

Wieloetapowy proces diagnostyki układów napędowych

Adam Sołbut

1. Wstęp

Diagnostyka silników indukcyjnych opiera się zwykle na analizie harmonicznej prądu fazowego stojana [1]. W literaturze dostępne są opisy metod wykorzystujących inne sygnały, takie jak np.: wartość mocy chwilowej pobieranej przez silnik [1, 2], strumień stojana i wirnika, moment elektromagnetyczny [1, 6] czy ruchoma wartość skuteczna prądu stojana [3]. Wszystkie metody wykorzystują pojawienie się, w wyniku wystąpienia uszkodzenia, dodatkowych składników zmieniających kształt prądu fazowego stojana. Istotnym problemem jest tu fakt, że wartości tych składników są ściśle powiązane ze stanem pracy silnika.

W wyniku uszkodzeń pojawiają się składniki o częstotliwościach zależnych od poślizgu, stąd diagnostyka musi opierać się na pracy w stanie ustalonym przy obciążeniu silnika co najmniej połową momentu znamionowego [1]. Fakt ten ogranicza możliwości stosowania znanych metod diagnostycznych w czasie eksploatacji układu napędowego. Innym ważnym problemem, wynikającym z rozwoju techniki, jest fakt stosowania przekształtników częstotliwości do sterowania pracą silnika. W pracy [3] wykazano, że wyniki badań diagnostycznych silnie zależą od algorytmów sterowania pracą przemienników. Istotnym problemem staje się opracowanie wskaźników oceny stanu układu napędowego, który można by wykorzystać do diagnostyki niezależnie od sposobu zasilania silnika. W niniejszej pracy dokonano analizy aktualnych możliwości oceny stanu układu napędowego z silnikami asynchronicznymi zasilanymi z przemienników częstotliwości.

2. Wpływ sposobu sterowania pracą przemiennika częstotliwości na sygnały diagnostyczne

W literaturze dominuje prezentacja algorytmów diagnostycznych dla układów napędowych zasilanych ze źródeł napięcia (sieć lub przemiennik częstotliwości sterowany metodą skalarną). W publikacjach [1, 3] wykazano, że dla obu przypadków można stosować algorytmy diagnostyczne oparte na ekstrakcji cech uszkodzeń w oparciu o analizę harmoniczną wartości chwilowej prądu stojana. Dobre efekty uzyskuje się tu w algorytmach opartych na metodach sztucznej inteligencji [1]. Dużym problemem w praktycznych rozwiązaniach jest stosowanie algorytmów, które wykorzystują sprzężenia zwrotne [3, 6]. Metody te opierają się głównie na wykorzystaniu estymatorów strumienia, prędkości i momentu. Problemem, który często ogranicza lub uniemożliwia stosowanie klasycznych metod, jest brak informacji o częstotliwości podstawowej harmonicznej w przebiegu napięcia fazowego silnika. Stan kluczowy

Streszczenie: W pracy dokonano analizy aktualnych możliwości oceny stanu układu napędowego z silnikami asynchronicznymi zasilanymi z przemienników częstotliwości. Zaproponowano wykonywanie oceny stanu napędu w kilku etapach: wstępna ocena stanu (ocena wartości współczynników diagnostycznych), analiza danych historycznych (ocena trendu zmian wartości współczynników w dłuższym okresie czasu) oraz ocena stanu pod kontrolą pracy przekształtników (ograniczenie wpływu sprzężeń zwrotnych na wartość współczynników diagnostycznych). Proponowane rozwiązania możliwe są na podstawie pomiaru wartości chwilowych prądów silnika oraz ich filtracji, polegającej na zastosowaniu specyficznych algorytmów pozwalających na wyodrębnienie składników charakterystycznych dla wybranych uszkodzeń.

Słowa kluczowe: diagnostyka, maszyny indukcyjne, przemienniki częstotliwości

🇬🇧 MULTISTAGE MOTOR DRIVES DIAGNOSTIC PROCESS

Abstract: Analysis of actual state estimation possibilities for inverter-fed asynchronous motor drives is presented in the paper. Discussed state estimation is proposed in few stages: preliminary state estimation (diagnostic factors calculation values), historical data analysis (evaluation of diagnostic factors values historical trend in a certain amount of time), and the last stage – state estimation under frequency inverters control (limitation of influence of the inverter's feedbacks control signals on the diagnostic factors). Proposed solutions are possible basing on transient motor currents values measuring, and filtering them by specific author's algorithms calculation providing separation of components, that are specific for chosen motor damages.

