



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI

Imię i nazwisko autora rozprawy: Tomasz Ciszewski

Dyscyplina naukowa: Elektrotechnika

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim:

Diagnostyka łożysk silnika indukcyjnego z wykorzystaniem analizy prądu silnika metodą potrójnej kowariancji.

Tytuł rozprawy w języku angielskim:

Induction motor bearings diagnostic with motor current signature analysis and normalized triple covariance.

Promotor
<i>podpis</i>
prof. dr hab. inż. Leon Swędrowski
Promotor pomocniczy
<i>podpis</i>
dr inż. Michał Ziółko

Gdańsk, rok 2016

SPIS TREŚCI

Streszczenie	4
1 Wprowadzenie	5
2 Cel, zakres i teza pracy	7
2.1 Cel pracy	7
2.2 Zakres pracy.....	7
2.3 Teza Pracy.....	8
3 Przegląd metod Diagnostyki Łożysk	9
3.1 Budowa łożysk.....	9
3.2 Typy uszkodzeń łożysk.....	12
3.3 Wybrane metody diagnostyki	15
3.3.1 Metoda analizy widma prądu stojana	17
3.3.2 Teager-Kaiser Energy Operator	18
3.3.3 Metoda oparta o analizę prądu stojana i pomiar sprawności silnika.....	20
3.3.4 Metoda oparta o pomiar mocy chwilowej.....	21
3.3.5 Metoda wykorzystująca rozproszony strumień magnetyczny	22
4 Statystyka wyższych rzędów w diagnostyce łożysk.....	24
4.1 Bispektrum	24
4.2 NTC – Normalized Triple Covariance (znormalizowana potrójna kowariancja).....	25
4.3 Badania symulacyjne NTC	27
5 Badania eksperymentalne	36
5.1 Stanowisko badawcze	36
5.2 Algorytm przetwarzania sygnału	38
5.3 Wybór komponentów	41
5.4 Wyniki badań.....	44
5.4.1 Uszkodzenia bieżni zewnętrznej.....	46
5.4.2 Uszkodzenia bieżni wewnętrznej	54

5.4.3	Uszkodzenia elementów tocznych	62
5.4.4	Wpływ obciążenia na trafność diagnoz.	69
5.5	Wyznaczenie wskaźnika diagnostycznego do dalszych badań.....	73
5.5.1	Uszkodzenia bieżni zewnętrznej.....	74
5.5.2	Uszkodzenia bieżni wewnętrznej	78
5.5.3	Uszkodzenia elementów tocznych	82
5.5.4	Zestawienie wyników	86
6	Podsumowanie	88
7	Bibliografia.....	90
	Wykaz załączników	94
	ZAŁĄCZNIK A.....	95
	ZAŁĄCZNIK B	115
	ZAŁĄCZNIK C	135

STRESZCZENIE

Przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej jest opracowanie nowej metody diagnostyki łożysk w silniku indukcyjnym opartej na pomiarach i analizie prądu zasilającego silnik. Ze względu na ciągłe doskonalenie i rozwój badań w kierunku metod prądowych, za pomocą których możliwa byłaby diagnostyka całego silnika, temat ten jest cały czas otwarty i jak najbardziej aktualny.

Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie w zagadnienia będące przedmiotem rozprawy oraz argumenty uzasadniające wybór tematyki diagnostyki łożysk w silnikach indukcyjnych.

W rozdziale drugim przedstawiony został cel, zakres oraz teza pracy.

W rozdziale trzecim niniejszej pracy omówione zostały kwestie związane z budową łożysk, przedstawiono klasyfikację typów uszkodzeń a także wyróżniono i porównano wybrane metody diagnostyki łożysk. Przeprowadzono krytyczną ocenę najczęściej wykorzystywanych w diagnostyce metod, między innymi metod wibracyjnych, analizy widma prądu stojana, metody opartej o pomiar mocy chwilowej oraz analizę strumienia pola magnetycznego.

Autor pracy zaproponował nową metodę diagnostyki eliminującą m.in. konieczność montażu czujników bezpośrednio na silniku. Jedną z głównych zalet nowej metody jest niezależność wyniku od amplitudy składowej podstawowej prądu, co gwarantuje normalizacja potrójnej kowariancji. Rezultaty badań są natomiast zależne między innymi od rodzaju zmienności amplitudy i fazy wybranych składowych.

Rozdział czwarty niniejszej pracy dotyczy statystyki wyższych rzędów. Zawiera część teoretyczną, w której przedstawione zostały pojęcia bispektrum oraz znormalizowanej potrójnej kowariancji (NTC), a także część aplikacyjną, obejmującą badania symulacyjne z wykorzystaniem NTC. Na podstawie przeprowadzonych symulacji potwierdzono, że NTC z powodzeniem nadaje się do wykrywania nieliniowych zmian w sygnale.

W rozdziale piątym rozprawy przedstawiono badania eksperymentalne przeprowadzone przez autora. Opisane zostało stanowisko badawcze, omówiono wykorzystany algorytm przetwarzania sygnału, opisana została procedura wyboru komponentów oraz zaprezentowano wyniki badań. Końcowa część rozdziału piątego wskazuje kierunki dalszych badań z wykorzystaniem prezentowanej metody.

Ostatni, szósty rozdział zawiera podsumowanie przeprowadzonych badań, krytyczną analizę wyników na podstawie wykonanych wykresów oraz wnioski końcowe.

1 WPROWADZENIE

Maszyny elektryczne występują współcześnie w większości zakładów przemysłowych. Silnik indukcyjny jest obecnie najczęściej stosowaną maszyną w elektrycznych układach napędowych. Podczas jego eksploatacji mogą pojawić się uszkodzenia w częściach mechanicznych oraz w układzie elektromagnetycznym. Prosta konstrukcja silnika indukcyjnego sprawia, że najbardziej awaryjnym elementem są łożyska. Według analiz statystycznych uszkodzenia łożysk stanowią ponad 40% wszystkich uszkodzeń [1]. Dlatego diagnostyka tego elementu jest niezwykle istotna z punktu widzenia bezawaryjnej pracy układu napędowego.

Trwałość łożyska podawana przez producentów jest jedynie szacowanym okresem bezawaryjnej pracy. Rzeczywisty czas pracy łożyska do uszkodzenia zależy od bardzo wielu czynników, między innymi od jakości wykonania, precyzji montażu, właściwego smarowania czy też temperatury pracy. Chcąc zatem określić aktualny stan oraz prognozować czas bezawaryjnej pracy maszyny, należy regularnie przeprowadzać badania diagnostyczne. Pozwala to uniknąć awarii i zaplanować niezbędne remonty maszyn przed wystąpieniem uszkodzenia jak również zapobiec przedwczesnej wymianie sprawnego łożyska. Stosowanie diagnostyki jest szczególnie ważne w maszynach stanowiących niewrażliwy element procesu technologicznego. W tym przypadku uszkodzenie może spowodować kosztowne naprawy i przestoje w produkcji, które z finansowego punktu widzenia mogą okazać się o wiele droższe niż inwestycja w diagnostykę. Wczesne wykrycie uszkodzenia łożyska zapobiega awariom kolejnych elementów silnika, np. wirnika, które w konsekwencji mogą doprowadzić do zniszczenia całego silnika. O ile zakup nowego silnika małej mocy nie stanowi dużego wydatku to konieczność zakupu silnika dużej mocy wiąże się z nieplanowanymi wysokimi nakładami finansowymi, które generują straty w przedsiębiorstwie. W związku z tym im droższe urządzenie, tym stosowanie diagnostyki jest korzystniejsze z ekonomicznego punktu widzenia.

Uszkodzenie łożyska powoduje powstanie symptomów diagnostycznych, których obserwacja może nieść cenne informacje diagnostyczne. Do symptomów tych można zaliczyć dodatkowe drgania spowodowane przez uszkodzone elementy, podwyższony poziom hałasu czy wzrost temperatury pracy. Istnieje wiele metod diagnostyki łożysk opartych o pomiar różnych wielkości fizycznych. Podział tych metod został szerzej opisany w rozdziale 3.3. Obecnie najczęściej stosowane metody diagnostyki łożysk wykorzystują pomiar wibracji w węźle łożyskowym. Mają one jednak podstawową wadę, polegającą na konieczności dostępu do maszyny dla zainstalowania czujników. Dostęp do pracującej maszyny jest często ograniczony, w związku z tym pomiar wibracji jest trudny do zrealizowania. Dlatego poszukuje się metod diagnostyki, które nie wymagałyby instalowania czujników bezpośrednio na silniku. Takie możliwości stwarzają metody oparte o analizę prądu zasilającego silnik. Są one tym bardziej atrakcyjne, że wiele silników indukcyjnych pracuje obecnie

przy zasilaniu przekształtnikowym, które wykorzystuje ciągły pomiar prądu silnika do celów sterowania. Na chwilę obecną przetworniki wykorzystywane w falownikach są niewystarczające do zastosowań diagnostycznych, jednakże zważywszy na nieustanny rozwój technologii, w przyszłości możliwe jest powstanie przetworników o znacznie lepszych parametrach, które będzie można wykorzystać zarówno do celów sterowania jak i diagnostyki.

Metody diagnostyczne wykorzystujące pomiar prądu silnika są z powodzeniem wykorzystywane do badania stanu izolacji stojana, klatki wirnika czy zwarć międzyzwojowych w stojanie. Prąd jest wielkością, która niesie ze sobą informacje diagnostyczne, na podstawie których możliwa jest diagnostyka większości elementów maszyny. Cały czas prowadzone są badania nad metodami prądowymi diagnostyki łożysk w silniku. Wykorzystanie pomiaru jednej wielkości fizycznej do badania kilku elementów pozwoliłoby zredukować koszty diagnostyki. Dlatego opracowanie skutecznej metody diagnostyki łożysk opartej o pomiar prądu silnika pozwoliłoby na implementację diagnostyki całego silnika przy pomocy jednego przetwornika pomiarowego. Ze względu na brak konieczności instalowania dodatkowych czujników rozwiązanie to byłoby bardzo korzystne pod względem ekonomicznym.

2 CEL, ZAKRES I TEZA PRACY

2.1 CEL PRACY

Głównym celem rozprawy jest opracowanie nowej metody diagnostyki łożysk w silniku indukcyjnym, opartej o pomiar prądu zasilającego silnik i dalsze przetwarzanie sygnału prądu z wykorzystaniem metody potrójnej kowariancji. Celem finalnym jest uzyskanie satysfakcjonującej trafności diagnoz stanu łożysk, przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów diagnostyki poprzez eliminację dodatkowych czujników, montowanych bezpośrednio na silniku. Ewentualna skuteczność metody potrójnej kowariancji pozwoliłaby na efektywną diagnostykę łożysk na podstawie pomiaru prądu, a także umożliwiłaby diagnostykę uszkodzeń całej maszyny wykorzystując pomiar jednej wielkości fizycznej.

2.2 ZAKRES PRACY

Zakres niniejszej pracy obejmuje głównie następujące elementy:

- Przegląd dostępnej literatury, dotyczącej tematu diagnostyki łożysk w silnikach indukcyjnych, na podstawie której porównano wybrane metody diagnostyki.
- Zaproponowanie nowej metody przetwarzania sygnału prądu (metody potrójnej kowariancji), umożliwiającej uzyskanie informacji o stanie łożysk.
- Przeprowadzenie symulacji numerycznych dotyczących zastosowania metody potrójnej kowariancji.
- Utworzenie oprogramowania systemu pomiarowego do przetwarzania sygnału prądu silnika zgodnie z zaproponowaną metodą.
- Wykonanie rejestracji prądu silnika indukcyjnego dla różnych rodzajów uszkodzeń łożysk oraz dla łożysk nieuszkodzonych.
- Wyznaczenie wskaźnika diagnostycznego, służącego do rozróżnienia łożysk uszkodzonych od nieuszkodzonych.
- Weryfikacja uszkodzonych łożysk za pomocą metody wibracyjnej, przy użyciu systemu diagnostyki DREAM.
- Przeprowadzenie badań diagnostycznych łożysk przy pomocy zaproponowanej metody na licznej grupie obiektów.
- Wyciągnięcie wniosków dla dalszych badań.

2.3 TEZA PRACY

Możliwe jest wyznaczenie wskaźnika diagnostycznego dla diagnostyki łożysk w silnikach indukcyjnych stosując wykrywanie nieliniowych zmian amplitudy i fazy dodatkowych składowych prądu zasilającego silnik przy pomocy metody potrójnej kowariancji.

3 PRZEGLĄD METOD DIAGNOSTYKI ŁOŻYSK

3.1 BUDOWA ŁOŻYSK

W miejscach, gdzie występuje ruch obrotowy pewnego elementu (np. wału) względem innego pojawia się konieczność zastosowania łożyska, które podtrzymuje oś i wirujące elementy.

Odpowiednio skonstruowane łożysko powinno spełniać następujące kryteria [19]:

- małe wymiary,
- nieskomplikowana konstrukcja,
- trwałość,
- niezawodność,
- cicha praca,
- łatwość smarowania,
- małe opory ruchu.

Ze względu na konstrukcję łożyska można podzielić na ślizgowe i toczne. Podstawowa różnica między nimi polega na tym, że w budowie łożyska ślizgowego nie występują ruchome elementy toczne takie jak kulki czy wałeczki. Poślizg występuje pomiędzy dwoma pierścieniami.

