

Andrzej Bień, Paweł Dybowski, Michał Rad
AGH w Krakowie

BADANIE SKUTECZNOŚCI OCHRONY ŁOŻYSK PRZED SKUTKAMI PRZEPLYWU PRĄDÓW ŁOŻYSKOWYCH Z ZASTOSOWANIEM PIERŚCIENI ZWIERAJĄCYCH

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF PROTECTION AGAINST THE EFFECTS OF BEARING CURRENTS USING THE SHORT-CIRCUITING RINGS

Streszczenie: Przepływ prądów łożyskowych w maszynach elektrycznych jest znanym od lat problemem eksploatacyjnym. Każdy rodzaj maszyn elektrycznych jest narażony na występowanie napięć wałowych i przepływ prądu przez łożyska. Obecnie najczęściej problem taki jest zauważany podczas eksploatacji maszyn indukcyjnych. Dobrym sposobem ochrony łożysk wydaje się być ich zwarcie w taki sposób, aby prąd płynął poza łożyskiem i potencjał wału względem obudowy (najczęściej uziemionej) był bliski zera. W proponowanym artykule autorzy chcieliby przedstawić wyniki oceny skuteczności działania specjalnych pierścieni zwierających, których zadaniem jest właśnie ochrona łożysk przed skutkami przepływu prądu.

Abstract: The flow of bearing currents in electrical machines is a known, practical problem. Each type electrical machinery is exposed to the existence of the shaft voltage which cause current to flow through the bearing. Currently, the most common problem of this is seen in the operation of induction machines. A good way of protecting the bearings seems to be a short-circuit between stator and rotor. In this situation a potential of the shaft is close to zero relative to the potential of stator (usually grounded) and the shaft current will flow by short-circuit element. In the proposed article, the authors would like to present the results of the assessment of the effectiveness of the special short circuiting rings, which are used to protect the bearings from the effects of the current flow.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, prądy łożyskowe, zasilanie falownikowe

Keywords: electrical machines, bearing currents, PWM Inverters

1. Wstęp

Przepływ prądów łożyskowych w maszynach elektrycznych jest znanym od lat problemem eksploatacyjnym [1]. Każdy rodzaj maszyn elektrycznych jest narażony na występowanie napięć wałowych i przepływ prądu przez łożyska. Obecnie najczęściej problem taki jest zauważany podczas eksploatacji maszyn indukcyjnych. Źródła występowania napięcia wałowego są co najmniej dwa: indukcja elektromagnetyczna w maszynie elektrycznej oraz zjawiska elektrostatyczne. Napięcia wałowe pochodzące od indukcji elektromagnetycznej związane są zazwyczaj z występowaniem asymetrii w obwodach elektromagnetycznych silnika, co powoduje objęcie częścią strumienia także wału silnika (w silnikach z wałem drążonym efekt ten występuje najsilniej).

Zjawiska związane z elektrostatyką ujawniają się podczas zasilania silnika indukcyjnego z przemiennika częstotliwości, pojawiają się

wyższe harmoniczne w napięciu zasilającym. Ich fizyczne podstawy opisane są dokładniej w [2].

Napięcia wałowe mają zwykle wartości rzędu do kilku woltów, ale przy bardzo małej impedancji obwodu przez który zamyka się prąd, wartość tego prądu (tzw. prądu wałowego) może być duża [4], nawet rzędu setek amperów. Prąd taki przepływając przez łożyska powoduje ich szybkie uszkodzenie [3].

Jednym ze sposobów ochrony łożysk przed prądem wałowym jest ich izolacja od korpusu silnika. Przytoczone w literaturze [5] przykłady pokazują jednak, że stosowanie łożysk izolowanych może powodować przepływ prądów wałowych w innym miejscu całego zespołu.

Dobrym sposobem ochrony łożysk wydaje się ich zwarcie, w taki sposób, aby prąd płynął poza łożyskiem i potencjał wału względem obudowy (najczęściej uziemionej) był bliski zera.

