

Bronisław Drak, Piotr Zientek
Politechnika Śląska, Gliwice

ANALIZA USZKODZEŃ SILNIKÓW WYSOKONAPIĘCIOWYCH PRĄDU PRZEMIENNEGO W ELEKTROWNIACH ZAWODOWYCH

ANALYSIS OF FAILURES OF HIGH-POWER INDUCTIVE MOTORS IN ELECTRIC POWER STATION

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki analizy statystycznej uszkodzeń silników indukcyjnych dużej mocy zainstalowanych w napędach potrzeb własnych elektrowni zawodowych i elektrociepłowni. Zwrócono szczególną uwagę na główne przyczyny awarii silników. Procentowe zestawienie typowych awarii silników przedstawiono w formie wykresów słupkowych. Dokonano porównania liczby uszkodzeń w 5 elektrowniach zawodowych i kilkunastu elektrociepłowniach. W formie tabeli przedstawiono okresy bezawaryjnej pracy silników indukcyjnych. W drugiej części artykułu zaprezentowano wybrane skutki awarii silników.

Abstract: The paper presents results of statistic analysis of large power induction motors damages mounted as company own drives of industrial power stations and heat and power stations. Special attention was paid to main reasons of motors failures. Bar chart presents the percentage list of typical motor failures. Comparison was made of damage number in 5 industrial power plants and in several heat and power plants. Faultless operation periods of inductive motors are presented in Table. The second part of the paper present selected effects of motor failures.

Słowa kluczowe: silniki indukcyjne dużej mocy, statystyka uszkodzeń.

Keywords: induction motors of the high power, statistics of damage.

1. Wstęp

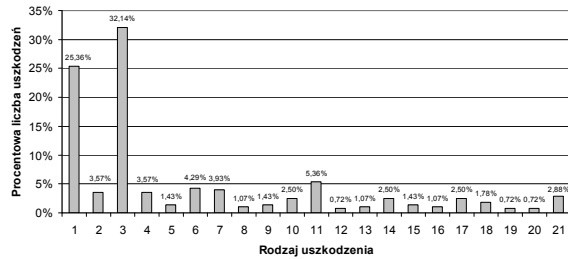
W napędach głównych urządzeń potrzeb własnych elektrowni zawodowych i elektrociepłowni stosuje się silniki indukcyjne prądu przemiennego o mocach od 100 do 6300 kW zasilane napięciem 6 kV. Większość tych silników została wyprodukowana w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Niemal wszystkie pracujące silniki są po remontach przeprowadzanych po ich awariach. W ramach remontów najczęściej zachodziła konieczność wykonania nowego uzwojenia stojana. Dotyczy to silników napędzających pompy wody zasilającej, młyny węglowe i wentylatory młynowe. Często uszkodzeniu ulegał jednocześnie stojan i wirnik. Uszkodzenia wirników występują głównie w strefie połączeń lutowanych prętów uzwojeń klatkowych z pierścieniami zwierającymi. W silnikach o wirnikach dwuklatkowych uszkodzeniu ulegają przede wszystkim klatki rozruchowe wirnika. Rzadziej występują awarie spowodowane uszkodzeniem samego łożyska, łożyska i stojana oraz wentylatora i stojana silnika. Mniejsza liczba awarii łożysk spowodowana jest szybkim rozwojem nowoczesnych technik diagnozowania stanu łożysk tocznych, dzięki którym doko-

nywana jest wymiana łożysk na nowe, przed ostatecznym zniszczeniem łożyska, które prowadzi do awarii silnika (wirnika jak i stojana).

2. Statystyka uszkodzeń silników

Na podstawie ekspertyz z lat 1995 do 2010 uszkodzeń silników indukcyjnych dużej mocy zainstalowanych w napędach potrzeb własnych 5 elektrowni zawodowych i kilkunastu elektrociepłowni (głównie na południu Polski) przeprowadzono analizę statystyczną przyczyn i skutków awarii 290 silników. Podczas analizy szczególną uwagę zwrócono na rodzaj uszkodzenia, które bezpośrednio wywołało awarię, a nie uszkodzenia pochodne od tego uszkodzenia, których można było uniknąć stosując bardziej rozbudowane i szybsze zabezpieczenia. Statystyki wykonano dla różnych zestawień m. in. z uwzględnieniem mocy silników, liczby par biegunów, rodzaju napędu (miejsca zainstalowania) oraz czasu jaki upłynął od ostatniego przezwolenia stojana do kolejnej awarii silnika. Na podstawie analizy materiałów określono 20 głównych przyczyn awarii silników oraz 8 przyczyn mniej ważnych, występujących znacznie rzadziej.