Łożysko ślizgowe składa się z dwóch zasadniczych części: panewki i kadłuba. Pomiedzy panewką a kadłubem znajduje się bardzo cienka warstwa smaru, która zapobiega stykaniu się elementów łożyska. W łożysku tym wykorzystuje się zjawisko tarcia ślizgowego, dzięki czemu można osiągnąć względnie małe opory ruchu. Budowę łożyska ślizgowego przedstawiono na Rys. 3.1. [29]



Rys. 3.1. Budowa łożyska ślizgowego [29]

Panewka, która przeważnie ma kształt pierścienia wykonana jest z materiału ułatwiającego poślizg, np. brązu czy teflonu. Dobór odpowiedniego tworzywa i środka smarnego mają zasadniczy wpływ na wartość współczynnika tarcia współpracujących elementów. Wraz ze wzrostem tego

współczynnika rośnie ryzyko wcześniejszego zużycia lub uszkodzenia łożyska. Smar odprowadza również ciepło wydzielone podczas ruchu elementów.

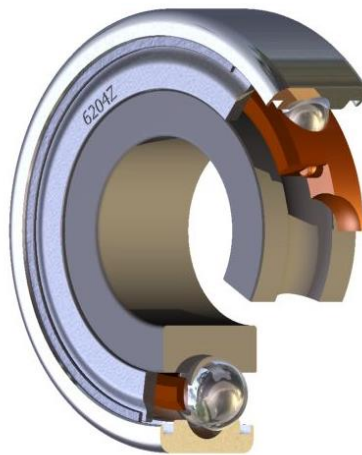
Ze względu na dobór środka smarnego łożyska ślizgowe można podzielić na:

- suche (stosowane są przy małych obciążeniach),
- powietrzne (używane w urządzeniach, w których istotnym aspektem jest ich dokładność),
- olejowe:
 - hydrodynamiczne,
 - hydrostatyczne.

Łożyska ślizgowe mają szerokie zastosowanie zarówno w konstrukcjach, gdzie występują bardzo małe obciążenia, takich jak mechanizmy zegarków, precyzyjne drukarki komputerowe, urządzenia medyczne, jak i w miejscach, w których konieczne jest przenoszenie dużych obciążeń (do kilku MN przy średnicy łożyska powyżej 1m), np. przemysł stoczniowy. Zaletą stosowania tego typu łożyska jest jego cicha praca. Łożysko ślizgowe nie wymaga też dużej precyzji w montażu, co z kolei jest konieczne przy zastosowaniu łożysk tocznych [28].

Łożyska toczne znajdują szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu (np. w maszynach rolniczych czy budowlanych) oraz w motoryzacji. W zależności od ich rodzaju mogą przenosić różne obciążenia, współpracując z innymi łożyskami [32]. Łożyska toczne są bardzo czułe na błędy współosiowości, dlatego ważna jest precyzja ich montażu [19].

Łożysko toczne składa się z pierścienia zewnętrznego, pierścienia wewnętrznego, elementów tocznych oraz koszyka. Budowę łożyska tocznego przedstawiono na Rys. 3.2.



Rys. 3.2. Budowa łożyska tocznego na przykładzie łożyska kulkowego

Pierścienie zawierają bieżnie główne, które przenoszą obciążenie w kierunku działania łożyska oraz bieżnie pomocnicze, które przenoszą obciążenie w innym kierunku lub prowadzą elementy

toczne. Istotnym elementem łożyska jest koszyk. Jego zadaniem jest utrzymanie wszystkich elementów tocznych w ustalonej odległości. Dzięki temu rozkład obciążenia jest równomierny. Oddzielenie każdego elementu tocznego powoduje także zmniejszenie tarcia między częściami. Elementy toczne, które znajdują się pomiędzy pierścieniami mogą przyjmować różne kształty. Ze względu na tę cechę, łożyska można podzielić na (Rys. 3.3) [28]:

- kulkowe,
- wałeczkowe:
 - walcowe,
 - igiełkowe,
 - stożkowe,
 - baryłkowe.



Rys. 3.3. Kształty elementów tocznych łożyska

Ze względu na wzajemne położenie pierścieni łożyska można podzielić na [28]:

- zwykłe,
- wahliwe,
- samonastawne.

Elementy toczne mogą występować w łożysku w kilku rzędach. Wyróżnia się łożyska [28]:

- jednorzędowe,
- dwurzędowe,
- wielorzędowe.

Aby zapobiec przedwczesnemu zużyciu elementów łożyska i zmniejszyć tarcie pomiędzy współpracującymi powierzchniami niezbędne jest ich smarowanie. Smar spełnia także rolę czynnika chłodzącego oraz zabezpiecza materiał przed korozją. W łożyskach tocznych stosuje się najczęściej dwa rodzaje smarów: olej mineralny i smar plastyczny. Dobór odpowiedniego środka smarującego zależy przede wszystkim od typu łożyska i warunków pracy. Dla łożysk pracujących przy temperaturze poniżej 70°C stosuje się smar plastyczny, natomiast powyżej tej temperatury lepsze rezultaty otrzymuje się przy zastosowaniu oleju mineralnego. W przypadku, gdy istotną cechą jest odporność na działanie wody i zwiększona wytrzymałość smaru stosuje się smar plastyczny. Konstrukcja łożyska

uniemożliwia niekiedy zastosowanie tego typu smaru. Na przykład w łożyskach baryłkowych osiowych ze względu na ich budowę stosuje się wyłącznie smarowanie olejem [28].

3.2 TYPY USZKODZEŃ ŁOŻYSK

Łożysko w pracującej maszynie jest bardzo istotnym elementem. W momencie, gdy ulega ono uszkodzeniu następuje przestój maszyny, który może okazać się bardzo kosztowny. Ponadto, takie uszkodzenie może powodować powstanie uszkodzeń wtórnych, które wymagają kolejnych nakładów finansowych. Trwałość łożyska można przedłużyć poprzez stosowanie określonych zasad [23]:

- zapewnienie wysokiej jakości łożyska, bez wad fabrycznych,
- właściwy dobór łożyska do warunków pracy i rodzaju maszyny,
- odpowiednie wymiary elementów łączących łożysko i części maszyny,
- prawidłowy montaż,
- poprawny dobór stosownego środka smarnego,
- odpowiednie uszczelnienie węzła łożyskowego,
- dozór i konserwacja,
- brak przeciążeń podczas eksploatacji.

W rzeczywistości spełnienie wszystkich warunków jest bardzo trudne.

Uszkodzenia łożysk zostały sklasyfikowane przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną (ISO). Norma ISO 15243:2004 definiuje sześć głównych grup rodzajów uszkodzeń i szesnaście podgrup, które przedstawiono w tabeli 3.1. Wszystkie dotyczą uszkodzeń powstałych podczas użytkowania łożyska [24]. Podział obejmuje cechy charakterystyczne uszkodzeń, widoczne na elementach łożyska oraz mechanizmy ich powstawania.

Większość uszkodzeń można podzielić na:

- uszkodzenia przed eksploatacyjne powstające przed lub w czasie montażu łożyska,
- uszkodzenia eksploatacyjne powstające podczas pracy łożyska.

Znaczna część uszkodzeń przedeksploatacyjnych związanych jest z nieprawidłowym montażem łożyska. Dlatego bardzo istotne jest uważne i precyzyjne umieszczenie łożyska w maszynie. Podczas montażu należy przestrzegać określonych zasad związanych m.in. z temperaturą nagrzewania, siłą naciągu łożyska czy wymaganą ilością środka smarnego. Należy także zwrócić uwagę na stan gniazda łożyskowego zarówno na wale jak i w oprawie [21].

Tabela 3.1. Klasyfikacja ISO rodzajów uszkodzeń [24]

Grupa główna	Podgrupa
Zmęczenie materiału	Zmęczenie materiału zapoczątkowane pod powierzchnią
	Zmęczenie materiału zapoczątkowane na powierzchni
Zużycie	Zużycie ścierne
	Zużycie przylgowe
Korozja	Korozja od wilgoci
	Korozja w wyniku tarcia <ul style="list-style-type: none"> • Korozja cierna • Fałszywe odciski Brinella
Erozja elektryczna	Nadmierne napięcie
	Uptyw prądu
Odształcenie plastyczne	Przeciążenie
	Wgniecenie cząstek zanieczyszczeń
	Wgniecenie w wyniku nieprawidłowej obsługi
Pęknięcie i przełamanie	Pęknięcie wymuszone
	Pęknięcie zmęczeniowe
	Pęknięcie termiczne

Wśród przyczyn przedeksploatacyjnych można wyróżnić [24] [25]:

- nieodpowiednie pasowanie na wale i w oprawie, czego skutkiem mogą być zbyt duże luzy lub napięcia łożyska, prowadzące w konsekwencji do takich uszkodzeń jak:
 - obracanie się pierścienia w miejscu osadzenia,
 - korozja cierna,
 - pęknięcia pierścieni,
 - zmniejszenie nośności,
 - wywołanie obciążeń wewnętrznych,
 - wzrost temperatury pracy;
- uszkodzone gniazdo łożyska na wale i w oprawie, które może być np. zdeformowane (stożkowe, owalne, odształcone podczas montażu) powodując korozję cierną,
- brak współosiowości statycznej,
- nieprawidłowe metody i zaniedbania podczas montażu prowadzące do zmęczenia materiału,
- niepoprawny transport, obsługa i przechowywanie.

Do uszkodzeń związanych z transportem można zaliczyć:

- prawdziwe odciski Brinella spowodowane uderzeniem łożyska lub obciążeniami udarowymi,

Do przyczyn uszkodzeń eksploatacyjnych należą [26] [27]:

- zmęczenie materiału (zapoczątkowane pod powierzchnią), które prowadzi do łuszczenia powierzchni bieżni i elementów tocznych łożyska,
- niewłaściwa ilość lub jakość środka smarnego– niewystarczająca lub zbyt duża lepkość, zanieczyszczenie smaru, niedostosowanie do warunków pracy. Wszystko to powoduje zmęczenia materiału zapoczątkowane na powierzchni bieżni i elementów tocznych,
- nieskuteczne uszczelnienia, które powodują wnikanie zanieczyszczeń do wnętrza łożyska,
- fałszywe odciski Brinella, wywołane drganiami (np. innych maszyn pracujących, które znajdują się w pobliżu) występującymi przeważnie podczas postoju maszyny. Drgania prowadzą do powstania płytkich wgłębień w bieżniach a stopień uszkodzenia zależy od siły i częstotliwości drgań.
- brak współosiowości w czasie pracy, które może prowadzić do pęknięcia zmęczeniowego,
- przepływ prądu upływu przez łożysko, który powoduje powstanie uszkodzeń powierzchniowych o wyglądzie płytkich kraterów (szczególnie przy zasilaniu przekształtnikowym łożyskowanej maszyny).

Z punktu widzenia diagnostyki oraz wykrycia uszkodzeń we wczesnym stadium istotny jest podział ze względu na występowanie uszkodzeń w poszczególnych elementach łożyska:

- uszkodzenia bieżni zewnętrznej,
- uszkodzenia bieżni wewnętrznej,
- uszkodzenia elementów tocznych,
- uszkodzenia koszyka.

Wymienione uszkodzenia łożysk mogą być przyczyną niespodziewanych przerw w pracy maszyn, co może generować bardzo duże koszty związane z przestojem produkcji. Dlatego w wielu przypadkach konieczne jest wykonywanie okresowych badań diagnostycznych w celu wykrycia uszkodzenia we wczesnym stadium. Pozwala to zaplanować odpowiednio wcześniej wymianę uszkodzonego łożyska oraz ograniczyć czas i koszty przestoju danej maszyny. Współcześnie silniki elektryczne wykorzystywane są w wielu układach napędowych z czego większość wyposażona jest w silniki indukcyjne. Niniejsza praca traktuje o diagnostyce łożysk w silnikach indukcyjnych. W dalszej części pracy zostaną przedstawione wybrane metody diagnostyki łożysk w takich silnikach.

3.3 WYBRANE METODY DIAGNOSTYKI

Istnieje szereg metod, które opracowano dla diagnostyki łożysk w silnikach indukcyjnych. Można je podzielić według mierzonych wielkości fizycznych, które są podstawą badania. Są to metody oparte na:

- 1) pomiarach wibracji klasycznym akcelerometrem piezoelektrycznym [6] [7] [15] [41] [43] [45];
- 2) pomiarach temperatury łożysk [14];
- 3) pomiarach akustycznych [9] [30] [36];
- 4) laserowych pomiarach wibracji [5];
- 5) badaniach przebiegu mocy chwilowej pobieranej przez silnik [1] [10];
- 6) pomiarach prądu [38] [39];
- 7) pomiarach strumienia magnetycznego [11].

Można je również podzielić według metod przetwarzania sygnału.

Są to metody wykorzystujące m.in.:

- 1) szybką transformatę Fouriera FFT [38] [39] ;
- 2) transformatę falkową [41] [44] [45];
- 3) sztuczne sieci neuronowe [6] [19] [45];
- 4) wykrywanie impulsów uderowych (metoda SPM) [43];
- 5) współczynnik kurtozy [15] [18];
- 6) obwiednię sygnału wysokoczęstotliwościowego [7] [17] [33].

Każda praktycznie zrealizowana metoda opiera się na pomiarze przynajmniej jednej z wielkości fizycznych i na co najmniej jednej z metod przetwarzania sygnału według powyższych zestawień. Spośród wielkości fizycznych, wykorzystywanych do diagnostyki łożysk najczęściej wykorzystywana jest wibracja. Wśród metod opartych o pomiar wibracji można wyróżnić proste metody, badające jedynie ogólny poziom drgań. Istnieją również metody bardziej zaawansowane, które pozwalają określić stopień i rodzaj uszkodzenia łożyska. Dzięki temu możliwe jest wykrycie uszkodzenia we wczesnym stadium jego rozwoju, zapobiegając tym samym dalszym uszkodzeniom.