Keywords: diagnosis, induction motors, voltage inverters

przemiennika częstotliwości często jest uzależniony od wartości chwilowych prądu, prędkości obrotowej, położenia kąтового wału wirnika, zadanej i estymowanej wartości momentu obrotowego itp. Stosowanie metod opartych na analizie harmonicznej prowadzi często do błędnych wniosków [3, 4].

Jednym z problemów diagnostyki maszyn jest stosunkowo mała amplituda składników prądu wynikających z uszkodzeń. Jednym ze sposobów uwydatnienia sygnałów diagnostycznych jest metoda oparta na filtracji podstawowej harmonicznej prądu

stojana [5]. Taki sposób wyeksponowania wpływu uszkodzeń na wartości sygnałów diagnostycznych jest skuteczny przy stałej wartości podstawowej harmonicznej napięcia zasilającego, np. przy zasilaniu z sieci. Przy pracy z przemienników częstotliwości podobny efekt uzyskujemy poprzez obliczenie ruchomej wartości skutecznej prądu stojana [3].

3. Ocena stanu układów napędowych z przemiennikami częstotliwości

Przyczyną utrudniającą ocenę stanu silnika jest wpływ zmian momentu obciążenia w czasie pomiaru. Problemem jest także zmienność częstotliwości napięcia zasilającego. Istotne zmiany wartości sygnałów widoczne są przy pracy w stanie ustalonym i obciążeniu co najmniej połową momentu znamionowego [3]. Przy zasilaniu silnika napięciem o częstotliwości 50 Hz dla wykonania analizy harmonicznej prądu stojana niezbędna jest rejestracja dużej liczby próbek w czasie większym od 10 s. W przypadku zmniejszenia częstotliwości napięcia czas ten należy wydłużyć. Rozwiązanie takie wymusza zastosowanie sprzętu o dużych wymaganiach dotyczących pamięci operacyjnej, jak i wydajności procesora.

W przypadku zasilania silnika z przemienników częstotliwości dochodzą problemy wynikające z zastosowanego algorytmu sterowania pracą układu napędowego z uwzględnieniem sprzężeń zwrotnych [3, 6]. Wyniki badań laboratoryjnych prezentowane w poz. [1, 3] wykazały, że ocena stanu wykonana na podstawie analizy harmonicznej przebiegów chwilowych prądu stojana daje bardzo dobre efekty przy zasilaniu z sieci i przy przemienniku częstotliwości sterowanym metodą skalarną. Sterowanie metodami nieliniowymi (np. odmiany DTC) nie daje zadowalających wyników [3]. Większość publikacji dotyczących diagnostyki maszyn indukcyjnych opiera się na porównaniu pracy maszyny sprawnej oraz modelowaniu wybranych uszkodzeń. Zakłada się tu poprawną pracę źródła zasilania oraz pozostałych składników układu napędowego. W praktyce występuje wiele czynników, które wpływają na przebieg wartości chwilowej prądu stojana, a także w przebiegu innych sygnałów wykorzystywanych w procesie diagnostyki. Przebieg wartości chwilowych sygnałów diagnostycznych jest uwarunkowany jakością silnika, stanem łożysk, połączeń mechanicznych, a w przypadku zasilania z przemienników częstotliwości także jakością napięcia w układzie pośredniczącym prądu stałego [3], zastosowanym algorytmem sterowania oraz jakością estymatorów (lub pomiarów).

W zależności od mocy silnika istotne jest także utrzymanie stałego obciążenia w czasie rejestracji sygnałów diagnostycznych. Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji [1] ułatwia ocenę stanu układów napędowych. Pojawia się tu jednak problem uczenia sieci neuronowych oraz doboru i pochodzenia danych uczących [1]. Problemem jest także konieczność użycia sprzętu o dużej mocy obliczeniowej.