Procentowe zestawienie typowych awarii silników przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Procentowe zestawienie typowych awarii silników indukcyjnych

Legenda do wykresu na rysunku 1:

1. Przebiecie do rdzenia stojana.
2. Upalenie cewki od przewodu zasilającego.
3. Zwarcie zwojowe.
4. Przebiecie do pierścienia usztywniającego.
5. Wytarcie przez uszkodzony wirnik.
6. Upalenie połączenia międzycewkowego.
7. Upalenie przewodu zasilającego od izolatora.
8. Wytarcie izolacji czoł zerwanym wysięgiem klatki.
9. Obrót całego rdzenia.
10. Uszkodzenie łożyska.
11. Uszkodzenie wirnika uszkodziło stojan.
12. Deformacja czoł oraz zerwanie ich wiązań.
13. Pęknięcie przewodów zwojowych w strefie ich połączenia lutowanego (pęknięcie zezwoju).
14. Upalenie połączenia obręczy z zezwojem fazowym jednej fazy uzwojenia stojana po stronie zasilania.
15. Zwarcie przewodu zasilającego jedną z faz uzwojenia stojana z połączeniem międzycewkowym.
16. Pogarszające się własności izolacji czynnych i rezerwowych przewodów zasilających w silniku.
17. Uszkodzenie klatki wirnika.
18. Zwarcie międzyfazowe.
19. Uszkodzenie wentylatora uszkodziło stojan.
20. Uszkodzenie łożyska uszkodziło stojan.
21. Inne uszkodzenia.

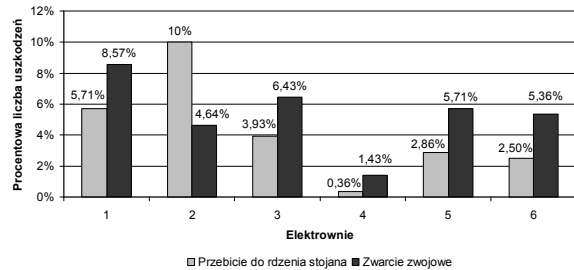
Do innych uszkodzeń należy zaliczyć:

1. Uszkodzenie układu chłodzenia silnika po stronie dodatkowego wentylatora.
2. Uszkodzenie łącznika wirnika silnika pierścieniowego.
3. Zerwanie końcówki wału wirnika.
4. Rozruch z przerwą jednej fazy.
5. Wyłączenie zasilania silnika z jednej sekcji i przełączenie silnika na drugą sekcję, przy

istniejącym dużym napięciu reszkowym na zaciskach silnika.

6. Awaria transformatora zasilania spowodowała awarię silnika.
7. Nagłe obniżenie stanu izolacji jednej fazy stojana.
8. Zanieczyszczenie pyłem węglowym.

Z przedstawionego wykresu widać, że najczęściej awarii silników spowodowane jest zwarcie zwojowym uzwojenia stojana oraz uszkodzeniem izolacji głównej (przebiecie do rdzenia stojana). Procentowe zestawienie tych uszkodzeń w rozpatrywanych 5 elektrowniach zawodowych i kilkunastu elektrociepłowniach przedstawiono na rysunku 2.

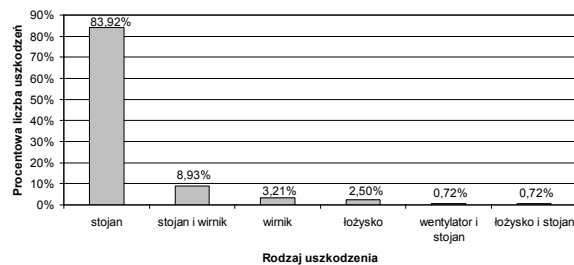


Rys. 2. Procentowe zestawienie zwarcia zwojowego oraz przebiecia do rdzenia stojana w rozpatrywanych elektrowniach zawodowych i elektrociepłowniach

Legenda do rysunku 2:

- 1, 2, 3, 4, 5 – Elektrownie zawodowe.
- 6 – Małe elektrownie i elektrociepłownie.