Z budowy łożysk tocznych wynika, że w zależności od prędkości obrotowej łożyskowanego wału poszczególne elementy łożyska poruszają się z różną prędkością kątową. Znając budowę i wymiary danego łożyska oraz prędkość obrotową wału, można wyznaczyć częstotliwości związane z wirowaniem elementów łożyska za pomocą następujących zależności [17] [33]:

a) Częstotliwość elementów tocznych:

$$f_{rot} = f_r \frac{D}{d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta \right)^2 \right) \quad (3.1)$$

b) Częstotliwość koszyka:

$$f_c = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right) \quad (3.2)$$

c) Częstotliwość bieżni zewnętrznej:

$$f_{out} = \frac{1}{2} f_r n \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta \right) \right) \quad (3.3)$$

d) Częstotliwość bieżni wewnętrznej:

$$f_{in} = \frac{1}{2} f_r n \left(1 + \left(\frac{d}{D} \cos \beta \right) \right) \quad (3.4)$$

gdzie:

d – średnica elementu tocznego,

D – średnica podziałowa łożyska,

β – kąt pracy łożyska,

n – liczba elementów tocznych,

f_r – częstotliwość obrotowa wału.

Podane zależności wykorzystywane są w większości metod diagnostyki łożysk jako częstotliwości charakterystyczne dla uszkodzeń elementów łożyska. Składowe o podanych częstotliwościach występują w sposób jawny w widmie drgań oraz w widmie mocy chwilowej. Natomiast w sygnale prądu częstotliwości charakterystyczne są uwikłane. Mogą na przykład występować jako jeden ze składników sumy częstotliwości sieci zasilającej i częstotliwości bieżni zewnętrznej. Zagadnienie to zostało szerzej opisane w rozdziale 5.3, w którym zamieszczono tabelę z wyznaczonymi częstotliwościami składowych.

Autor niniejszej pracy w swojej rozprawie skupił się na przedstawieniu metod opartych o pomiar wielkości elektrycznych. W niniejszej pracy szczegółowo opisanych zostało pięć metod związanych

z pomiarem wielkości elektrycznych. Do tej pory metody te wykazywały trafność diagnoz nie wystarczającą do zastosowań komercyjnych. Z tego względu autorzy przedstawianych artykułów posiłkują się również innymi wielkościami, takimi jak sprawność czy strumień elektromagnetyczny. Wybrane metody w opinii autora pozwalają, jak do tej pory, na osiągnięcie najlepszych rezultatów w prądowej diagnostyce łożysk.

3.3.1 METODA ANALIZY WIDMA PRĄDU STOJANA

Metoda analizy widma prądu polega na dekompozycji sygnału prądu na składowe przy pomocy transformaty Fouriera. W widmie prądu poszukuje się składowych o częstotliwościach charakterystycznych dla uszkodzeń łożysk. Autor publikacji [38] zidentyfikował 35 składowych prądu silnika występujących podczas jego normalnej pracy. Są to składowe związane z częstotliwością zasilania, poślizgiem i częstotliwością obrotową. W związku z tym, że składowe o częstotliwościach charakterystycznych dla uszkodzeń nie występują w widmie prądu w sposób jawny, autor [39] określił ich występowanie wykorzystując do tego wcześniej zidentyfikowane składowe. Wyznaczenie częstotliwości składowych świadczących o uszkodzeniach jest możliwe przy zastosowaniu odpowiednich działań matematycznych. Stan łożyska określany jest na podstawie amplitud składowych prądu, które zależą od wielkości uszkodzenia oraz momentu obciążenia silnika.

Do wyznaczenia widma gęstości mocy sygnału autor [39] wykorzystał metodę Welch, która składa się z następujących kroków [38] [39]:

- dzielenie sygnału na ramki,
- wymnażanie ramek sygnału z funkcją okna Hamminga,
- obliczenie FFT,
- podnoszenie wartości próbek widma do kwadratu,
- uśrednienie widma.

Na podstawie widma wyznaczana jest częstotliwość sieci zasilającej oraz częstotliwość obrotowa wału, która pozwala obliczyć częstotliwości charakterystyczne dla danych uszkodzeń. Następnym etapem jest odczytanie wartości amplitudy dla składowych o obliczonych częstotliwościach. Na podstawie odczytanych wartości autor publikacji [39] proponuje obliczenie atrybutów decyzyjnych, a następnie klasyfikację uszkodzeń wykorzystując algorytmy oparte na sztucznych sieciach neuronowych oraz drzewie decyzyjnym.

Autor książki [39] określił kryteria, jakie powinien spełniać układ pomiarowy, aby diagnostyka łożysk przy pomocy prądu była możliwa. Szum własny układu nie powinien przekraczać - 110 dB w stosunku do amplitudy podstawowej harmonicznej. Z uwagi na to, że w widmie prądu pojawia się wiele składowych o zbliżonych do siebie częstotliwościach, a składowe wynikające z uszkodzeń łożysk

mają bardzo małe amplitudy w stosunku do pozostałych składowych prądu, czas pomiaru powinien wynosić przynajmniej 8 sekund, aby uzyskać rozdzielczość widma nie gorszą niż 1/8 Hz. Wysoka rozdzielczość widma pozwala na właściwą identyfikację składowych uszkodzeniowych.

Układ pomiarowy do diagnostyki łożysk za pomocą analizy widmowej prądu zasilającego składa się z następujących elementów [38] [39]:

- badany silnik,
- przetwornik prądowy,
- wzmacniacz napięciowy,
- filtr antyaliasingowy, zapobiegający nakładaniu się widm,
- przetwornik analogowo-cyfrowy,
- komputer.

Zaletą opisywanej metody jest wykrywanie kilku rodzajów uszkodzeń. Można ją stosować w miejscach trudnodostępnych, gdyż nie wymaga instalowania dodatkowych czujników. Wadą metody jest stosunkowo niska trafność diagnoz, ze względu na trudności w wykrywaniu w widmie amplitud składowych świadczących o uszkodzeniach. Metoda analizy widma jest zatem mało skuteczna przy wykrywaniu uszkodzeń we wczesnej fazie ich powstawania.

3.3.2 TEAGER-KAISER ENERGY OPERATOR

Metoda Teager - Kaiser Energy Operator (TKEO) [31] bazuje na nieliniowym filtrze cyfrowym o bardzo wąskim paśmie. Prezentuje prostą drogę eliminacji głównej harmonicznej badanego przebiegu prądu zasilania przed przeprowadzaniem analizy widmowej prądu. TKEO operuje tylko na trzech kolejnych próbkach prądu co powoduje, że działa bardzo szybko.

Poniżej przedstawiono matematyczną definicję operatora TKEO. Dla sygnału ciągłego $x(t)$, TKEO definiowane jest następująco:

$$\psi(x(t)) = \dot{x}(t)^2 - x(t) \cdot \ddot{x}(t) \quad (3.5)$$

gdzie: $\dot{x}(t) = \frac{dx}{dt}$

W przypadku sygnału dyskretnego operator TKEO przyjmuje inną postać niż podana dla sygnału ciągłego. Wykorzystując wsteczną aproksymację pochodnej względem czasu otrzymujemy [31]:

$$\psi(x[n]) = \left(\frac{x[n] - x[n-1]}{\Delta t} \right)^2 - x[n] \cdot \frac{x[n] - 2x[n-1] + x[n-2]}{(\Delta t)^2} = \frac{1}{(\Delta t)^2} (x[n-1]^2 - x[n-2] \cdot x[n]) \quad (3.6)$$

Gdzie $x[n]$ jest sygnałem dyskretnym a Δt jest odwrotnością częstotliwości próbkowania. Przekształcając równanie (3.6) otrzymujemy [31]:

$$\phi(x[n]) = x[n]^2 - x[n-1] \cdot x[n+1] \quad (3.7)$$

W równaniu (3.7) wykorzystywane są tylko 3 próbki, zatem odpowiedź TKEO jest niemal natychmiastowa.

Opisywana metoda diagnostyczna bazuje na analizie nowego sygnału $i_{TK}(t)$, powstałego na podstawie pierwotnego sygnału $i(t)$ z TKEO [31]:

$$i_{TK}(t) = \frac{\psi(i(t)) - \overline{\psi(i(t))}}{\psi(i(t))} \quad (3.8)$$

gdzie $i_{TK}(t)$ jest składową zmienną funkcji $\psi(i(t))$, znormalizowaną przez podzielenie przez składową stałą.

Diagnostyka uszkodzeń w maszynie przy zastosowaniu TKEO składa się z następujących etapów (Rys. 3.4) [31]:

- 1) Przy pomocy algorytmu TKEO sygnał badany $i(t)$ przekształcany jest na sygnał diagnostyczny $i_{TK}(t)$.
- 2) Widmo $i_{TK}(t)$ obliczone zostaje przy użyciu szybkiej transformacji Fouriera (FFT).
- 3) W ostatnim etapie następuje analiza widma prądu $i_{TK}(t)$ polegająca na wyszukaniu składowych charakterystycznych świadczących o uszkodzeniach.



Rys. 3.4. Etapy diagnostyki przy zastosowaniu TKEO: demodulacja prądu fazowego przez TKEO, obliczenie FFT, analiza widma

Zaletą przedstawionej metody jest możliwość odfiltrowywania składowej podstawowej sygnału, której występowanie w widmie stanowi istotny problemem. Po zastosowaniu TKEO składowe wynikające z uszkodzeń ulegają przesunięciu w dziedzinie częstotliwości. Pulsacje składowych uszkodzeniowych występujących w sygnale $i_{TK}(t)$ można obliczyć przy pomocy klasycznych wzorów stosowanych również w diagnostyce wibracyjnej. Ułatwia to znacznie ich poszukiwanie w widmie.

Testy przeprowadzone przez autorów opisywanej metody [31] zostały wykonane przy znacznym uszkodzeniu łożyska (otwór przelotowy w pierścieniu zewnętrznym). W rzeczywistości tego typu uszkodzenie jest czysto teoretyczne, zatem przydatność rozwiązania może okazać się znikoma.



Badane uszkodzenie jest na tyle duże, że można je wykryć na podstawie widma prądu przed przekształceniem TKEO, co w jasny sposób zostało przedstawione w artykule [31].

Zastosowanie TKEO rzeczywiście ułatwia właściwą identyfikację uszkodzenia, jednakże nie rozwiązuje głównego problemu związanego z diagnostyką prądową łożysk jakim jest wyspecjalizowany układ pomiarowy pozwalający zmierzyć składowe o bardzo niskich amplitudach nałożonych na składową podstawową. Amplitudy składowych wynikających z uszkodzenia są wielokrotnie niższe od amplitudy składowej podstawowej. Czułość układu pomiarowego jest zawsze dostosowana do składowej podstawowej, zatem składowe wynikające z uszkodzenia są mierzone z bardzo małą precyzją. W prezentowanym przez autorów przypadku [31] zastosowanie filtracji cyfrowej przyniosło oczekiwane rezultaty, jednak nie miało to znaczącego wpływu na wykrycie uszkodzenia. Metoda TKEO znajduje dużo lepsze zastosowanie przy wykrywaniu pękniętych prętów klatki wirnika przy małych obciążeniach. Pozwala odnaleźć składowe uszkodzenia, które nie były widoczne w widmie przed jej zastosowaniem.

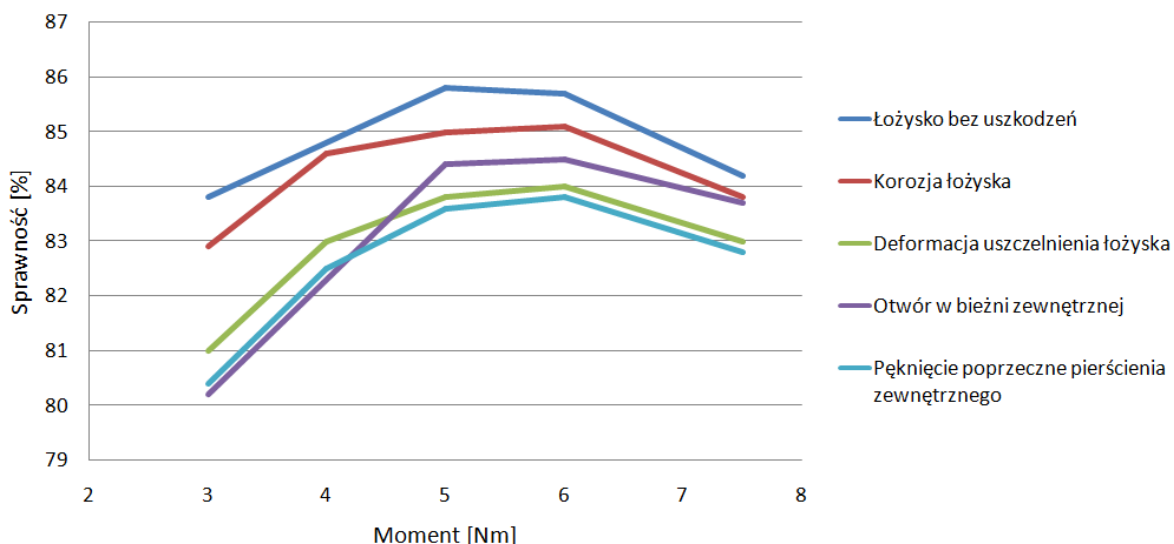
3.3.3 METODA OPARTA O ANALIZĘ PRĄDU STOJANA I POMIAR SPRAWNOŚCI SILNIKA

W celu poprawy trafności diagnoz autorzy metody opisanej w [10] połączyli metodę prądową z metodą pomiaru sprawności silnika. Rozwój uszkodzenia powoduje straty energii a także związane z tym obniżenie sprawności. Zastosowanie tej metody wymaga jednak zainstalowania dodatkowych urządzeń pomiarowych. Rozwiązanie to wiąże się zatem z dużymi kosztami. Pomiar sprawności mierzony jest jako stosunek wyjściowej mocy mechanicznej i wejściowej mocy elektrycznej. Aby uzyskać charakterystyki sprawności dla silnika nieuszkodzonego i silnika z celowo wprowadzonymi uszkodzeniami łożysk autorzy [10] zwiększali moment hamujący w przedziale od 3 Nm do wartości znamionowej 7,5 Nm.

