartość ta, jak widać, jest bliska wartości momentu 12910 Nm wyliczonego w podrozdziale 2.1 w oparciu o obroty wyznaczone z widma strumienia.

Błąd względny wynosi:

$$(12910 - 13\,128) / 13\,128 = -0,0166 = -1,66\%.$$

Moc obciążenia:

$$P = T_e \cdot n / 9,55 = 12\,910 \cdot 747,6 / 9,55 = 1010,63 \text{ kW.}$$

2.3. Pomiar na stanowisku pracy silnika pompy wody

Obiektem badań był silnik pompy wody Sg250M2 ($P_n = 55 \text{ kW}$, $n_n = 2970 \text{ obr./min}$, $U_n = 380/660 \text{ V}$ przy połączeniu Δ). W stanie ustalonym na stanowisku pracy zarejestrowano przebiegi czasowe napięcia na wyjściu cewki pomiarowej umieszczonej od strony wentylatora (rys. 2), prądów fazowych przy użyciu cewek Rogowskiego oraz napięć międzyfazowych z wykorzystaniem sond napięciowych. W oparciu o te pomiary wyznaczono punkt pracy maszyny: obroty i moment elektromagnetyczny wg formuł (1) i (2).

Zmierzony punkt pracy silnika na instalacji to $n = 2983,4 \text{ obr./min}$, moment $T_e = 124,51 \text{ Nm}$, zatem moc obciążenia to $P = T_e \cdot n / 9,55 = 40,5 \text{ kW}$.

Na podstawie danych znamionowych i katalogowych silnika oraz wyznaczonych obrotów wyliczono moment elektromagnetyczny: $T_e = 122,12 \text{ Nm}$.

Błąd względny wynosi:

$$(122,12 - 124,51) / 124,51 = -0,0192 = -1,92\%.$$

3. Pomiar na stacji prób

3.1. Pomiary silnika pompy wody Sg250M2

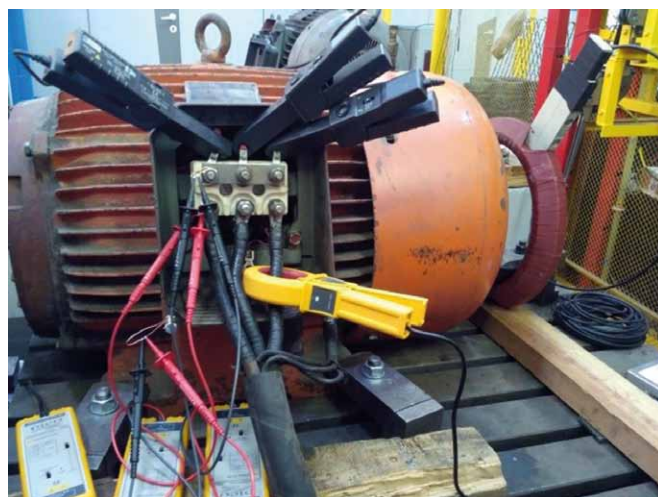
Badany wcześniej na stanowisku pracy silnik został następnie umieszczony na stanowisku testów w stacji prób, gdzie wykonano pomiary obciążeniowe maszyny z jednoczesnym pomiarem napięcia True RMS pochodnej strumienia poosiowego,



Rys. 2. Sposób pomiaru strumienia poosiowego na stanowisku pracy - cewka na statywie



Rys. 3. Silnik obciążony na stanowisku w stacji prób



Rys. 4. Silnik na stanowisku w stacji prób - rejestracje prądów, napięć i strumienia

prądów i napięć fazowych, rejestrowanych przy użyciu karty pomiarowej i niezależnie multimetru UT71D, jak pokazano na rys. 3 i 4.

W rezultacie otrzymano charakterystykę napięcia skutecznego True RMS z cewki pomiarowej $U_{\psi} = f(T_m)$, przedstawioną na rys. 5 w zakresie obciążenia silnika od 57% do ponad 120% momentu znamionowego.

Już na tym etapie, na podstawie wartości skutecznej napięcia, można odczytać aktualny moment obciążenia. Z kolei na rys. 6 przedstawiono odwróconą charakterystykę $T_m = f^{-1}(U_{\psi})$.

Z dużą dokładnością można wyliczyć obroty badanego silnika. Widmo strumienia zawiera co najmniej 3 składowe, niosące informacje o prędkości obrotowej, na przykład składowa sf_0 (s – poślizg wirnika), f_r (częstotliwość obrotowa wirnika) oraz $f_0(1-s)$. Na rys. 7 zamieszczono właśnie składowe sf_0 odczytane z widm przy różnych obciążeniach badanego silnika.