Źródło uszkodzenia w silnikach indukcyjnych najczęściej występuje w stojanie maszyny. Często zdarza się jednak, że uszkodzenie wentylatora, łożyska lub wirnika silnika powoduje bardzo poważne uszkodzenie stojana, które kończy się jego przezwojeniem. W takich przypadkach bardzo często dochodzi do zatarcia rdzenia stojana przez rdzeń wirnika lub uszkodzenia połączeń czołowych uzwojenia stojana. Procentowe ujęcie miejsc uszkodzeń silników w czasie ich awarii przedstawiono na rysunku 3 oraz w tabeli 1.

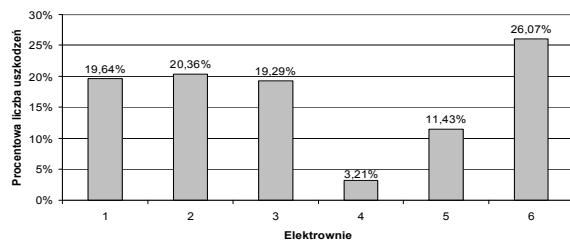


Rys. 3. Procentowe ujęcie miejsc uszkodzeń silników w czasie ich awarii

Tabela 1
Procentowe ujęcie miejsc uszkodzeń silników

Miejsce uszkodzenia silnika	Procentowe uszkodzenia [%]					
	Elektrownie					
	1	2	3	4	5	6
stojan	18,57	18,21	17,50	2,86	9,29	17,50
wirnik	-	0,36	1,07	-	0,36	1,43
stojan + wirnik	0,72	1,78	-	0,36	1,43	4,64
łożysko	-	-	0,36	-	-	2,14
wentylator + stojan	0,36	-	-	-	0,36	-
łożysko + stojan	-	-	0,36	-	-	0,36

Podział wszystkich analizowanych uszkodzeń pomiędzy rozpatrywane elektrownie przedstawiono na rysunku 4.



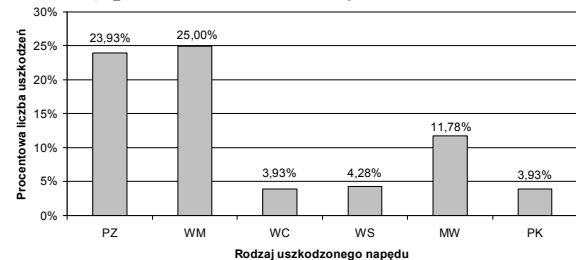
Rys. 4. Procentowa liczba uszkodzeń silników w poszczególnych elektrowniach

Bazując na rysunku 4 można jednoznacznie stwierdzić, że w trzech elektrowniach wystąpiła podobna ilość awarii. Ponieważ liczba zainstalowanych silników w napędach potrzeb własnych w rozpatrywanych elektrowniach może być zróżnicowana, dlatego dokonano także procentowych obliczeń miejsc występowania uszkodzeń silników, osobno w poszczególnych elektrowniach. Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Procentowe ujęcie miejsc uszkodzeń silników w poszczególnych elektrowniach

Miejsce uszkodzenia silnika	Procentowe uszkodzenia [%]					
	Elektrownie					
	1	2	3	4	5	6
stojan	94,6	89,4	90,6	88,9	81,3	67,1
wirnik	-	1,8	5,6	-	3,1	5,5
stojan + wirnik	3,6	8,8	-	11,1	12,5	17,8
łożysko	-	-	1,9	-	-	8,2
wentylator + stojan	1,8	-	-	-	3,1	-
łożysko + stojan	-	-	1,9	-	-	1,4