W badaniach wykorzystano łożyska zawierające następujące uszkodzenia:

- pęknięcie poprzeczne pierścienia zewnętrznego
- otwór w bieżni zewnętrznej
- deformacja uszczelnienia łożyska
- korozja łożyska

Wyniki badań dla poszczególnych uszkodzeń przedstawiono na rys. 3.5.



Rys. 3.5. Porównanie charakterystyk sprawności [10]

Na podstawie rys. 3.5 można zaobserwować, że charakterystyki sprawności rosną ze zwiększeniem momentu do 5 - 6 Nm, a następnie maleją. Przy minimalnym obciążeniu najmniejszą sprawność odnotowano dla uszkodzenia bieżni zewnętrznej łożyska. Pęknięcie poprzeczne pierścienia zewnętrznego jest głębsze, zatem sprawność w tym przypadku osiąga mniejszą wartość. Bardzo podobną charakterystykę do tego uszkodzenia ma uszkodzenie spowodowane deformacją uszczelnienia. Z punktu widzenia analizy widmowej deformacja uszczelnienia jest praktycznie niewykrywalna, podczas gdy przy wykorzystaniu charakterystyki sprawności wyraźnie widoczny jest wpływ tego uszkodzenia na pracę silnika. Najmniejszy wpływ na sprawność silnika ma korozja łożyska. Charakterystyka tego uszkodzenia jest zbliżona do charakterystyki łożyska bez uszkodzenia. Tego typu uszkodzenie trudno wykryć zarówno przy pomocy analizy widmowej jak i pomiaru sprawności. Wynika z tego, że uszkodzenie to ma znikomy wpływ na właściwą pracę silnika.

Autorzy artykułu dowodzą, że przy poważnych uszkodzeniach łożyska spadek sprawności sięga nawet 4% (przy minimalnym obciążeniu). Przy mniej znaczącym uszkodzeniu różnica między łożyskiem nieuszkodzonym a uszkodzonym jest rzędu 1% sprawności a w niektórych punktach zaciera się prawie zupełnie. Za pomocą opisanej metody można zatem wykryć jedynie poważne uszkodzenia. Pomiar sprawności nie daje konkretnych informacji na temat rodzaju i stopnia zaawansowania uszkodzenia. Za pomocą tej metody nie da się również wykryć uszkodzenia w jego wczesnej fazie, co jest bardzo istotne dla zapewnienia bezawaryjnej pracy urządzenia.

3.3.4 METODA OPARTA O POMIAR MOCY CHWILOWEJ

Jedną z wielkości elektrycznych wykorzystywanych w diagnostyce łożysk silników indukcyjnych jest moc chwilowa. Uszkodzenia łożysk w silniku istotnie wpływają na przebiegi napięć i prądów,

ponieważ kontakt uszkodzonych miejsc z pozostałymi częściami łożyska prowadzi do chwilowego wzrostu momentu oporowego a zatem również mocy chwilowej [4]. Metoda oparta o pomiar mocy chwilowej wykorzystuje pomiar wartości chwilowych prądu i napięcia. Moc chwilowa stanowi iloczyn tych dwóch wartości. Na podstawie przebiegu mocy chwilowej oblicza się widmo, w którym znajdują się składowe związane z uszkodzeniami. Na bazie składowych, znajdujących się w paśmie częstotliwości żłobkowych oblicza się prędkość obrotową silnika oraz częstotliwość sieci zasilającej. Otrzymane wartości służą do obliczenia częstotliwości charakterystycznych. Autor metody stosuje również filtrację przy użyciu falek [4]. Następnie w widmie mocy chwilowej wyszukiwane są składowe o częstotliwościach charakterystycznych. W kolejnym kroku wyznaczane są amplitudy tych składowych, które przekazywane są do modułu diagnostycznego, dokonującego oceny stanu łożysk.

Badania przeprowadzane na silnikach indukcyjnych z uszkodzonymi łożyskami potwierdzają, że w widmie mocy chwilowej można odnaleźć dodatkowe składowe związane z częstotliwościami charakterystycznymi dla danego typu uszkodzenia [4]. Ponadto, składowe te występują w widmie w sposób jawny, bez względu na typ i rozmiar uszkodzenia. W celu sprawdzenia poprawności otrzymanych wyników zastosowano również metodę wibracyjną, z wykorzystaniem systemu diagnostyki DREAM. Metoda oparta o pomiar mocy chwilowej w porównaniu do metody wibracyjnej daje zbliżone rezultaty [4].

Wadą opisywanej metody są wysokie koszty aparatury pomiarowej. Metoda ta wymaga specjalnego systemu pomiarowego, w skład którego wchodzi między innymi karta pomiarowa, umożliwiające jednoczesne próbkowanie napięcia i prądu. W celu wykrycia składowych uszkodzeniowych wymagana jest wysoka rozdzielczość przetworników analogowo-cyfrowych. Autor artykułu [4] do celów diagnostycznych wykorzystał kartę o rozdzielczości 24 bity. Większość dostępnych na rynku kart pomiarowych umożliwia jedynie próbkowanie sekwencyjne, którego w tym przypadku nie można zastosować.

3.3.5 METODA WYKORZYSTUJĄCA ROZPROSZONY STRUMIEŃ MAGNETYCZNY

Metoda oparta o pomiar strumienia magnetycznego najczęściej wykorzystywana jest do wykrywania uszkodzeń w silniku indukcyjnym takich jak: ekscentryczność statyczna i dynamiczna, przerwy w uzwojeniu stojana, uszkodzenia klatki wirnika, asymetria zasilania czy zwarcie międzyzwojowe w stojanie [39]. Najnowsze badania [11] pokazują, że metodę tą można wykorzystać również w diagnostyce elementów tocznych łożysk silnika. Uzyskane rezultaty porównano z wynikami otrzymanymi z analizy prądu. Autorzy artykułu [11] stosowali metodę rozproszonego strumienia do wykrywania jednopunktowych uszkodzeń na elementach tocznych łożyska, analizując tylko wielokrotności podstawowych składowych harmonicznym. Metoda została ulepszona poprzez ocenę

wszystkich możliwych składowych harmonicznym, w szczególności tych, związanych z częstotliwościami charakterystycznymi dla uszkodzonego łożyska.

Autorzy [11] zbadali możliwość wykrycia korozji elementów tocznych łożyska dla trzech różnych stopni uszkodzenia. W celu uzyskania materiałów do badań kulki łożyska zanurzano w roztworze kwasu siarkowego. Różne stopnie uszkodzenia otrzymano poprzez zwiększanie czasu zanurzenia: 30, 70 i 90 minut. Dodatkowo, w ostatnim kroku zwiększono również stężenie roztworu. Następnie, dla opisanych uszkodzeń przeprowadzono pomiary bez obciążenia oraz przy obciążeniu wynoszącym 75% mocy znamionowej silnika. Dla wszystkich pomiarów, w tym samym czasie zostały dodatkowo zmierzone 3 wartości: prąd w jednej fazie oraz strumień rozproszony przy pomocy dwóch różnych czujników. Jednym z nich jest czujnik dostępny na rynku, natomiast drugi został specjalnie skonstruowany przez autorów [11] do celów badawczych.

Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy wnioskują, że metoda wykorzystująca rozproszony strumień osiąga lepsze rezultaty w porównaniu do metody diagnostyki za pomocą prądu, ponieważ sygnał prądowy jest słabszy i bardziej wrażliwy na szumy. Należy jednak zaznaczyć, że wnioski te wyciągnięto stosując czujnik hallotronowy, który jak wskazuje autor publikacji [39] nie spełnia ustalonych kryteriów układu pomiarowego do diagnostyki łożysk, ze względu na zbyt wysoki poziom szumów własnych.

Prezentowana metoda, podobnie jak metody wibracyjne, wymaga instalacji dodatkowego czujnika na obudowie silnika. Niemniej jednak konstrukcja zbudowanego czujnika jest bardzo prosta, co czyni go zdecydowanie tańszym od czujników stosowanych w diagnostyce wibracyjnej.

4 STATYSTYKA WYŻSZYCH RZĘDÓW W DIAGNOSTYCE ŁOŻYSK

W diagnostyce elementów mechanicznych metodami wibracyjnymi coraz częściej wykorzystuje się analizę przy pomocy statystyki wyższych rzędów [12] [13] [36] [42]. Pozwala ona na wykrycie nieliniowych zmian w sygnale wibracji [12] [42]. W związku z powyższym autor pracy zaproponował wykorzystanie statystyki wyższych rzędów w diagnostyce łożysk poprzez analizę sygnału prądu silnika. Uszkodzenia w łożysku silnika powodują drgania wału, co prowadzi do powstawania promieniowego ruchu wirnika względem stojana. Skutkiem tego są zmiany szczeliny powietrznej silnika, które wpływają na pojawienie się dodatkowych składowych w sygnale prądu silnika [11] [38]. W związku z występowaniem nieliniowości w wibracji można przypuszczać, że w dodatkowych składowych prądu spowodowanych wibracjami również mogą występować nieliniowości. Dotychczasowe metody diagnostyki prądowej łożysk opierały się na analizie dodatkowych składowych w widmie prądu, powiązanych ze zjawiskami elektromechanicznymi w silniku indukcyjnym. Metody te powstały przez analogię do metod diagnostyki wibracyjnej. Analizie poddawano amplitudy składowych widma prądu, których częstotliwości dały się powiązać z uszkodzeniami łożysk. Rozwój i wprowadzenie metod statystycznych do diagnostyki pozwolił na rozszerzenie zakresu analizowanych parametrów.

Celem autora niniejszej pracy było zbadanie przydatności potrójnej kowariancji w prądowej diagnostyce łożysk. Przeprowadzone badania symulacyjne objęły analizę wpływu nieliniowych zmian amplitudy sygnału na wartość potrójnej kowariancji.

4.1 BISPEKTRUM

Klasyczne metody analizy widma wyższego rzędu (HOS - higher order spectra) bazujące na transformacie Fouriera zostały do tej pory dobrze zbadane i wykorzystane do detekcji nieliniowości w stacjonarnych sygnałach czasowych [12]. Widmo trzeciego rzędu jest powszechnie określane jako bispectrum, natomiast widmo czwartego rzędu jako trispectrum. Metody statystyki wyższych rzędów zachowują informację fazową sygnału oraz są odporne na zakłócenia [16]. Ze względu na te właściwości bardzo dobrze sprawdzają się one w cyfrowym przetwarzaniu sygnałów do celów diagnostycznych [16].

Analiza sygnałów za pomocą bispektrum jest coraz częściej wykorzystywana do diagnostyki łożysk, przekładni zębatych i innych elementów mechanicznych [8]. Współcześnie, pojawiły się publikacje na temat zastosowania bispektrum do analizy sygnału akustycznego zarejestrowanego przy pomocy urządzeń mobilnych [36]. Autor artykułu [36] stosuje bispektrum jako jedną z metod

w torze przetwarzania sygnału, dzięki czemu możliwe jest wyszukanie informacji, których nie da się wykryć tradycyjnymi metodami. Uszkodzenia występujące w maszynach są często związane z nagłymi, przemijającymi zdarzeniami, które mogą wywoływać sygnały o charakterze nieliniowym. Bispektrum umożliwia wykrycie nieliniowości oraz współzależności dwóch składowych o różnych częstotliwościach [42]. Bispectrum można zdefiniować następującym wzorem [35]:

$$B(f_1, f_2) = E[X(f_1)X(f_2)\overline{X(f_1 + f_2)}] \quad (4.1)$$

gdzie:

f_1, f_2 - częstotliwości składowych sygnału,

E - wartość oczekiwana,

X - transformata Fouriera sygnału.

Powyższy wzór opisuje wartość oczekiwaną z iloczynu zmieniających się w czasie amplitud trzech składowych. Iloczyn składa się z 3 czynników: składowej o częstotliwości f_1 , składowej o częstotliwości f_2 oraz składowej o częstotliwości będącej sumą f_1 i f_2 . Przetwarzanie sygnału za pomocą bispektrum do celów diagnostyki łożysk stosuje się przeważnie do analizy sygnałów wibracyjnych i akustycznych.