2. Opis badań pierścieni uziemiających wał służących do zwierania prądów łożyskowych

2.1 Mocowanie pierścieni

Do badań dostarczone zostały pierścienie w dwóch wykonaniach:

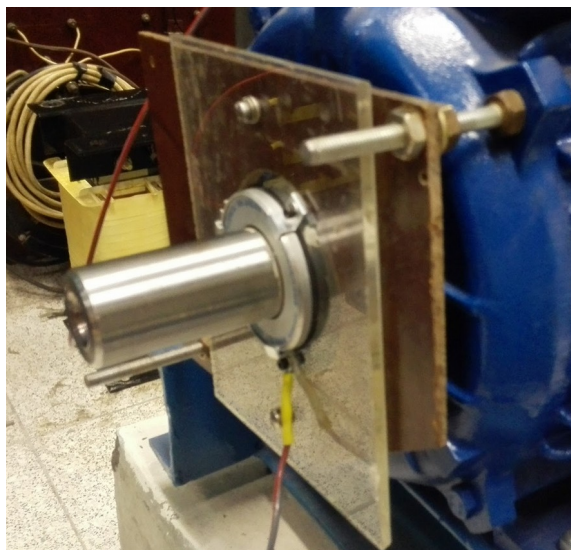
- pierścień cały (P_1)
- pierścień składający się z dwóch połówek (P_2)

Pierścienie zostały zamocowane po obu stronach wału silnika indukcyjnego. Sposób mocowania pierścieni przedstawia rysunek 1.

Dane silnika indukcyjnego:

SG 132M-8/6/4; 400V; 50Hz; 2,1-2,6-3,9kW;
6,1-6,6-7,7A, 0,67-0,74-0,92 pf,
720-970-1425 rpm

Silnik miał łożyska w bardzo dobrym stanie. Przed zamocowaniem pierścieni wał silnika w miejscu styku elektrycznego z pierścieniami został pokryty specjalnym preparatem ułatwiającym przewodzenie - roztworem koloidalnego srebra.



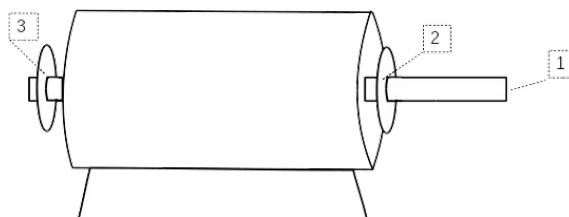
Rys. 1. Sposób mocowania pierścienia P_1 .

Zasilanie silnika zostało zrealizowane w dwóch wariantach: zasilanie z sieci po obniżeniu amplitudy napięcia poprzez regulator indukcyjny oraz zasilanie z falownika 11kW. Silnik podczas pomiarów był uruchomiony i pracował z prędkością obrotową zbliżoną do prędkości znamionowej. W celach porównawczych zmierzono rezystancję

przejścia stojan-rotor (podczas ruchu) bez zamocowanego pierścienia i otrzymano wynik około $0,9M\Omega$. Rezystancja przejścia dla silnika zatrzymanego jest praktycznie zerowa. Wynika to z powstawaniu "filmu olejowego" podczas pracy dobrego łożyska stanowiącego dobry izolator.

Rozmieszczenie pierścieni P_1 i P_2 oraz miejsca połączeń przedstawione są na rysunku 2:

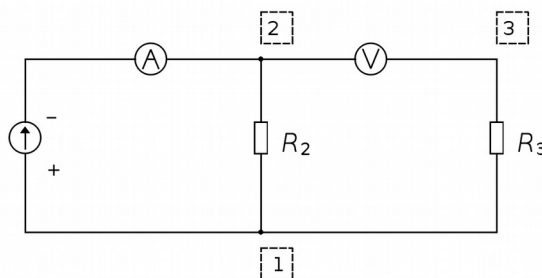
- 1 - połączenie elektryczne do wału wirnika,
- 2 - pierścień P_1 ,
- 3 - pierścień P_2 .



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia pierścieni P_1 i P_2 .

2.2 Pomiar rezystancji prądem stałym

Pomiary rezystancji przejścia stojan-wirnik po zamocowaniu pierścieni przeprowadzono podczas pracy silnika zasilanego napięciem sieciowym o obniżonej wartości. Schemat układu pomiarowego zamieszczony jest na rysunku 3.