Z tych wartości otrzymuje się obroty wg formuły:

$$n = n_0 (1 - s) \quad (3)$$

oraz wykres $n = f(T_m)$ jak na rys. 8, z którego już można odczytać moment dla danych obrotów.

Uzyskane pomiarowo charakterystyki $U_{\psi} = f(T_m)$, $T_m = f^{-1}(U_{\psi})$ oraz $n = f(T_m)$ i $T_m = f^{-1}(n)$ uzasadniają tytułową metodę bezkontaktowego wyznaczania momentu obciążenia w oparciu o pomiar strumienia i wynikających z niego obrotów.

Odczyt momentu obciążenia można zrealizować w jeszcze łatwiejszy sposób. Aby uzyskać ze strumienia informację o obrotach, niekoniecznie trzeba poszukiwać odpowiednich składowych w widmach. Autorzy dysponują bowiem układem pomiarowym, który sygnał napięciowy z cewki przetwarza bezpośrednio na obroty. W ten wygodny sposób można z charakterystyki $n = f(T_m)$ lub $T_m = f(n)$ na podstawie wyświetlanych aktualnych obrotów odczytywać odpowiadające im wartości momentu.

Czy dla każdego silnika konieczne jest wykonanie badań w stacji prób, mających na celu uzyskanie charakterystyk $T_m = f(n)$ lub $T_m = f(U_{\psi})$?

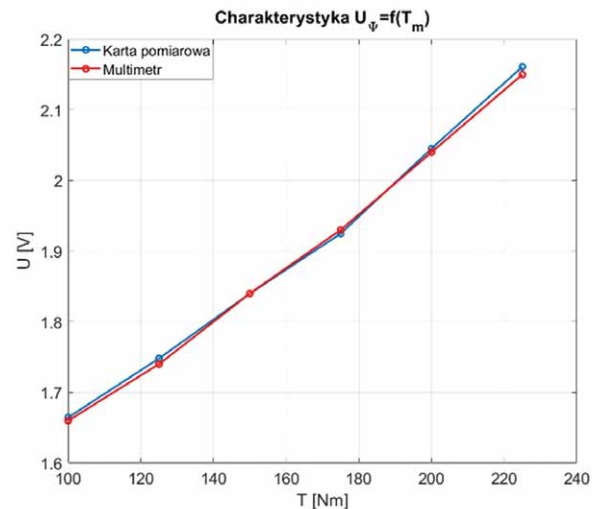
Tak byłoby najlepiej, lecz w praktyce nie jest to możliwe nawet dla najważniejszych maszyn bloku.

Natomiast w oparciu o dwa punkty pracy silnika na instalacji w elektrowni – jeden zmierzony, a drugi obliczony w zakresie typowych obciążeń – można uzyskać bardzo zbliżoną do rzeczywistej charakterystykę, która umożliwi odczyt momentu z całkiem dobrą dokładnością.

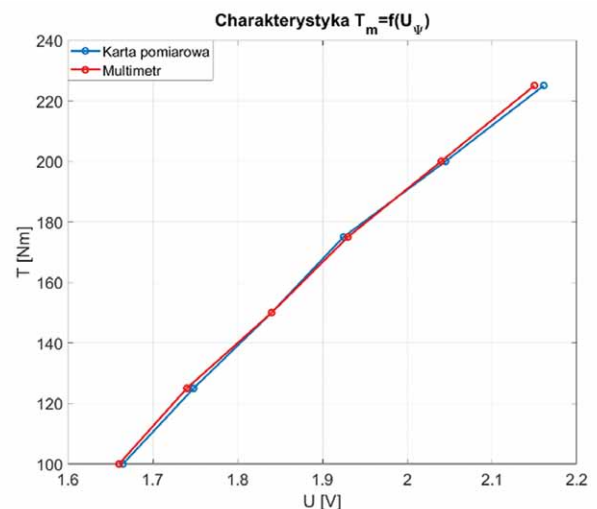
W przypadku dosyć stromej charakterystyki $T_m = f(n)$ zmierzony punkt pracy silnika na instalacji to $n = 2983,4$ obr./min i $T = 124,51$ Nm, zatem moc obciążenia to $P = 40,5$ kW. Jest to akurat drugi punkt na charakterystyce $n = f(T_m)$ z rys. 8.