Z racji tego, że mechanizm powstawania składowych związanych z uszkodzeniami łożysk w sygnale prądu jest inny niż mechanizm, związany z powstawaniem składowych uszkodzeniowych w sygnale wibracji, wykorzystanie bispectrum do analizy prądowej, zdaniem autora niniejszej pracy mogłoby nie przynieść pozytywnych wyników. W sygnale prądu składowe o częstotliwościach charakterystycznych nie występują w sposób jawny. Żadnej częstotliwości uszkodzeniowej nie można przedstawić w postaci sumy dwóch innych częstotliwości uszkodzeniowych. Aby umożliwić stosowanie bispectrum do analizy sygnału prądu należało zmodyfikować bispectrum do potrójnej kowariancji. Zaproponowane przez autora rozprawy rozwiązanie składa się zatem z trzech składowych o niezależnych częstotliwościach, które zgodnie z przedstawionymi dalej rozważaniami teoretycznymi, zdaniem autora powinny pozwolić na osiągnięcie dużo lepszych rezultatów niż zastosowanie bispectrum. Z tego względu, autor pracy zdecydował się na zastosowanie metody potrójnej kowariancji.

4.2 NTC – NORMALIZED TRIPLE COVARIANCE (ZNORMALIZOWANA POTRÓJNA KOWARIANCJA)

Autor rozprawy zaproponował nowe podejście do przetwarzania sygnału diagnostycznego, zawartego w widmie prądu silnika. Proponowana metoda obróbki sygnału prądu to NTC opisana przez równanie (4.2).

$$NTC(x, f_1, f_2, f_3) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left((X_i(f_1) - E(\mathbf{X}(f_1))) \cdot (X_i(f_2) - E(\mathbf{X}(f_2))) \cdot (X_i(f_3) - E(\mathbf{X}(f_3))) \right)}{\sqrt{\sigma^2(\mathbf{X}(f_1)) \cdot \sigma^2(\mathbf{X}(f_2)) \cdot \sigma^2(\mathbf{X}(f_3))}} \quad (4.2)$$

gdzie:

x – sygnał w dziedzinie czasu dyskretnego

n – liczba segmentów czasowych

$X_i(f_1)$ – współczynnik szeregu Fouriera z sygnału x dla i -tego segmentu czasowego dla częstotliwości f_1

$E(\mathbf{X}(f_1))$ – wartość średnia współczynników szeregu Fouriera dla częstotliwości f_1 ze wszystkich segmentów czasowych

$\sigma^2(\mathbf{X}(f_1))$ – wariancja współczynników szeregu Fouriera dla częstotliwości f_1 ze wszystkich segmentów czasowych

Zgodnie z powyższym wzorem, mnożone składowe zostały pomniejszone o wartość średnią, co skutkuje brakiem wrażliwości kowariancji na sygnały o stałych amplitudach i fazach. Jeżeli amplitudy i fazy zmieniają się w czasie dla wszystkich trzech częstotliwości, wartość NTC będzie tym wyższa im bardziej zbliżone będą do siebie zmiany amplitud wybranych składowych. Dotychczasowe metody, oparte na pomiarach małych składowych diagnostycznych w widmie prądu, stwarzały problemy z pomiarem amplitud tych składowych w obecności dużych amplitud innych składowych. Zaletą metody NTC jest brak wrażliwości na amplitudę składowej podstawowej analizowanego sygnału. Natomiast wynik obliczania NTC jest tym większy, im bardziej odkształcone są składowe o częstotliwościach f_1, f_2, f_3 , dla których obliczana jest wartość NTC

Obliczenie NTC wymaga podzielenia sygnału prądu na segmenty czasowe. Rozdzielczość widma jest odwrotnie proporcjonalna do długości segmentu czasowego. Przy zastosowaniu opisywanej metody do prądowej diagnostyki łożysk w silniku indukcyjnym należy wybrać przynajmniej 8 sekundy segment czasowy. Pozwala to uzyskać dostateczną rozdzielczość widma, wymaganą ze względu na bardzo niskie wartości poszukiwanych składowych, których przy niższej rozdzielczości nie można rozróżnić od szumu pomiarowego. Aby uzyskać więcej segmentów czasowych, sygnał należy podzielić na segmenty nakładające się na siebie. Dzięki temu możliwe jest wykorzystanie tej części sygnału, która w poprzednim segmencie czasowym jest wygaszana przez okno wygładzające.

Dla każdego segmentu czasowego wyznaczana jest szybka transformata Fouriera z oknem Blackmana. Na podstawie uzyskanych widm wyznaczana jest prędkość obrotowa oraz częstotliwość sieci zasilającej dla każdego segmentu osobno. Na podstawie uzyskanych informacji, wyznaczane są częstotliwości charakterystyczne dla których obliczana jest wartość NTC. Dzięki temu na wynik



obliczenia nie powinny mieć wpływu zmiany prędkości obrotowej oraz częstotliwości sieciowej w trakcie pomiaru. Wartość NTC wyznaczana jest oddzielnie dla każdej fazy silnika, końcowym wynikiem jest wartość średnia z trzech wartości NTC (obliczonych dla poszczególnych faz).

4.3 BADANIA SYMULACYJNE NTC

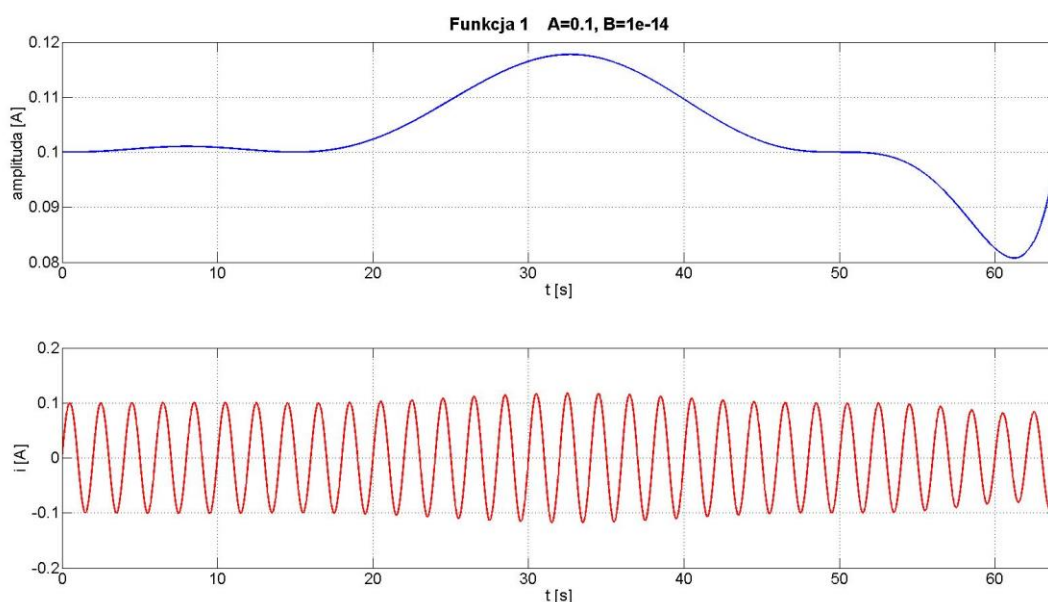
W celu zbadania możliwości NTC przeprowadzono następujące symulacje. Do zarejestrowanego rzeczywistego sygnału prądu nieuszkodzonego i nieobciążonego silnika dodane zostały 3 składowe. Do testowania przyjęto sygnały sinusoidalne o stałej i zmiennej amplitudzie przy stałej częstotliwości. Zmienność amplitudy uzyskano przez zastosowanie funkcji wielomianowych, logarytmicznych i wykładniczych. Wymienione funkcje wybrano w celu sprawdzenia różnych rodzajów zmienności. Celem symulacji było obliczenie wartości NTC dla częstotliwości wprowadzonych składowych. Na podstawie uzyskanych w ten sposób wyników można zaobserwować wpływ rodzaju zmienności amplitudy na wartość NTC. W tabeli 4.1. zestawiono przykładowe funkcje wybrane do przeprowadzenia symulacji, które zdaniem autora wystarczająco dobrze obrazują różne typy zmienności sygnału.

Tabela 4. 1. Funkcje wykorzystane do symulacji NTC

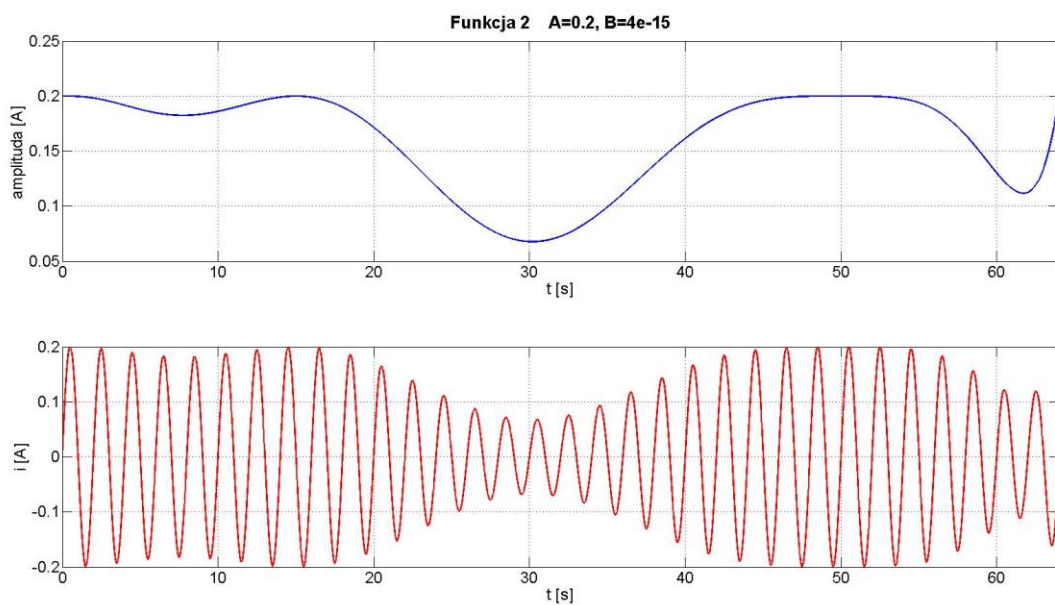
Nazwa funkcji	Wzór funkcji
Funkcja 1	$(A_1 + B_1 * [t^3(t - 64)(t - 15)^2(t - 50)^3]) * \sin(2\pi ft)$
Funkcja 2	$(A_2 + B_2 * [t^3(t - 64)(t - 15)^2(t - 50)^4]) * \sin(2\pi ft)$
Funkcja 3	$(A_3 + B_3 * [t(t - 64)(t - 15)(t - 50)^2]) * \sin(2\pi ft)$
Funkcja 4	$(A_4 + B_4 * [t(t - 10)(t - 25)(t - 40)(t - 55)(t - 64)]) * \sin(2\pi ft)$
Funkcja 5	$(A_5 + B_5 * [t^{\frac{3}{2}}(t - 10)(t - 25)(t - 40)(t - 55)(t - 64)]) * \sin(2\pi ft)$
Funkcja 6	$(A_6 + B_6 * [t(t - 64)(t - 25)(t - 35)^3]) * \sin(2\pi ft)$
Funkcja 7	$(A_7 + B_7 * \log(t)) * \sin(2\pi ft)$
Funkcja 8	$(A_8 + B_8 * e^{0,05t}) * \sin(2\pi ft)$
Funkcja 9	$(A_9 + B_9 * t) * \sin(2\pi ft)$

Symulacje przeprowadzono przy założeniu, że wprowadzone trzy składowe mają taki sam przebieg amplitudy w funkcji czasu. Badania przeprowadzono dla 2 sygnałów. W pierwszym przypadku dodatkowe składowe wprowadzono do sygnału sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz, w drugim natomiast do zmierzonego sygnału prądu dla nieuszkodzonego i nieobciążonego silnika. Za każdym razem wprowadzano do sygnału 3 dodatkowe składowe o częstotliwości: 12 Hz, 41 Hz, 78 Hz, dla tych samych częstotliwości obliczona została potrójna kowariancja. Wartość kowariancji dla zmierzonego sygnału prądu silnika przed wprowadzeniem dodatkowych składowych dla podanych częstotliwości do badanego sygnału wynosi 0,1247.

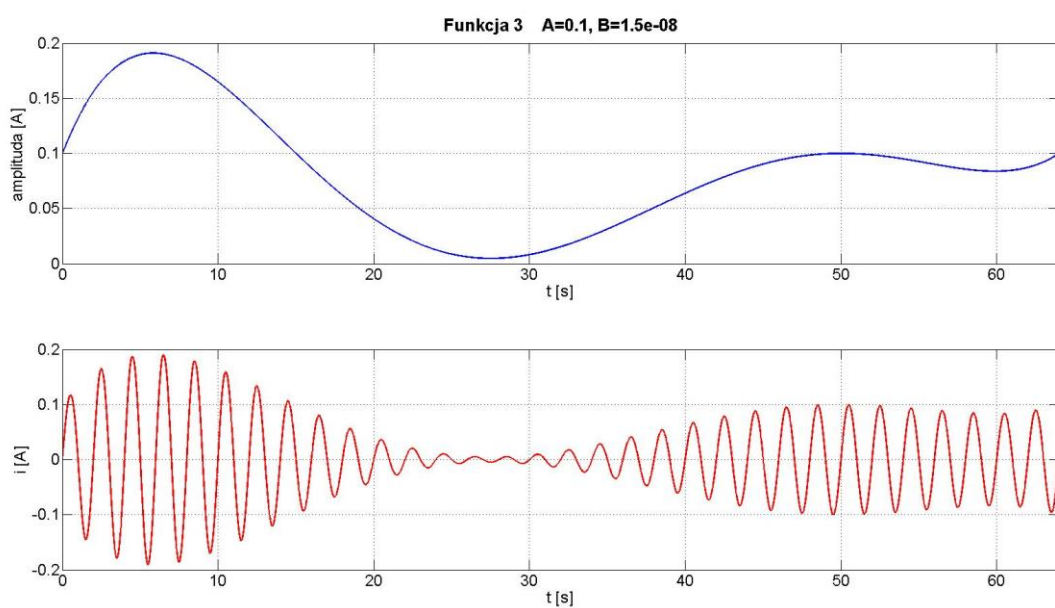
Poniżej zamieszczono wykresy przykładowych przebiegów funkcji 1-9 dla częstotliwości 0,5 Hz. (Rys. 4.1. – Rys. 4.9.) Niska wartość częstotliwości została przyjęta jedynie dla zobrazowania przebiegu zmienności funkcji sinusoidalnej, ponieważ przy wyższych częstotliwościach identyfikacja przebiegu jest utrudniona.