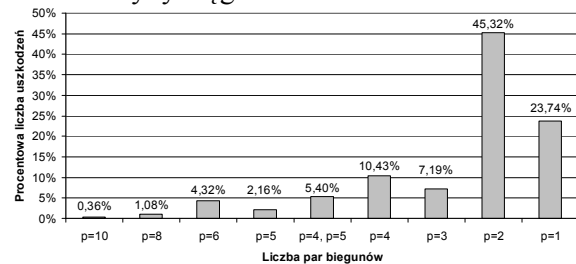
Widać, że we wszystkich rozpatrywanych elektrowniach zawodowych głównym miejscem wystąpienia awarii jest stojan. Z pozostałych uszkodzeń największa ilość to uszkodzenia stojana spowodowane awarią wirnika. Sporadycznie występowały uszkodzenia łożysk oraz uszkodzenia uzwojeń stojana w wyniku awarii wentylatora lub łożysk silnika. Rodzaj awarii oraz miejsce jego wystąpienia w silniku w dużej mierze uzależniony jest od rodzaju napędu, w którym pracował silnik. Dla każdego napędu należy zastosować silnik o odpowiedniej konstrukcji (np. układu chłodzenia) oraz mocy i prędkości obrotowej. Zestawienie awarii silników z uwzględnieniem typowych napędów dla różnych mocy i prędkości obrotowych (par biegunów silnika) przedstawiono na rysunkach 5, 6 i 7.



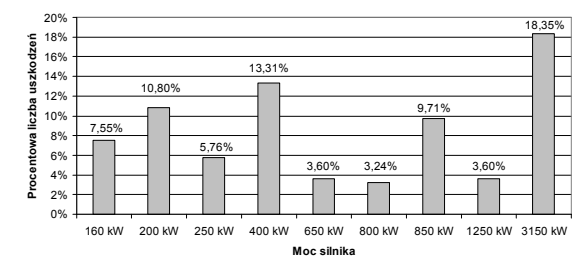
Rys. 5. Procentowa liczba uszkodzeń silników w typowych napędach

gdzie:

- PZ – pompy wody zasilającej,
- PK – pompy kondensatu,
- WM – wentylatory młynowe,
- WC, WS – wentylatory ciągu, spalin,
- MW – młyny węglowe.



Rys. 6. Procentowa liczba uszkodzeń silników w zależności od liczby par biegunów



Rys. 7. Procentowa liczba uszkodzeń dla różnych mocy silników

Dla określenia okresów bezawaryjnej pracy silników do pierwszego przezwojenia stojana oraz po ostatnim przezwojeniu stojana w zakładach remontowych opracowano statystykę na podstawie „historii silników”. Dane statystyczne przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Okresy bezawaryjnej pracy silników

Wyszczególnienie	Okres bezawaryjnej pracy [lata]	
	do pierwszego przezwojenia stojana	po ostatnim przezwojeniu stojana
Ogółem w latach 1996-2009	13,7	9,2
Trzy elektrownie w latach 1996-2009	14,3	10,5
Napędy wymienione na rys.5 w latach 1996-2009	12,3	10,1

Statystyka wykazuje, że najkrótsze okresy bezawaryjnej pracy silników wynosiły: 1 rok do pierwszego przezwojenia i 2 lata między kolejnymi przezwojeniami stojana. Po roku pracy uszkodzenie stojana najczęściej spowodowane było awarią wirnika lub awarią układu zasilania silnika (rozruch 2-fazowy). Najdłuższe okresy bezawaryjnej pracy silników wynosiły odpowiednio 30, 31, 32, 36, 37 i 48 lat. Po tylu latach awarie najczęściej występowały w wyniku uszkodzenia izolacji głównej uzwojenia stojana (przebiecie do rdzenia), zwarcia zwojowego, przebicia uzwojenia do pierścienia usztywniającego oraz upalenia przewodu zasilającego uzwojenie stojana.

3. Przykładowe uszkodzenia silników

W protokołach powaryjnych najczęściej podaje się, że przyczyną awarii silnika są:

- zwarcia zwojowe, zwarcia do rdzenia stojana, deformacja czoł uzwojenia stojana,
- uszkodzenia lub zniszczenia uzwojenia klatkowego wirnika połączonego z uszkodzeniem uzwojenia stojana.