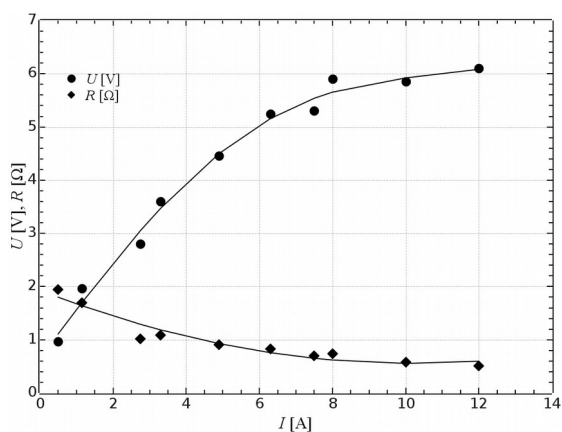
Rys. 3. Schemat układu do pomiaru rezystancji prądem stałym.

Do wymuszenia prądu przepływającego przez pierścień P_1 (rysunek 2) użyty został regulowany zasilacz prądu stałego o zakresie 0-20A. Pomiary przeprowadzono dla dwóch wariantów polaryzacji źródła (+/- oraz -/+). Uzyskane wyniki przedstawione są w tabeli 1 oraz na rysunkach 4 i 5.

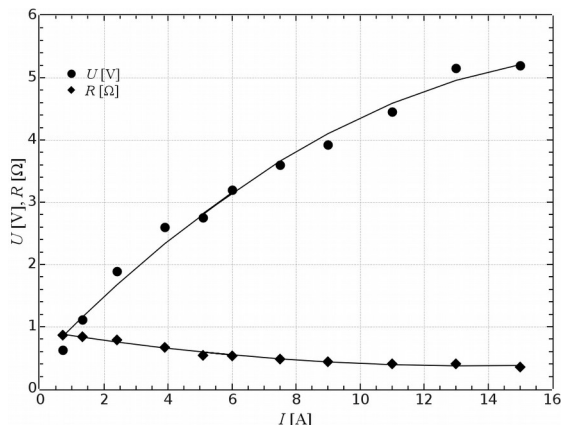
Tabela 1. Wyniki pomiaru zależności $U(I)$ prądem stałym

| polaryzacja napięcia +/- | | |
|--------------------------|---------|------------------|
| U [V] | I [A] | R [Ω] |
| 0,97 | 0,50 | 1,94 |
| 1,96 | 1,15 | 1,70 |
| 2,8 | 2,75 | 1,02 |
| 3,60 | 3,30 | 1,09 |
| 4,46 | 4,90 | 0,91 |
| 5,25 | 6,30 | 0,83 |
| 5,30 | 7,50 | 0,70 |
| 5,90 | 8,00 | 0,74 |
| 5,85 | 10,0 | 0,58 |
| 6,10 | 12,0 | 0,51 |

| polaryzacja napięcia -/+ | | |
|--------------------------|---------|------------------|
| U [V] | I [A] | R [Ω] |
| 0,62 | 0,72 | 0,86 |
| 1,11 | 1,32 | 0,84 |
| 1,89 | 2,4 | 0,79 |
| 2,60 | 3,90 | 0,67 |
| 3,20 | 6,00 | 0,53 |
| 2,75 | 5,10 | 0,54 |
| 3,60 | 7,50 | 0,48 |
| 3,92 | 9,00 | 0,44 |
| 4,45 | 11,0 | 0,40 |
| 5,15 | 13,0 | 0,40 |
| 5,20 | 15,0 | 0,35 |



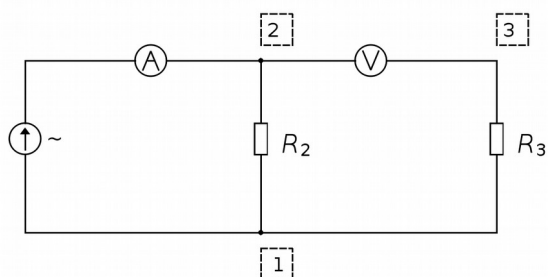
Rys. 4. Wyniki pomiaru zależności $U(I)$ oraz $R(I)$ prądem stałym - polaryzacja +/-