4. Proces diagnostyki układu napędowego

Biorąc pod uwagę dużą różnorodność algorytmów sterowania pracą przemienników częstotliwości w układach napędowych oraz wiele możliwych przyczyn powodujących pojawienie się składników wskazujących na pogarszający się stan układu

napędowego, warto proces diagnostyki rozłożyć na kilka etapów:

- ocena stanu układu napędowego jako całości w czasie normalnej pracy napędu;
- rejestracja sygnałów diagnostycznych umożliwiająca wstępną lokalizację miejsca awarii przy ograniczeniu lub eliminacji wpływu możliwych czynników zewnętrznych;
- identyfikacja przyczyny zmiany stanu badanego układu napędowego.

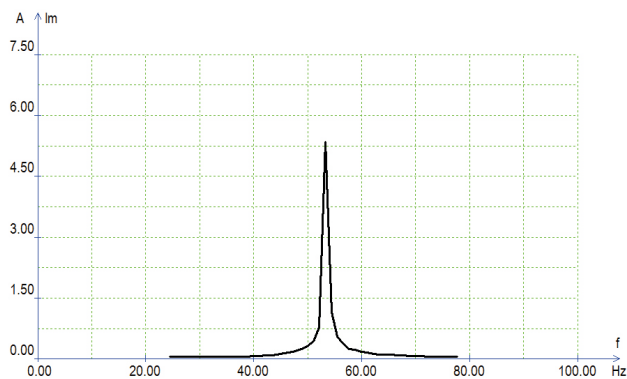
Etap A powinien być wykonany w możliwie krótkim czasie, tak by ograniczyć wpływ zmian momentu obciążenia, sygnałów sterujących czy też innych czynników. Wygodnym rozwiązaniem ułatwiającym ocenę stanu w etapie A jest wykorzystanie współczynnika podanego zależnością:

$$K = \left(1 - \frac{I_{RMS_MIN}^2}{I_{RMS_MAX}^2}\right) 100\% \quad (1)$$

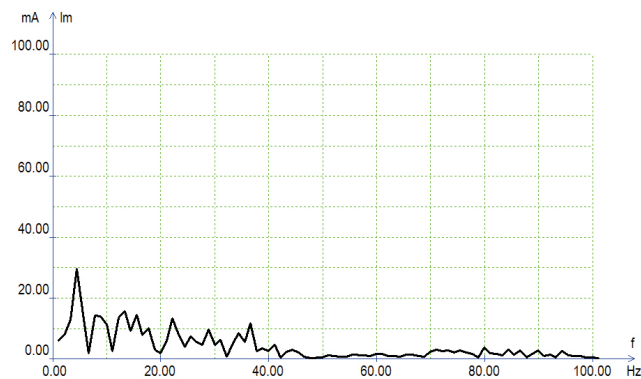
gdzie I_{RMS_MIN} i I_{RMS_MAX} to wartości minimalna i maksymalna ruchomej wartości skutecznej prądu fazowego stojana, wyznaczone w czasie 1 s [3]. Wartość tego współczynnika dla maszyny idealnej jest równa zero, zwiększenie stopnia uszkodzenia powoduje wzrost jego wartości. W takim przypadku możliwe jest doświadczalne określenie wartości dopuszczalnej tego współczynnika, przy której układ napędowy pracuje z wystarczająco dobrą dokładnością. Wybór takiego rozwiązania jest podyktowany faktem, że uszkodzenia wirnika powodują powstanie oscylacji ruchomej wartości skutecznej [3], a ich częstotliwość jest zależna od poślizgu i zwykle jest mniejsza od kilku Hz. Nie jest wymagana znajomość tej częstotliwości, a jedynie ocena zmian ruchomej wartości skutecznej w czasie zapewniającym wykrycie pojedynczego okresu oscylacji. Na tym etapie nie jest wymagana rejestracja wartości chwilowych, a jedynie ocena wartości ekstremalnych. Ograniczeniem stosowania tego sposobu oceny stanu jest zależność wartości współczynnika K od algorytmu sterowania. W takim przypadku ocena stanu zależy od zmian jego wartości w dłuższym okresie czasu. W celu sprawdzenia skuteczności proponowanego rozwiązania wykonano szereg badań maszyny Sh90L2 zasilanej z falownika napięcia. Badania wykonano na stanowisku laboratoryjnym umożliwiającym pracę układu napędowego z różnymi algorytmami sterowania [3]. W tabeli 1 pokazano wartości współczynnika K dla maszyny sprawnej (K0), maszyny z uszkodzonymi dwoma (K2) oraz trzema (K3) sąsiednimi prętami