Rys. 4. 1. Obwiednia oraz przebieg funkcji 1

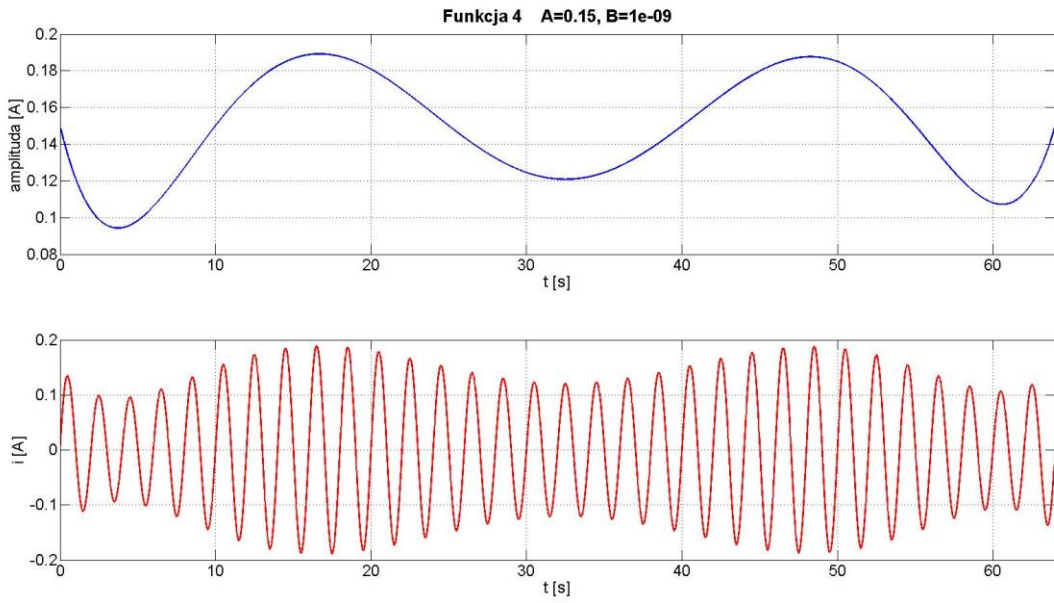


Rys. 4. 2. Obwiednia oraz przebieg funkcji 2

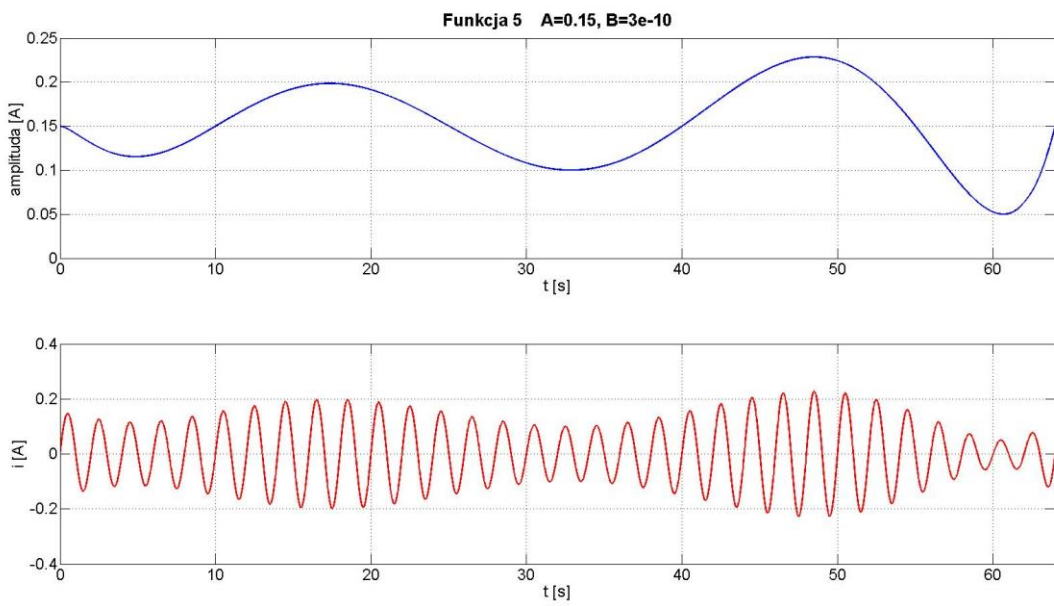


Rys. 4. 3. Obwiednia oraz przebieg funkcji 3

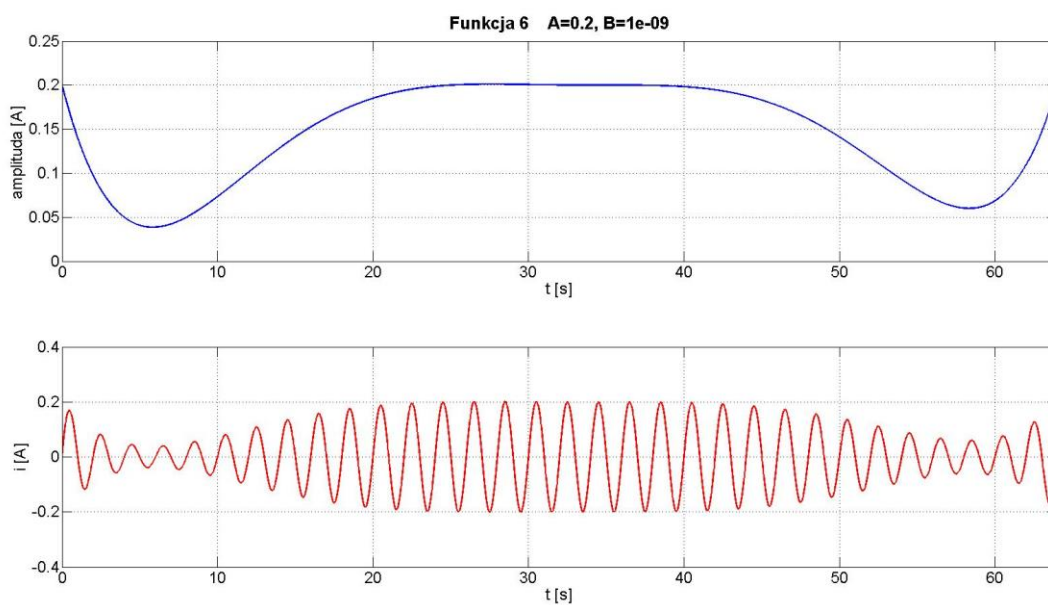




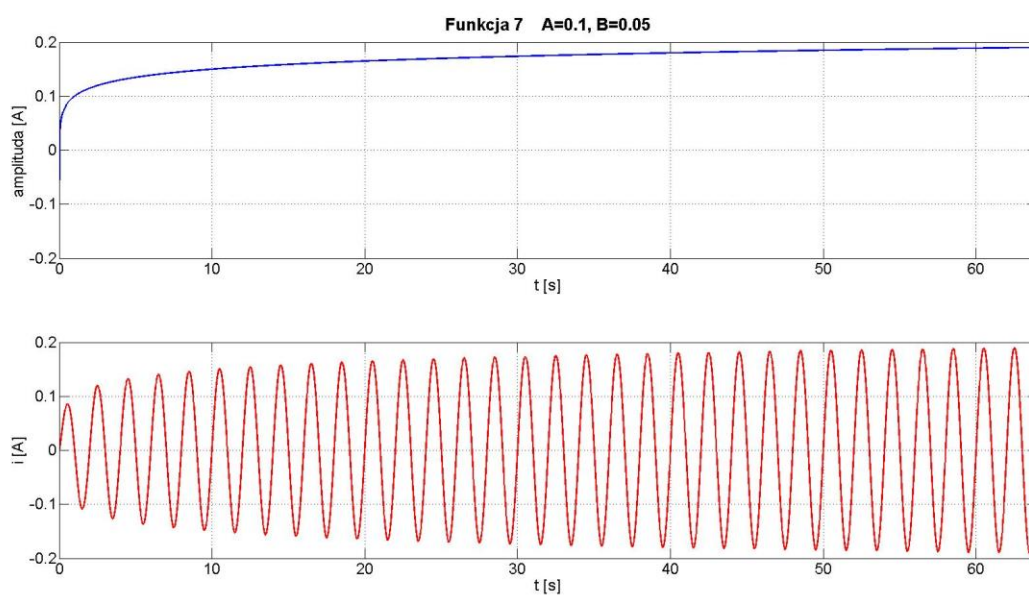
Rys. 4. 4. Obwiednia oraz przebieg funkcji 4



Rys. 4. 5. Obwiednia oraz przebieg funkcji 5

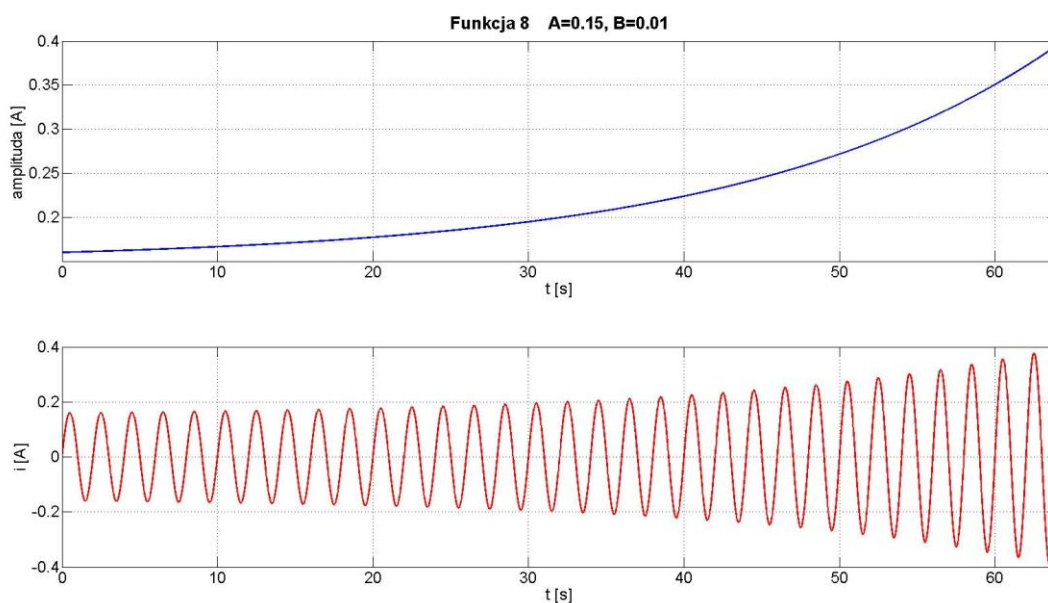


Rys. 4. 6. Obwiednia oraz przebieg funkcji 6

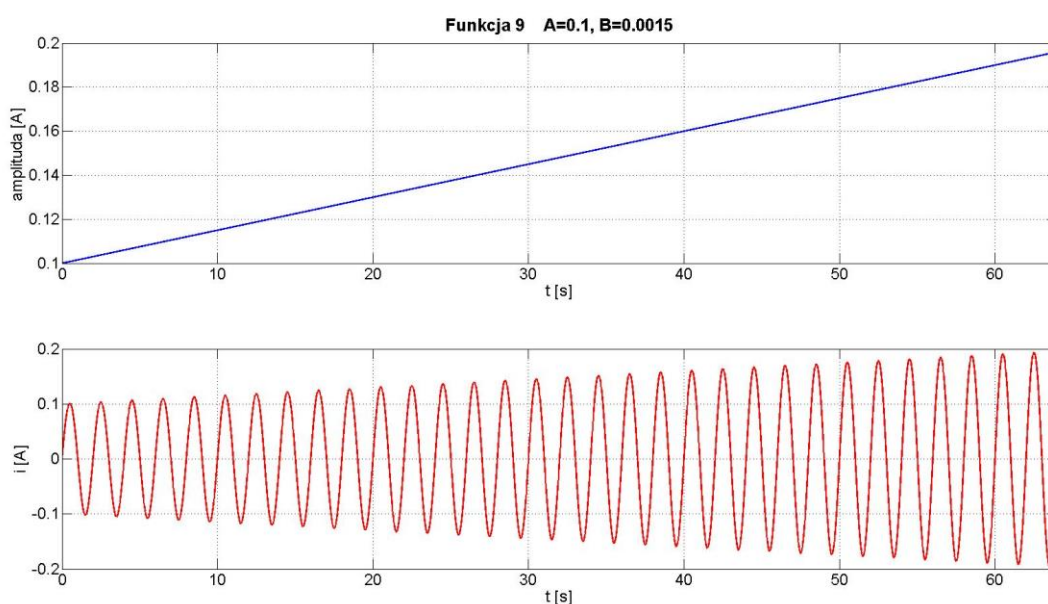


Rys. 4. 7. Obwiednia oraz przebieg funkcji 7





Rys. 4. 8. Obwiednia oraz przebieg funkcji 8



Rys. 4. 9. Obwiednia oraz przebieg funkcji 9

W poniższej tabeli przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dla wybranych współczynników A i B (tabela 4.2.). Zmienne zostały dobrane tak, aby amplituda sumy 3 składowych nie przekraczała około 10% amplitudy sygnału przed wprowadzeniem dodatkowych składowych.