Zwarcia w uzwojeniach stojana są poprzedzone uszkodzeniem izolacji, najczęściej izolacji głównej, spowodowanym wycieraniem izolacji (rys. 8 i 9) podczas drgań uzwojenia wymuszanych siłami elektrodynamicznymi.

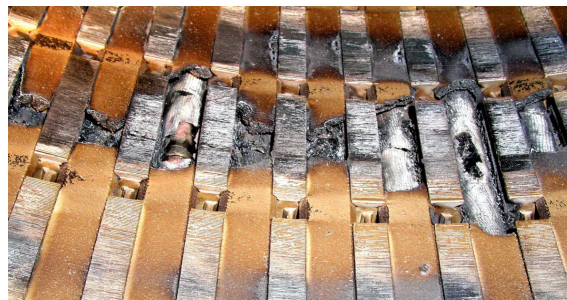


Rys. 8. Wytarcia izolacji głównej w żłobkach o ostre blachy rdzenia stojana



Rys. 9. Wzajemne wytarcie izolacji na połączeniach międzycewkowych i zasilających

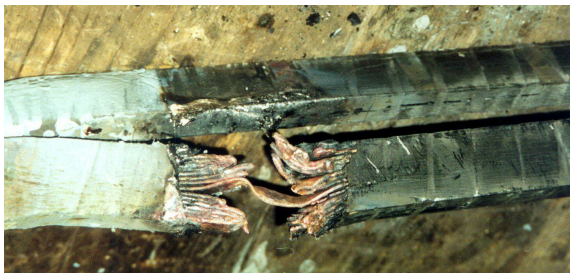
Zniszczona izolacja główna powoduje w żłobku zwarcia do rdzenia stojana, które może spowodować wypalenie klinów żłobkowych (rys.10), miejscowe uszkodzenia blach rdzenia (rys.11) oraz zwarcia zwojowe prowadzące do wytopienia miedzi zwojowej (rys.11)



Rys. 10. Wypalone klipy żłobkowe w wyniku zwarć do rdzenia stojana i zwarć zwojowych



Rys. 11. Zwarcie cewki uzwojenia do rdzenia na wyjściu ze żłobka stojana



Rys. 12. Wytopione przewody zwojowe cewki w wyniku zwarcia zwojowego

Łagodnym uszkodzeniem w strefie łuków stożkowych czoł uzwojenia stojana jest widoczna na rysunku 13 deformacja czoł skrajnych cewek w grupach fazowych. Deformacja ta jest skutkiem działania sił elektrodynamicznych, które starają się rozerwać wiązania usztywniające czoła. Takie uszkodzenie może wystąpić bez zwarcia w uzwojeniu stojana.



Rys. 13. Widok nieznacznych deformacja czoł

W przypadku np. zwarcia międzyfazowego i stosunkowo długim jego trwaniu, może wystąpić całkowita strefowa deformacja czoł cewek, co uwidoczniono na rysunku 14.



Rys. 14. Strefowe zniszczenie czoł cewek

W strefie wykorbienia czoł cewek i nieprawidłowym ich ukształtowaniu, może wystąpić wzajemne wycieranie ich izolacji głównej, prowadzące do zwarcia, którego skutki uwidoczniono na rysunku 15.



Rys. 15. Skutki wytarcia izolacji głównej

Uszkodzenie izolacji zwojowej występuje często w strefie główek cewek, co jest wynikiem wzdluznego wzajemnego przemieszczania się zezwojów cewek. Skutkiem tego są zwarcia zwojowe powodujące wypalenia izolacji i wytopienie przewodów zwojowych (rys. 16).



Rys. 16. Zniszczenia główek cewek

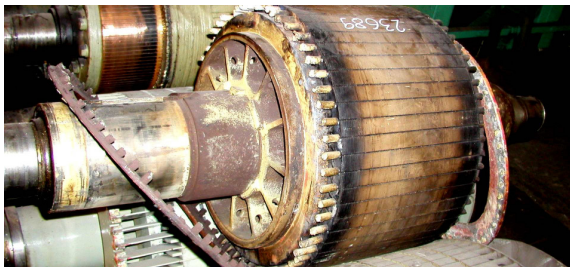
Wzajemne wycierania izolacji uwidocznione na rysunku 9 jest przyczyną zwarć między połączenia zasilającymi uzwojenie stojana, a połączeniami międzycewkowymi. Skutki takiego zwarcia uwidoczniono na rysunku 17.