Tabela 1. Wzrost wartości współczynnika diagnostycznego K dla różnych metod sterowania

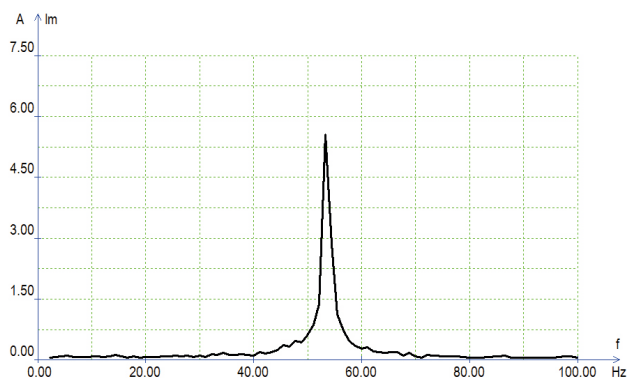
STEROWANIE	K0	K2/K0	K3/K0
DFOC	4,40	1,97	3,25
DTC- δ	10,7	1,11	1,92
DTC	5,20	1,50	3,37
DTC-SVM	3,90	1,33	4,18
FOC PWM	11,2	1,63	1,77
U/f = const.	2,40	1,84	8,5



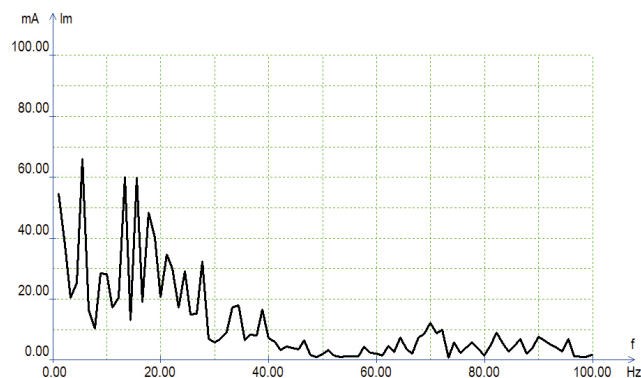
Rys. 1. Analiza harmoniczna wartości chwilowej prądu stojana – silnik sprawny, metoda sterowania DTC- δ



Rys. 3. Analiza harmoniczna ruchomej wartości skutecznej prądu stojana – silnik sprawny, metoda sterowania DTC- δ



Rys. 2. Analiza harmoniczna wartości chwilowej prądu stojana – uszkodzone 3 kolejne pręty wirnika, metoda sterowania DTC- δ



Rys. 4. Analiza harmoniczna ruchomej wartości skutecznej prądu stojana – uszkodzone 3 kolejne pręty wirnika, metoda sterowania DTC- δ

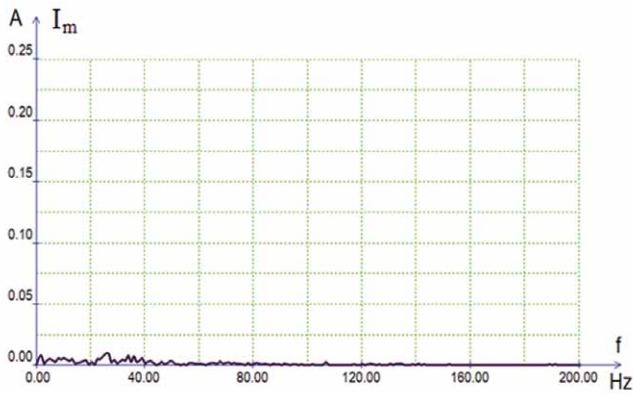
klatki wirnika w zależności od metody sterowania pracą układu napędowego.