Rys. 5. Wyniki pomiaru zależności $U(I)$ i $R(I)$ prądem stałym - polaryzacja -/+

2.3 Pomiar rezystancji prądem przemiennym

Pomiary impedancji przejścia stojan-wirnik po zamocowaniu pierścieni przeprowadzono podczas pracy silnika zasilanego napięciem sieciowym o obniżonej wartości. Schemat układu pomiarowego zamieszczony jest na rysunku 6. Do wymuszenia prądu przepływającego przez pierścień użyty został autotransformator z dołączonym na wyjściu transformatorem obniżającym napięcie. Zakres prądowy takiego układu wynosił 0-30A. Uzyskane wyniki przedstawione są w tabeli 2 oraz na rysunku 7.

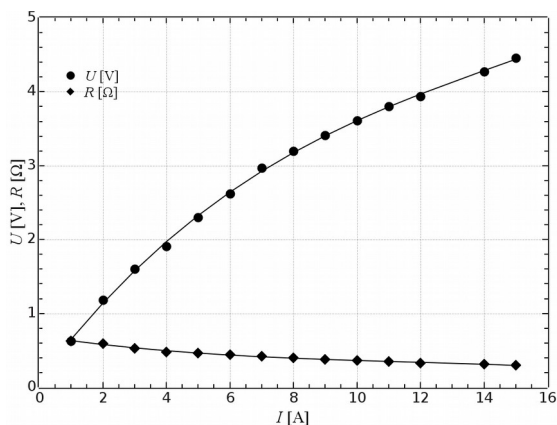


Rys. 6. Schemat układu pomiarowego dla zasilania prądem przemiennym.

Tabela 2. Wyniki pomiaru zależności $U(I)$ prądem przemiennym.

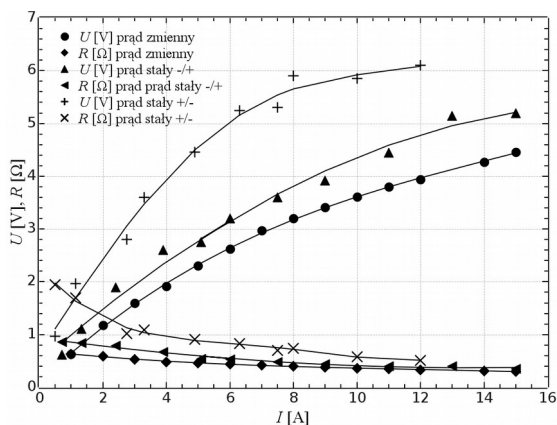
| U [V] | I [A] | R [Ω] |
|---------|---------|------------------|
| 0,63 | 1,0 | 0,63 |
| 1,18 | 2,0 | 0,59 |
| 1,60 | 3,0 | 0,53 |
| 1,91 | 4,0 | 0,48 |
| 2,30 | 5,0 | 0,46 |
| 2,62 | 6,0 | 0,44 |

| | | |
|------|------|------|
| 2,97 | 7,0 | 0,42 |
| 3,20 | 8,0 | 0,40 |
| 3,41 | 9,0 | 0,38 |
| 3,61 | 10,0 | 0,36 |
| 3,80 | 11,0 | 0,35 |
| 3,94 | 12,0 | 0,33 |
| 4,27 | 14,0 | 0,31 |
| 4,46 | 15,0 | 0,30 |



Rys. 7. Wyniki pomiaru zależności $U(I)$ oraz $R(I)$ prądem przemiennym.

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki porównawcze dla wszystkich pomiarów.



Rys. 8. Zestawienie porównawcze wyników pomiaru zależności $U(I)$ i $R(I)$.