Obliczając obroty dla obciążenia na przykład 150 Nm (trzeci punkt na wykresie), otrzymuje się $n = 2978$ obr./min, czyli o 2 obroty mniej niż na charakterystyce. Skutkuje to odczytem momentu o wartości 140 Nm, zatem błąd wynosi $-6,6\%$.

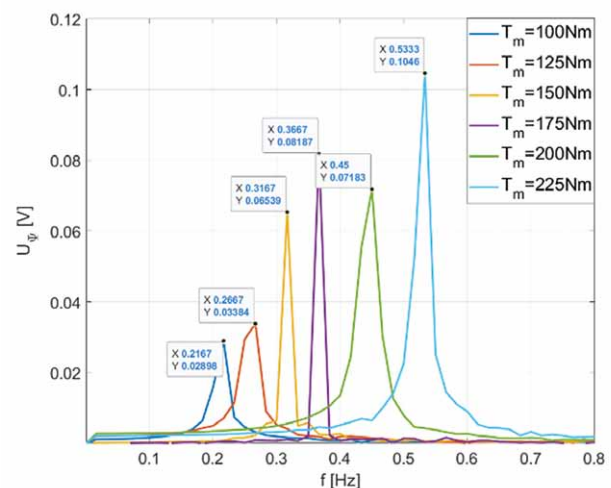
Obliczając obroty dla obciążenia na przykład 200 Nm (piąty punkt na charakterystyce), otrzymuje się $n = 2970$ obr./min, czyli o 2,5 obrotów mniej niż na charakterystyce. Skutkuje to odczytem momentu o wartości 212 Nm, zatem błąd wynosi $+6\%$.



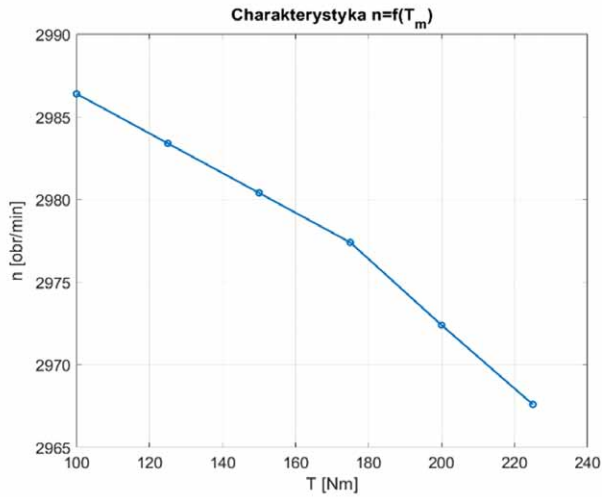
Rys. 5. Napięcie skuteczne od strumienia poosiowego w funkcji momentu obciążenia



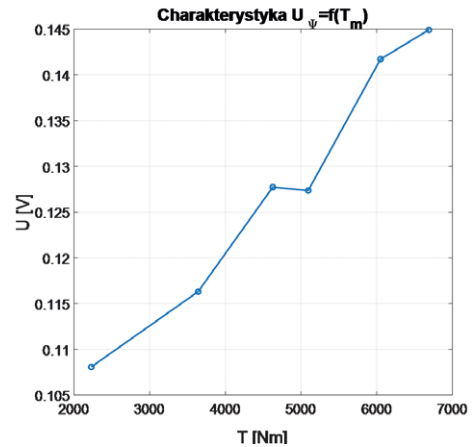
Rys. 6. Moment obciążenia w funkcji napięcia skutecznego od strumienia poosiowego



Rys. 7. Składowe sf_0 strumienia poosiowego dla różnych obciążeń w funkcji częstotliwości



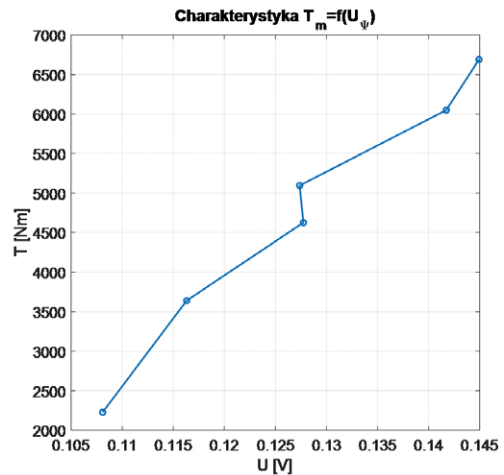
Rys. 8. Obroty silnika w funkcji momentu obciążenia