Współczesne układy napędowe wykorzystują do sterowania technikę cyfrową, zapewniając w ten sposób stałość parametrów regulacji. Przyczyną zmian wartości podanego współczynnika są zmiany stanu układu napędowego. W tabeli 1 wykazano, że uszkodzenia prętów wirnika w wyraźny sposób zwiększają wartości obserwowanego współczynnika. Uszkodzenie dwóch sąsiednich prętów (K2) powoduje jego zwiększenie od ok. 11% przy sterowaniu DTC- δ [7], do 97% przy DFOC. Uszkodzenie 3 sąsiednich prętów (K3) powoduje co najmniej dwukrotne zwiększenie jego wartości. Wartości tych współczynników obliczane były dla silnika Sh90L2 w warunkach znamionowych. Ważnym czynnikiem umożliwiającym ocenę wartości tych współczynników jest możliwość oceny warunków obciążenia. Informację taką można uzyskać poprzez ocenę wartości skutecznej prądu fazowego silnika. W przypadku pracy maszyn pod kontrolą sterowników programowalnych możliwa jest ocena stopnia obciążenia na podstawie analizy sygnałów związanych z kontrolowanym procesem technologicznym. Innym ważnym czynnikiem, wymuszającym konieczność dostępu do urządzeń nadzorujących procesem produkcji, jest fakt zależności sygnału ruchomej wartości skutecznej od

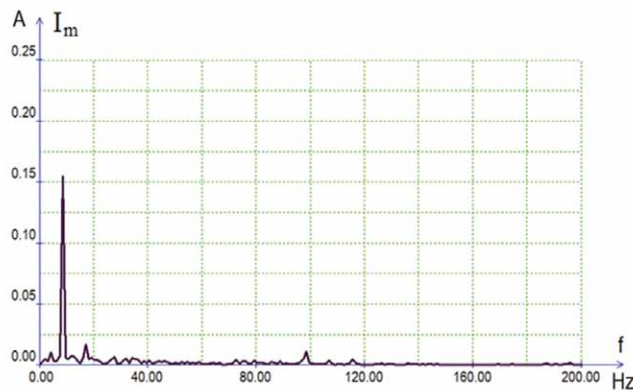
okresu podstawowej harmonicznego napięcia zasilającego silnik indukcyjny. Czas ten może być oszacowany na podstawie oceny stopnia obciążenia oraz zadanej wartości prędkości obrotowej. Aktualnie trwają także prace nad automatycznym dopasowaniem okresu całkowania na podstawie procedur minimalizacji współczynnika K w czasie normalnej pracy układu. Rozwiązanie takie zapewni poprawną ocenę stanu układu napędowego jako autonomicznego układu diagnostycznego.

W przypadku zaobserwowania wyraźnego wzrostu wartości współczynnika K przechodzimy do etapu B procesu diagnostyki. W tym etapie wykonywane są dokładniejsze badania wraz z rejestracją sygnału ruchomej wartości skutecznej w dłuższym okresie czasu. Wystarczającym rozwiązaniem jest wyprowadzenie sygnału ruchomej wartości skutecznej (lub wartości chwilowej) prądu przez przetwornik C/A i przekazanie informacji o konieczności jego rejestracji do obsługi technicznej. Etap ten jest wykonywany dopiero po stwierdzeniu znacznego pogorszenia stanu układu napędowego.

Możliwa jest wówczas ingerencja obsługi w celu eliminacji lub ograniczenia wpływu innych czynników. Z wartości umieszczonych w tabeli 1 wyraźnie widać zależność sygnałów diagnostycznych od algorytmu sterowania pracą maszyny. Optymalna wydaje się wówczas praca w układzie otwartym lub



Rys. 5. Analiza harmoniczna ruchomej wartości skutecznej prądu stojana - silnik sprawny, metoda sterowania DFOC [3]



Rys. 6. Analiza harmoniczna ruchomej wartości skutecznej prądu stojana - uszkodzone 3 kolejne pręty wirnika, metoda sterowania DFOC [3]

wykorzystanie algorytmu sterowania o większej wrażliwości na uszkodzenie silnika, np. DFOC, oraz wykonanie dokładniejszej analizy, np. poprzez analizę harmoniczną ruchomej wartości skutecznej (po wcześniejszej filtracji składowej stałej). Jako przykład konieczności ograniczenia wpływu sposobu sterowania na ocenę stanu na rysunkach 1–4 pokazano wyniki badań dla układu sterowanego metodą DTC- δ . Rysunek 1 przedstawia wyniki analizy harmonicznego wartości chwilowej prądu stojana dla maszyny sprawnej. Rysunek 3 pokazuje wyniki analizy harmonicznego sygnału ruchomej wartości skutecznej prądu stojana maszyny sprawnej po wyfiltrowaniu składowej stałej.