Rys. 17. Skutki zwarcia między połączeniami zasilającymi uzwojenie stojana

Dane statystyczne podane w rozdziale 2 obejmują uszkodzenia wirników silników, których awarie zostały zgłoszone do ubezpieczycieli.

W wirnikach silników dwuklatkowych stopniowemu uszkodzeniu ulega klatka rozruchowa, która może ulec pełnemu zniszczeniu (rys. 18).



Rys. 18. Zniszczona klatka rozruchowa silnika dwuklatkowego

Innym powodem zniszczenia klatki rozruchowej jest zerwanie większości prętów oraz pęknięcia pierścieni zwierających (rys. 19).



Rys. 19. Zerwane pręty i pęknięte pierścienie

W wirnikach jednoklatkowych z prętami o przekroju trapezowym często występuje wysuwanie klinów usztywniających pręty w żłobkach. Może to spowodować zerwanie lutu i urwanie części pozapakietowej pręta (rys. 20).



Rys. 20. Uszkodzenie wirnika jednoklatkowego

4. Podsumowanie

Długoletnie oględziny i analizy przyczyn awarii silników indukcyjnych dużej mocy prądu przemiennego, pracujących w napędach urządzeń potrzeb własnych elektrowni zawodowych i elektrociepłowni, pozwalają na wysunięcie pewnych wniosków ogólnych.

1. W czasie awarii silników w około 84% uszkodzeniu ulegają uzwojenia stojana. Pozostałe uszkodzenia występują w wirnikach i są spowodowane uszkodzeniami uzwojeń klatkowych lub uszkodzeniami łożysk tocznych silnika, często w wyniku ich zatarcia.
2. W głównych urządzeniach potrzeb własnych elektrowni zawodowych najczęściej ulegają awarii silniki napędzające pompy wody zasilającej bloki oraz wentylatory młynowe.
3. Uszkodzenie izolacji uzwojenia jest najczęstszą przyczyną awarii stojana.
4. Statystyka wykazuje, że okres bezawaryjnej pracy nowych silników jest dłuższy niż okres od ostatniego przezwojenia stojana. Analiza materiałów z awarii silników wskazuje, że zwiększa się okres bezawaryjnej pracy silników po ostatnim przezwojeniu stojana. Zdarzają się jednak nieliczne przypadki, w których te same egzemplarze silników były przezwojane co dwa lub trzy lata.

Literatura

- [1]. Drak B.: *Zagadnienia elektromechaniczne czoł uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych dużej mocy prądu przemiennego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej ELEKTRYKA z. 163, Gliwice 1998, s. 189.
- [2]. Drak B.: *Analiza awarii silników indukcyjnych dużej mocy*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 54, BOBRME Katowice 1997, ss. 82-87.
- [3]. Drak B.: *Wpływ uszkodzeń wirników klatkowych na skutki awarii silników indukcyjnych dużej mocy*. Mat. XII Konferencji Energetyki, Szczyrk 2001. ss. 229-240.
- [4]. Drak B., Zientek P.: *Uszkodzenia łożysk tocznych silników indukcyjnych dużej mocy*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 64, BOBRME Katowice 2002, ss. 49-52.
- [5]. Drak B.: *Typowe uszkodzenia silników indukcyjnych dużej mocy*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 89/2011, BOBRME KOMEL Katowice, ss. 7 - 14.
- [6]. Drak B.: *Nietypowe uszkodzenia silników indukcyjnych dużej mocy*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 96/2012, BOBRME KOMEL, Katowice, ss. 1 - 6.

Autorzy

dr hab. inż. Bronisław Drak Prof. Pol. Śl.
Politechnika Śląska
Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii
Elektrycznej w Transporcie
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
Tel: 032-2372641
E-mail: Bronislaw.Drak@polsl.gliwice.pl

dr inż. Piotr Zientek
Politechnika Śląska
Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii
Elektrycznej w Transporcie
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
Tel: 32-2371885
E-mail: Piotr.Zientek@polsl.pl
Artykuł opracowano w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki nr 6025/B/T02/2011/40