Rys. 10. Napięcie skuteczne od strumienia poosiowego w funkcji momentu obciążenia



Rys. 9. Silnik 1000 kW obciążany na stanowisku w stacji prób przez identyczną maszynę



Rys. 11. Moment obciążenia w funkcji napięcia skutecznego od strumienia poosiowego

3.2. Pomiary silnika Sn500H4B, $P_n = 1 \text{ MW}$, $n_n = 1494 \text{ obr./min}$, $U_n = 6000 \text{ V}$

Wykorzystano okazję wykonania kolejnego badania na stacji prób: tym razem silnika wentylatora podmuchu WP. Silnik ten, zasilany z sieci 6 kV, był obciążany przez identyczną maszynę pracującą jako hamulec, zasilaną napięciem regulowanym o przeciwnej kolejności faz.

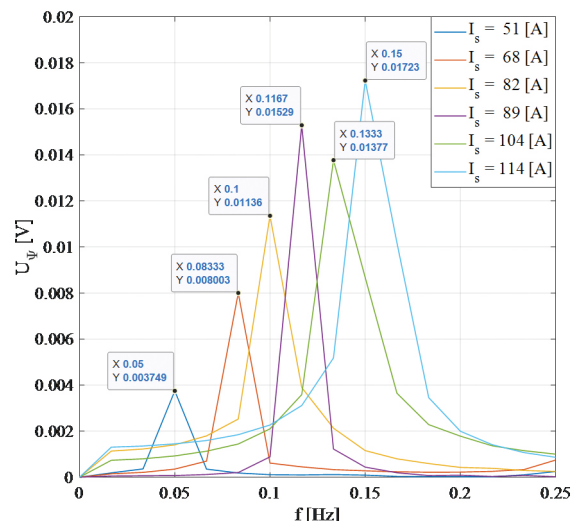
Otrzymano charakterystykę napięcia skutecznego z cewki pomiarowej $U_{\Psi} = f(T_m)$ przedstawioną na rys. 10.

Na podstawie wartości skutecznej napięcia można odczytać aktualny moment obciążenia. Z kolei na rys. 11 przedstawiono odwróconą charakterystykę $T_m = f^{-1}(U_{\Psi})$.

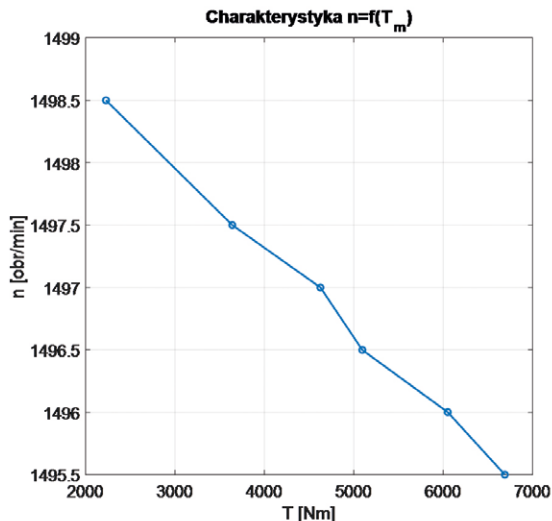
Należy wyjaśnić, że nieciągłości charakterystyk z rys. 10 i 11 wiązały się z trudnościami w utrzymaniu nastawianej wartości obciążenia podczas sesji pomiarowej w stacji prób.

Na rys. 12 zamieszczono składowe s_f_0 odczytane z widm przy różnych obciążeniach badanego silnika.

Na rys. 13 przedstawiono charakterystykę $n = f(T_m)$, z której można odczytać moment dla danych obrotów.



Rys. 12. Składowe s_f_0 strumienia poosiowego dla różnych obciążeń w funkcji częstotliwości



Rys. 13. Obroty silnika w funkcji momentu obciążenia

4. Wnioski

W pracy przedstawiono metodę wyznaczania momentu obciążenia silnika indukcyjnego opartą na pomiarze strumienia poosiowego.

Pomiary wykonano na stanowiskach pracy silników w elektrowni, zaś w stacji prób podczas obciążania uzyskano charakterystyki ilustrujące zależności momentu od strumienia i od prędkości obrotowej. Zaproponowano sposób wykorzystania pojedynczego pomiaru do oszacowania momentu.