Rysunki 2 i 4 prezentują wyniki analiz w identycznych warunkach dla maszyny z uszkodzonymi 3 sąsiednimi prętami klatki wirnika. Widoczny jest tu wpływ uszkodzenia 3 prętów klatki wirnika. Nie ma tu dominujących częstotliwości możliwych do wyznaczenia na podstawie dostępnych informacji. Wpływ uszkodzenia polega tu na zwiększeniu amplitud różnych składników, lecz nie jest możliwe wskazanie konkretnych częstotliwości charakterystycznych dla danego uszkodzenia, jak ma to miejsce w algorytmach klasycznych. Skład harmonicznego jest tu „rozmyty” na wiele składników. Wykorzystanie metod diagnostyki opartych na analizie harmonicznego jest w takich przypadkach nieskuteczne. Wykonanie podobnych badań dla

sterowania metodą DFOC (rys. 5 i 6) wykazuje wyraźny wzrost składnika o częstotliwości zależnej od poślizgu [3].

3. Podsumowanie

Współczesne układy napędowe pracujące w przemyśle wykorzystują przemienniki częstotliwości sterowane różnymi metodami. W niniejszej pracy wykazano, że ocena stanu maszyny jest silnie zależna od algorytmów sterujących ich pracą. Klasyczne algorytmy diagnostyczne nie zawsze są skuteczne. Istotnym problemem ograniczającym ich stosowanie w czasie rzeczywistym jest konieczność rejestracji dużej liczby próbek pomiarowych wartości chwilowej prądu w stosunkowo długim czasie.

Metoda zaproponowana w artykule opiera się na ogólnej ocenie stanu układu napędowego na podstawie wartości współczynników diagnostycznych, możliwych do obliczania w czasie rzeczywistym, bez konieczności rejestracji dużej liczby próbek pomiarowych. Rozwiązanie takie daje możliwość uzyskania informacji o pogarszającym się stanie napędu w czasie normalnej pracy. Wykrycie zmiany stanu pozwala na wykonanie dokładniejszych badań przez obsługę techniczną w dogodnym momencie czasu i w kolejnych etapach ułatwia odszukanie i usunięcie przyczyn powodujących pogorszenie pracy układu napędowego.

Literatura

- [1] KOWALSKI Cz.T.: *Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- [2] ZAGIRNYAK M.V., MAMCHUR D.G., KALINOV A.P., CHUMACHOWA A.V.: *Induction motors diagnostics based on the power consumption signal analysis*. IPublisher PE Sherbatykh A.V., Kremenchuk 2013.
- [3] SOŁBUT A.: *Ocena stanu układów napędowych z maszyną asynchroniczną*. Rozprawy naukowe nr 239, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 2013.
- [4] DYBOWSKI P.: *Wpływ zasilania napięciem odkształconym na widmo prądów stojana*. Cz. 2. XIII Seminarium Techniczne: Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych, Eksploatacja, diagnostyka i modernizacja silników elektrycznych, maj, Ustroń-Jaszowiec, 2004, s. 84–92.
- [5] SWĘDROWSKI L.: *Nowa metoda diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego oparta na pomiarze i analizie widmowej prądu zasilającego*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, nr. 54, Gdańsk 2005.
- [6] GUZIŃSKI J.: *Układy napędowe z silnikami indukcyjnymi i filtrami wyjściowymi falowników. Zagadnienia wybrane*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, nr. 54, Gdańsk 2011.
- [7] SIKORSKI A.: *Bezpośrednia regulacja momentu i strumienia silnika indukcyjnego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2009, s. 234.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WE/1/2018 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW

dr hab. inż. Adam Sołbut - Politechnika Białostocka,
Wydział Elektryczny, e-mail: a.solbut@pb.edu.pl

artykuł recenzowany