Tabela 4. 2. Wyniki badań symulacyjnych

Nr symulacji	Nazwa funkcji	A	B	Wynik NTC dla sinusa	Wynik NTC dla sygnału silnika
1.	Funkcja 1	0,10	10^{-14}	0,3187	0,3144
2.	Funkcja 1	0,05	10^{-14}	0,3187	0,3144
3.	Funkcja 1	0,05	$2 * 10^{-14}$	0,3187	0,3166
4.	Funkcja 1	0,05	$3 * 10^{-14}$	0,3187	0,3173
5.	Funkcja 1	0,05	$4 * 10^{-14}$	0,3187	0,3177
6.	Funkcja 2	0,20	$4 * 10^{-15}$	0,8403	0,8411
7.	Funkcja 2	0,10	$4 * 10^{-15}$	0,8216	0,8222
8.	Funkcja 2	0,10	$3 * 10^{-15}$	0,8403	0,8414
9.	Funkcja 2	0,10	$2 * 10^{-15}$	0,8403	0,8420
10.	Funkcja 2	0,10	10^{-15}	0,8403	0,8437
11.	Funkcja 3	0,15	10^{-8}	0,4159	0,4158
12.	Funkcja 3	0,10	10^{-8}	0,4159	0,4158
13.	Funkcja 3	0,10	$1,5 * 10^{-8}$	0,4159	0,4158
14.	Funkcja 3	0,10	$5 * 10^{-9}$	0,4159	0,4156
15.	Funkcja 3	0,15	$3 * 10^{-9}$	0,4159	0,4154
16.	Funkcja 4	0,15	10^{-9}	0,2091	0,2095
17.	Funkcja 4	0,15	$2 * 10^{-9}$	0,2091	0,2093
18.	Funkcja 4	0,15	$5 * 10^{-10}$	0,2091	0,2099
19.	Funkcja 4	0,10	$5 * 10^{-10}$	0,2091	0,2099
20.	Funkcja 4	0,10	0	0,0059	0,0297
21.	Funkcja 5	0,15	$5 * 10^{-10}$	0,1024	0,1017
22.	Funkcja 5	0,15	$3 * 10^{-10}$	0,1024	0,1013
23.	Funkcja 5	0,15	$2 * 10^{-10}$	0,1024	0,1007
24.	Funkcja 5	0,10	$2 * 10^{-10}$	0,1024	0,1007
25.	Funkcja 5	0,10	10^{-10}	0,1024	0,0989
26.	Funkcja 6	0,20	10^{-9}	0,5620	0,5620
27.	Funkcja 6	0,20	$2 * 10^{-10}$	0,5620	0,5617
28.	Funkcja 6	0,20	$3 * 10^{-10}$	0,5620	0,5619
29.	Funkcja 6	0,20	10^{-10}	0,5620	0,5613
30.	Funkcja 6	0,10	10^{-10}	0,5620	0,5613

31.	Funkcja 7	0,10	0,100	0,8541	0,8544
32.	Funkcja 7	0,10	0,050	0,8541	0,8546
33.	Funkcja 7	0,15	0,050	0,8541	0,8546
34.	Funkcja 7	0,15	0,030	0,8541	0,8549
35.	Funkcja 7	0,15	0,015	0,8541	0,8555
36.	Funkcja 8	0,15	0,010	0,8073	0,8074
37.	Funkcja 8	0,10	0,010	0,8073	0,8074
38.	Funkcja 8	0,10	0,005	0,8073	0,8076
39.	Funkcja 8	0,10	0,002	0,8073	0,8079
40.	Funkcja 8	0,10	0,001	0,8073	0,8083
41.	Funkcja 9	0,10	0,0010	$1,2705 * 10^{-14}$	0,0025
42.	Funkcja 9	0,10	0,0015	$1,2803 * 10^{-14}$	0,0016
43.	Funkcja 9	0,01	0,0015	$1,2803 * 10^{-14}$	0,0016
44.	Funkcja 9	0	0,0015	$1,2139 * 10^{-14}$	0,0016
45.	Funkcja 9	0,10	0	$0,0059 * 10^{-14}$	0,0297

Przeprowadzone badania miały na celu sprawdzenie wrażliwości potrójnej kowariancji na różne rodzaje zmienności sygnału. Dla każdej funkcji przeprowadzono 5 symulacji, dla różnych wartości współczynników A i B. Na podstawie wyników symulacji można stwierdzić, że wartość NTC nie zależy od współczynników A. Nawet znaczna zmiana wartości tego współczynnika nie wpływa istotnie na wartość NTC. Symulacje przeprowadzone dla funkcji 9 pokazują, że dla amplitudy stałej bądź zmiennej liniowo wartości NTC są bliskie zeru. NTC przybiera wyższe wartości dla sygnałów, których amplituda zmienia się nieliniowo. Z przeprowadzonych symulacji wynika, że wpływ na wynik NTC ma kształt zmienności. Dzięki normalizacji wartość NTC jest niewrażliwa na wielkości odchyień amplitudy. Dla sygnałów o logarytmicznej i wykładniczej zmienności amplitudy w czasie uzyskano stosunkowo wysokie wartości NTC. Wynika z tego, że metoda ta doskonale nadaje się do wykrywania sygnałów o charakterze przejściowym.

W dotychczasowych opracowaniach na temat diagnostyki łożysk, w widmie prądu poszukiwano składowych o określonych częstotliwościach. Takie podejście zakłada pojawienie się przy uszkodzeniach dodatkowych składowych, których poszukiwano w widmie uśrednionym. Ze względu na charakter przejściowy niektórych składowych diagnostycznych, spowodowanych chwilowymi drganiami, po uśrednieniu widma ich wykrycie staje się utrudnione. W związku z tym, autor niniejszej pracy proponuje metodę, w której idzie o krok dalej, analizując zmienność dodatkowych składowych, przyjmując ją jako wskaźnik diagnostyczny. Stosując NTC możliwe jest wykrycie nieliniowych zmian

w składowych dodatkowych. NTC można zatem potraktować jako miarę nieliniowości. Pozwala to na wykorzystanie innych niż do tej pory symptomów diagnostycznych, takich jak nieliniowe zmiany amplitudy i fazy dodatkowych składowych diagnostycznych. Jest to nowe podejście do diagnostyki łożysk w silnikach indukcyjnych, które w dalszej części pracy zostało zweryfikowane doświadczalnie.

5 BADANIA EKSPERYMENTALNE

W niniejszym rozdziale przedstawione zostaną badania eksperymentalne przeprowadzone przez autora pracy. Na wstępie zaprezentowano algorytm przetwarzania sygnałów opracowany do obliczenia potrójnej kowariancji. W kolejnej części opisano sposób wyboru komponentów, które będą najbardziej przydatne do celów diagnostycznych.

W głównej części rozdziału przedstawiono wyniki badań uszkodzonych łożysk. Do pomiaru prądu silnika indukcyjnego wykorzystano układ pomiarowy, wyposażony w kartę pomiarową o dużej rozdzielczości (24 bity), co umożliwia obserwację nawet niewielkich nieliniowości składowych widma prądu. Dodatkowo, zastosowany układ pomiarowy charakteryzuje się bardzo niskim poziomem szumów własnych (poniżej -120 dB). Własność ta jest niezbędna do pomiaru składowych o niewielkich amplitudach.

Prąd mierzono we wszystkich 3 fazach silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 1,1 kW. Badania zostały zrealizowane przy różnych, celowo wprowadzonych mechanicznych uszkodzeniach w łożyskach. Wszystkie pomiary zostały wykonane na tym samym silniku, co umożliwiło bardziej obiektywne porównanie uzyskanych wyników. Badania przeprowadzono dla 48 łożysk, z czego 24 łożyska były nieuszkodzone.

5.1 STANOWISKO BADAWCZE

W diagnostyce prądowej łożysk układ pomiarowy stanowi kluczowy element. Ze względu na niską wartość amplitud składowych związanych z uszkodzeniami łożysk w stosunku do wartości amplitudy składowej podstawowej prądu silnika, wykrycie składowych uszkodzeniowych jest bardzo trudne. W związku z tym, wymagania stawiane układom pomiarowym są bardzo wysokie.

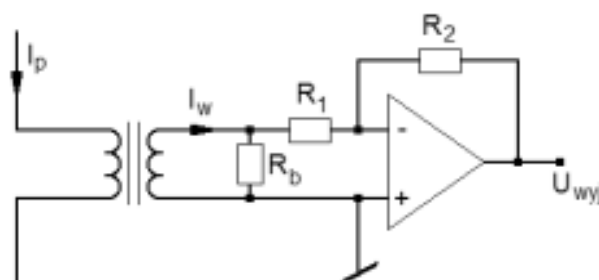
Autorzy wielu publikacji [2] [10] [11] [15] [46] stosują zwykłe przetworniki LEM o niskich parametrach lub w ogóle nie wspominają o zastosowanym przetworniku pomiarowym. Przetworniki typu LEM są stosunkowo niedrogie i powszechnie stosowane w przemyśle. Znajdują zastosowanie szczególnie w układach nie wymagających dużej precyzji. Przetworniki te mają zazwyczaj stosunkowo wysokie szumy własne i nieliniową charakterystykę przetwarzania. Stosowanie tego typu przetworników powoduje duże zniekształcenie sygnałów, zmniejszając tym samym wiarygodność uzyskanych wyników [40]. Zdaniem autora, układy zawierające powyżej opisane przetworniki nie sprawdzają się w diagnostyce łożysk metodami prądowymi, aczkolwiek doskonale spełniają swoje zadanie w układach sterowania.

We wcześniejszych badaniach modelowych i eksperymentalnych przeprowadzonych w zespole autora ustalono następujące wymagania do układu pomiarowego [38]:

- 1) Łączny szum układu nie powinien przekraczać -105 dB przy zakresie mierzonych częstotliwości 20 Hz ÷ 3 kHz, aby zachować odstęp sygnału od szumu 20 dB;
- 2) Częstotliwość sieci zasilającej oraz częstotliwość wirowania wirnika powinna być mierzona z błędem nie większym niż $\pm 0,03$ Hz, przy rozdzielczości widma co najmniej 1/8 Hz, ze względu na to, że w widmie prądu na ogół pojawia się szereg składowych o zbliżonych do siebie częstotliwościach;
- 3) Pomiar prędkości kątowej i częstotliwości sieci powinien być wykonany i uśredniony w tym samym przedziale czasowym, w którym pobrano próbkę sygnału prądu do analizy widmowej;
- 4) Niepewność pomiaru prądu nie powinna być większa niż 10%. Wartości amplitud mierzonych składowych prądu przy pojawieniu się uszkodzeń rosną wielokrotnie. Duża dokładność pomiarów prądu nie jest zatem wymagana.

Pierwszym istotnym elementem układu pomiarowego jest przetwornik analogowo-analogowy, który zapewnia separację galwaniczną pomiędzy obwodem prądowym silnika a obwodami pomiarowymi. Przetwarza on prąd zasilający na sygnał analogowy przekazywany na wejście modułu akwizycji sygnałów pomiarowych. Odpowiednia konstrukcja oraz dobór parametrów elementów przetwornika analogowo-analogowego pozwala zminimalizować jego szумы własne, które mają znaczący wpływ na jakość pomiaru składowych o niewielkich amplitudach związanych z uszkodzeniami łożysk.

W niniejszej pracy do pomiaru prądu zasilającego silnik wykorzystano zatem układ pomiarowy, którego uproszczony schemat przedstawiono na Rys. 5.1. [1] [40]

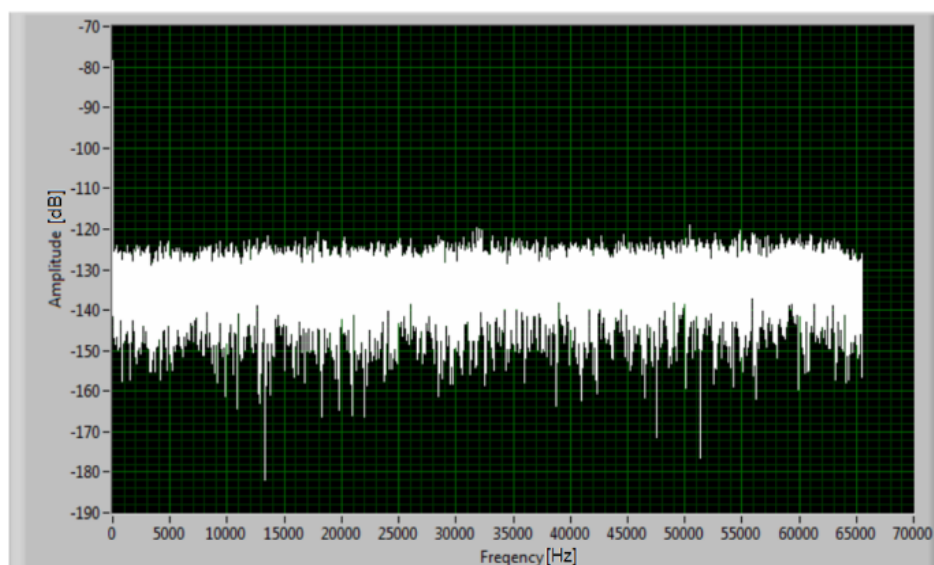


Rys. 5.1. Schemat ideowy zaproponowanego układu pomiarowego [1] [40]

Ideą prezentowanego układu było wykorzystanie możliwie najmniejszej liczby elementów, tak aby uniknąć wprowadzenia dodatkowych szumów własnych do układu. Główne elementy układu to transformator nawinięty na rdzeń ferrytowy oraz wzmacniacz operacyjny o możliwie niskim poziomie szumów własnych. Specjalny rdzeń ferrytowy wysokiej klasy zastosowano w celu uzyskania liniowej charakterystyki przetwarzania. Tak zaprojektowany układ nie wprowadza istotnych zakłóceń do sygnału. W celu odizolowania układu pomiarowego od zakłóceń generowanych przez przetwornice zasilające oraz zakłóceń sieci zasilającej, energia do układu pomiarowego

doprowadzana jest z akumulatorów. W celu odizolowania układu od pól magnetycznych został on zamknięty w ekranującej obudowie [1] [40].