2.4 Rejestracja napięcia stojan-wirnik

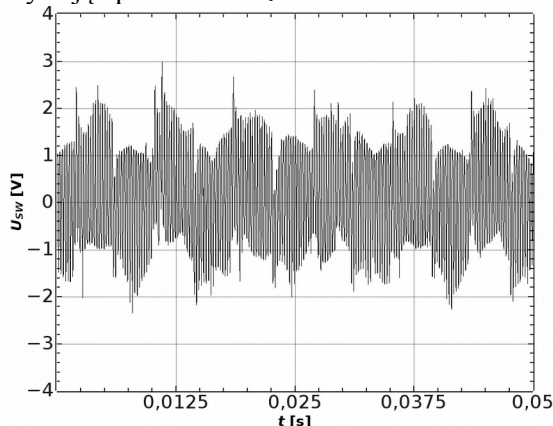
W celu wstępnego sprawdzenia poprawności działania pierścienia zwierającego wykonano rejestrację napięcia stojan-wirnik U_{SW} dla silnika zasilanego z falownika (częstotliwość napięcia zasilania ok. 40Hz). Rejestracja napięć została przeprowadzona przy pomocy

komputerowego systemu akwizycji danych. Przebiegi napięć rejestrowano z częstotliwością próbkowania 40kHz.

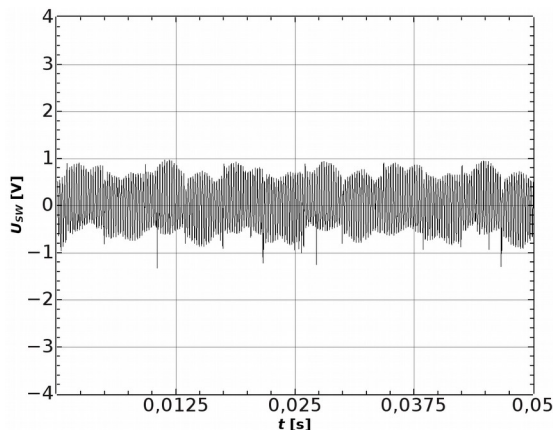
Wyniki rejestracji przedstawiono na rysunkach obrazujących:

- napięcie U_{SW} bez użycia pierścienia,
- napięcie U_{SW} po wykonaniu połączenia stojan-rotor przy pomocy rezystora 10kΩ,
- napięcie U_{SW} po połączeniu przy pomocy zamontowanego pierścienia.

Poprawność działania układu sprawdzano używając pierścienia P_1 .



Rys. 9. Przebieg napięcia stojan-wirnik U_{SW} bez użycia pierścienia.



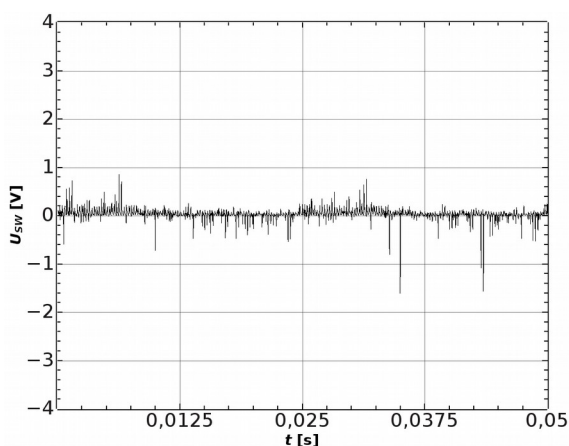
Rys. 10. Przebieg napięcia stojan-wirnik U_{SW} po wykonaniu połączenia stojan-rotor przy pomocy rezystora 10kΩ.

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono przebiegi napięcia stojan-wirnik U_{SW} bez użycia pierścienia (rys. 9) oraz po wykonaniu połączenia stojan-wirnik rezystorem 10kΩ (rys. 10). W pierwszym przypadku wartość maksymalna (szczytowa) napięcia stojan-wirnik U_{SW} wynosi około 2V, a wartość skuteczna 1,09V. W drugim przypadku wartość maksymalna wynosi około

1V, a wartość skuteczna 0,354V.