Przedstawione wyniki badań zdaniem autorów zachęcają do podjęcia dalszych, bardziej zaawansowanych prac w kierunku bezkontaktowego wyznaczania obciążeń silników indukcyjnych. Jednym z możliwych rozwiązań byłby system online umożliwiający – po wprowadzeniu podstawowych danych silnika – wygenerowanie aktualnej wartości momentu obciążenia z akceptowalną dokładnością na podstawie jednorazowego pomiaru strumienia.

Literatura

- [1] JARZYNA W.: *Diagnostic characteristics of Axial Flux in an Induction Motor*. Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives, 1995 (Conf. Publ. No. 412).
- [2] DORRELL D.G., THOMSON W.T., ROACH S.: *Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic air-gap eccentricity in 3-phase induction motors*. IEEE Transactions on Industry Applications, 33(1)/1997.
- [3] KOKKO V.: *Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements*. Academic Dissertation, University of Oulu, 2003, Finland.
- [4] GOŁEBIOWSKI L., GOŁEBIOWSKI M., NOGA M., SKWARCZYNSKI J.: *Axial flow in 3D FEM model of induction machine*. „Elektrotechnika i Elektronika” 2(25)/2006.
- [5] CHMELÍK K., FOLDYNA J., MIŠÁK S.: *Magnetické pole v okolí asynchronního stroje, jeho zjišťování a využití*. Electroscopie, č. 2. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2007.
- [6] BOBOŇ A.: *3D Finite Element Computation of Axial Flux in Induction Motor*. Transactions on Electrical Engineering, vol. 1 (2012), no. 3 A247.

- [7] PIETROWSKI W.: *Wavelet analysis of axial flux in an induction machine on no-load test*. „Electrical Review” 7b(88)/2012.
- [8] TULICKI J., PETRYNA J., SUŁOWICZ M.: *Fault diagnosis of induction motors in selected working conditions based on axial flux signals*. Technical Transactions, Issue: 13. Electrical Engineering, Issue: 3-E, 2016.
- [9] ŁAWROWSKI Z., DUDA A., PETRYNA J., SUŁOWICZ M.: *Wyznaczenie momentu obciążenia silnika indukcyjnego w oparciu o pomiar strumienia poosiowego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 110/2016.
- [10] EWERT P.: *Use of Axial Flux in the Detection of Electrical Faults in Induction Motors*. IEEE International Symposium on Electrical Machines (SME), 2017.
- [11] TULICKI J., SUŁOWICZ M., PETRYNA J.: *Application of the 2D field model to determine the axial flux signal for the purpose of diagnosing induction motors*. 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts, Lodz 2017.
- [12] PETRYNA J., TULICKI J., SUŁOWICZ M.: *Calculating an electromechanical torque of a squirrel cage motor based on an axial flux obtained by the FEM*. II International Conference of Computational Methods in Engineering Science (CMES'17), 2017, ITM Web Conf., Volume 15, 2017.
- [13] SUŁOWICZ M., TULICKI J., PETRYNA J., DUDA A.: *Wpływ uszkodzeń silnika indukcyjnego na dokładność bezkontaktowego wyznaczania momentu elektromagnetycznego z sygnału strumienia poosiowego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 119/2018.
- [14] PETRYNA J., SUŁOWICZ M., DUDA A., ŁAWROWSKI Z., GUZIEC K.: *Bezkontaktowe wyznaczanie momentu obciążenia silnika indukcyjnego na stanowisku pracy w energetyce w oparciu o pomiar strumienia poosiowego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 122/2019.

Informacje dodatkowe

Badania, których wynikiem jest niniejsza praca, zostały sfinansowane po części przez firmy Energotest-Diagnostyka Sp. z o.o. i SENCO Sp. z o.o. oraz w ramach umowy TME 4690/2018 z PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna SA, jak również po części w ramach tematu badawczego działalności statutowej E-2/568/2018/DS, z dotacji na naukę przyznanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

dr inż. J. Petryna, e-mail: jpetryna@pk.edu.pl
 dr inż. M. Sułowicz, e-mail: msulowicz@pk.edu.pl
 dr inż. A. Duda, e-mail: aduda@pk.edu.pl
 Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii;
 dr inż. Zbigniew Ławrowski
 e-mail: z.lawrowski@energotest-diagnostyka.pl
 Energotest-Diagnostyka Sp. z o.o.;
 mgr inż. K. Guzicz
 e-mail: office@senco.krakow.pl
 SENCO Sp. z o.o.