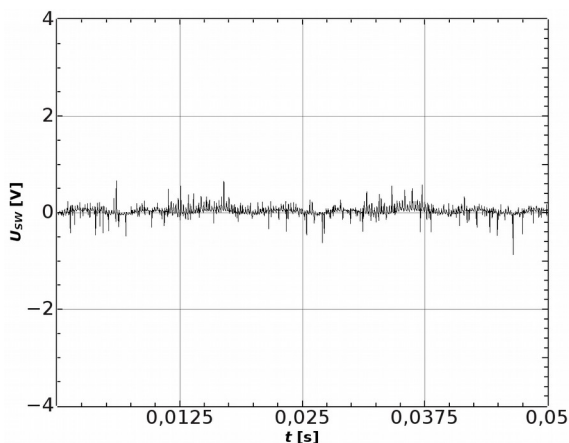
2.5 Rejestracja zwierania napięcia stojan-wirnik przez element ochronny

W celu sprawdzenia poprawności działania pierścienia P_1 zarejestrowano napięcie stojan-wirnik U_{SW} (przedstawione na rysunku 12) dla silnika zasilanego z falownika (częstotliwość napięcia zasilania ok. 40Hz) po połączeniu stojana i wirnika przy pomocy zamontowanego pierścienia P_1 .



Rys. 12. Przebieg napięcia stojan-wirnik U_{SW} po połączeniu przy pomocy zamontowanego pierścienia P_1 .

Sprawdzono również poprawność działania pierścienia P_2 zamontowanego po przeciwnej stronie maszyny wykonując rejestrację napięcia stojan-wirnik U_{SW} w takich samych warunkach, jak dla pierścienia P_1 . Uzyskane wyniki (przedstawione na rysunku 13) potwierdzają skuteczność działania pierścienia.



Rys. 13. Przebieg napięcia stojan-wirnik U_{SW} po połączeniu przy pomocy zamontowanego pierścienia P_2 .

Zarejestrowana wartość napięcia U_{SW} wynosi praktycznie zero (wartość skuteczna 0,107V), co świadczy o wystąpieniu zwarcia pomiędzy stojanem, a wirnikiem wykonanym przy pomocy pierścienia P_1 .

3. Wnioski

W wyniku wykonanych prób można stwierdzić poprawne działanie elementów zwierających. Zmierzona wartość rezystancji przejścia zawiera się od $0,3\Omega$ do $1,94\Omega \pm 0,15\Omega$ w zależności od warunków obciążenia oraz od występowania harmonicznych. Znajduje to potwierdzenie w uzyskanej nieliniowej charakterystyce $U(I)$. Dla testowanej maszyny stanowiły one dobrą ochronę przed prądami łożyskowymi.

4. Literatura

- [1]. Erdman J.M., Kerkman R.J., Schlegel D.W., Skibinski G.L.: „Effect of PWM Inverters on AC Motor Bearing Currents and Shaft Voltages”; IEEE Transactions on Industry Applications, VOL 32, NO. 2, 1996
- [2]. Chen S., Lipo T. A., Fitzgerald D.: „Source of Induction Motor Bearing Currents Caused by PWM Inverters”; IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 1, 1996
- [3]. Zientek P., Kwak J.: „Prądy łożyskowe w organach urabiających kombajnów górniczych”; Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 1/2014 (101), Komel Katowice 2014
- [4]. Drak B., Zientek P., Niestrój R., Kwak J.: „Napięcia i prądy wałowe w silnikach indukcyjnych dużej mocy użytych w organach urabiających kombajnów górniczych”; Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 76/2007, Komel Katowice 2007
- [5]. Zientek P.: „Drogi przepływu prądów łożyskowych w układach napędowych dużej mocy zasilanych napięciem sieciowym”; Prace naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr. 66, Wrocław 2012

Autorzy

Dr hab. inż. Andrzej Bień, prof. n. AGH, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. +48 126172857, e-mail: abien@agh.edu.pl

Dr inż. Paweł Dybowski, AGH Akademia
Górnictwo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki
Automatyki Informatyki i Inżynierii
Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i
Automatyki Systemów Przetwarzania Energii,
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel. +48 126172897,
e-mail: dybowski@agh.edu.pl

Dr inż. Michał Rad, AGH Akademia Górnictwo-
Hutnicza, Wydział Elektrotechniki Automatyki

Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra
Energoelektroniki i Automatyki Systemów
Przetwarzania Energii, Al. A. Mickiewicza 30,
30-059 Kraków, tel. +48 126174016,
e-mail: rad@agh.edu.pl

Praca została sfinansowana w ramach umowy
nr 5.5.120.579