Kolejnym istotnym elementem toru pomiarowego jest przetwornik analogowo – cyfrowy. W wykorzystanym układzie sygnał z przetwornika prądowego podawany jest na 24 bitową kartę akwizycji sygnałów pomiarowych NI 4462 zainstalowaną w kasecie NI PXI. Do obsługi układu pomiarowego wykorzystano specjalne oprogramowanie przygotowane w środowisku LabVIEW. Przykładowe widmo szumów własnych układu pomiarowego przedstawiono na Rys. 5.2.



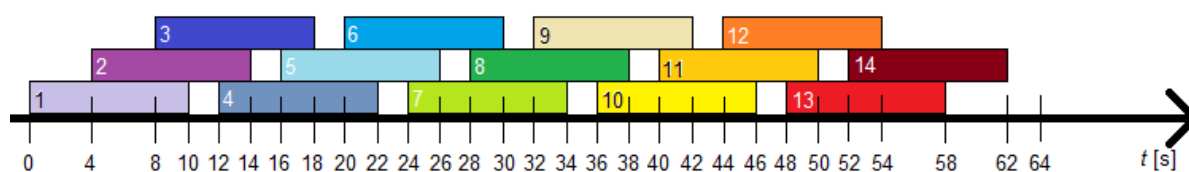
Rys. 5.2. Charakterystyka częstotliwościowa szumów własnych układu pomiarowego [40]

Jak widać na powyższym rysunku (Rys. 5.2) szumy własne układu pomiarowego wraz z kartą akwizycji nie przekraczają poziomu -120 dB. Z punktu widzenia zastosowania przedstawionego układu pomiarowego jest to wartość satysfakcjonująca [40].

5.2 ALGORYTM PRZETWARZANIA SYGNAŁU

Obliczenie NTC wymaga podzielenia sygnału prądu na segmenty czasowe. W celu uzyskania rozdzielczości widma $0,1$ Hz, w proponowanym rozwiązaniu wybrano 10 sekundowy segment czasowy. Zdaniem autora uzyskana rozdzielczość powinna być wystarczająca do identyfikacji składowych, których przy niższej rozdzielczości nie można rozróżnić od szumu pomiarowego.

Czas każdego pomiaru wynosił 64 s, natomiast częstotliwość próbkowania 65536 Hz. Aby uzyskać większą liczbę segmentów czasowych sygnał został podzielony na nakładające się na siebie odcinki. Odcinki zachodzą na siebie w 60% . W ten sposób z pomiaru trwającego 64 s uzyskano 14 dziesięciosekundowych segmentów. Sposób podziału sygnału na segmenty czasowe przedstawiono na Rys. 5.3.



Rys. 5.3. Podział sygnału na segmenty czasowe

Do wyznaczenia częstotliwości charakterystycznych, dla których obliczona zostanie wartość potrójnej kowariancji niezbędna jest informacja o wartości częstotliwości sieci zasilającej oraz częstotliwości obrotowej. Częstotliwość obrotowa zależy od obciążenia i częstotliwości sieci zasilającej. W prezentowanym układzie częstotliwość sieci zasilającej jest wyznaczana na podstawie pomiaru częstotliwości trzeciej harmonicznej prądu, dzięki czemu błąd wyznaczania jest trzykrotnie mniejszy w porównaniu do wyznaczania częstotliwości na podstawie podstawowej harmonicznej. Częstotliwość obrotowa silnika wyznaczana jest na podstawie składowych w paśmie częstotliwości żłobkowych i znajomości parametrów konstrukcyjnych silnika. Częstotliwość żłobkowa f_z związana jest z poślizgiem s zależnością [37] [3]:

$$f_z = f_s + 50 \frac{h \cdot NR \cdot (1 - s)}{p} \quad (5.1)$$

gdzie:

f_s – aktualna częstotliwość sieci zasilającej,

h – poziom pasma występowania częstotliwości f_z ,

NR – liczba żłobków wirnika,

s – poślizg,

p – liczba par biegunów.

Dla badanego silnika, parametry stałe wynoszą odpowiednio:

$$NR = 22, p = 2, h = 2.$$

W badanym silniku częstotliwość żłobkowa wynosi około 1100 Hz i zależy od aktualnej prędkości kątowej silnika. W prezentowanym rozwiązaniu jako częstotliwość f_z przyjęto składową o najwyższej amplitudzie w przedziale 1000 – 1150 Hz.

Na podstawie częstotliwości żłobkowej i częstotliwości sieciowej wyznaczony zostaje poślizg, który umożliwia jednoznaczne określenie częstotliwości obrotowej. Poślizg dany jest wzorem:



$$s = \frac{f_w - f_r}{f_w} \quad (5.2)$$

gdzie:

f_w – częstotliwość wirowania pola magnetycznego $f_w = \frac{f_s}{p}$,

f_s – częstotliwość sieci zasilającej,

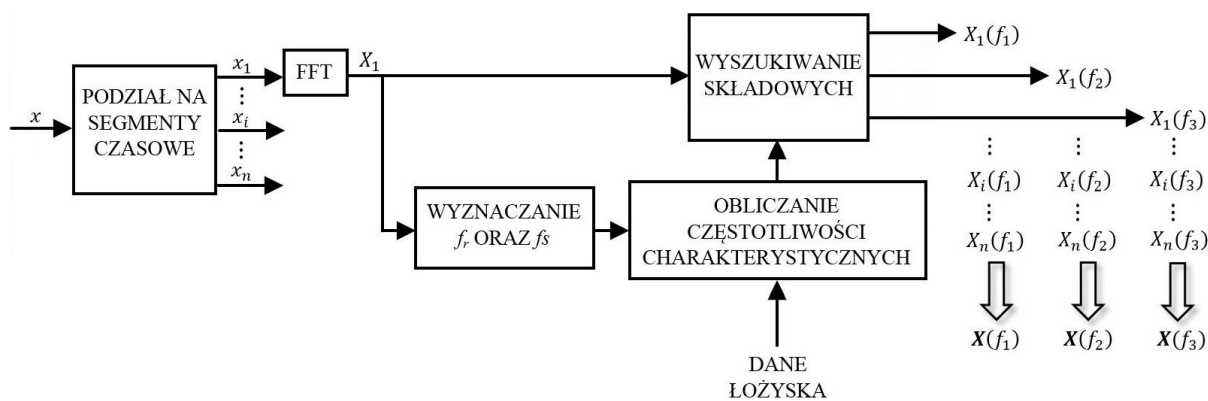
f_r – częstotliwość obrotowa.

Wartość częstotliwości obrotowej, częstotliwość sieci zasilającej oraz dokładne parametry geometrii łożyska posłużyły do obliczania częstotliwości charakterystycznych. Częstotliwości te są różne w zależności od rodzaju poszukiwanego uszkodzenia. Zależności opisujące częstotliwości składowych wykorzystanych do badań zamieszczono w tabeli 5.1.

Dla każdego segmentu czasowego przebiegu, w trakcie przetwarzania sygnału obliczane są częstotliwości f_1 , f_2 i f_3 , które posłużą do obliczenia potrójnej kowariancji. Szczegółowy wybór komponentów został opisany w kolejnym podrozdziale. Wartość każdej z 3 częstotliwości dla każdego segmentu obliczona zostaje zgodnie z odpowiednimi zależnościami z tabeli 5.1. Następnie wynik zaokrąglany jest do części dziesiętnych ze względu na rozdzielczość widma. Dla uzyskanej w ten sposób wartości częstotliwości z widma uzyskanego z pomiarów wybierane są w jej otoczeniu dwa sąsiednie prążki w widmie: jeden z prawej, drugi z lewej strony. Spośród tych trzech prążków wyznaczany jest prążek o największej amplitudzie.

W rezultacie dla każdego segmentu czasowego otrzymano 3 wartości: amplitudę zespoloną dla częstotliwości f_1 , f_2 i f_3 . Częstotliwości f_1 , f_2 i f_3 mogą zmieniać się w czasie. W efekcie ich wartości mogą się różnić w poszczególnych segmentach czasowych, jednak różnice te powinny być niewielkie, ponieważ pomiary były przeprowadzane w stanie ustalonym, przy stałym obciążeniu. Z uwagi na to, że prędkość obrotowa oraz częstotliwość sieciowa są wyznaczone w każdym segmencie osobno przyjęto, że ich zmiany w czasie pomiaru nie mają wpływu na wyniki NTC. Wartości współczynników szeregu Fouriera dla częstotliwości f_1 , f_2 i f_3 dla poszczególnych segmentów czasowych tworzą 3 wektory. Zgodnie ze wzorem (4.2) są to wektory: $\mathbf{X}(f_1)$, $\mathbf{X}(f_2)$, $\mathbf{X}(f_3)$. Otrzymane wyniki są podstawą do obliczenia potrójnej kowariancji zgodnie ze wzorem (4.2). Kowariancja wyznaczana jest dla każdej fazy prądu silnika według opisanej powyżej procedury. Wartość NTC stanowi średnia arytmetyczna kowariancji z każdej fazy.

Poniżej przedstawiono schemat blokowy opisanego w tym rozdziale algorytmu przetwarzania sygnału (Rys. 5.4.). Rezultatem działania prezentowanego algorytmu są dane niezbędne do obliczenia wartości NTC. Są to wektory $\mathbf{X}(f_1)$, $\mathbf{X}(f_2)$, $\mathbf{X}(f_3)$, które zgodnie ze wzorem (4.2) stanowią współczynniki szeregu Fouriera z sygnału x dla wszystkich segmentów czasowych dla częstotliwości f_1 , f_2 , f_3 .



Rys. 5.4. Schemat blokowy algorytmu przetwarzania sygnału

5.3 WYBÓR KOMPONENTÓW

Badania przeprowadzone wcześniej przez członków zespołu autora pozwoliły określić, które dodatkowe składowe w widmie prądu mają największy związek z uszkodzeniami łożysk [38] [39]. Te dodatkowe składowe prądu, najbardziej wrażliwe na uszkodzenia łożysk zostały zestawione w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Częstotliwości składowych prądu silnika związane z uszkodzeniami łożysk [38] [39]

Numer składowej	Częstotliwość składowej
1.	$f_s + f_{def}$
2.	$ f_s - f_{def} $
3.	$3 \cdot f_s + f_{def}$
4.	$ 3 \cdot f_s - f_{def} $
5.	$5 \cdot f_s + f_{def}$
6.	$ 5 \cdot f_s - f_{def} $
7.	$ f_s - f_r + f_{def} $
8.	$ f_s - f_r - f_{def} $
9.	$f_s + f_r + f_{def}$
10.	$ f_s + f_r - f_{def} $
11.	$ f_s - 2 \cdot f_r + f_{def} $
12.	$ f_s - 2 \cdot f_r - f_{def} $
13.	$f_s + 2 \cdot f_r + f_{def}$
14.	$ f_s + 2 \cdot f_r - f_{def} $
15.	$ f_s - 3 \cdot f_r + f_{def}$
16.	$ f_s - 3 \cdot f_r - f_{def} $
17.	$f_s + 3 \cdot f_r + f_{def}$

18.	$ f_s+3\cdot f_r-f_{def} $
19.	$ 3\cdot f_s-f_r+f_{def} $
20.	$ 3\cdot f_s-f_r-f_{def} $
21.	$3\cdot f_s+f_r+f_{def}$
22.	$ 3\cdot f_s+f_r-f_{def} $
23.	$ 3\cdot f_s-2\cdot f_r+f_{def} $
24.	$ 3\cdot f_s-2\cdot f_r-f_{def} $
25.	$3\cdot f_s+2\cdot f_r+f_{def}$
26.	$ 3\cdot f_s+2\cdot f_r-f_{def} $
27.	$ 5\cdot f_s-f_r+f_{def} $
28.	$ 5\cdot f_s-f_r-f_{def} $
29.	$5\cdot f_s+f_r+f_{def}$
30.	$ 5\cdot f_s+f_r-f_{def} $
31.	$ 5\cdot f_s-2\cdot f_r+f_{def} $
32.	$ 5\cdot f_s-2\cdot f_r-f_{def} $

gdzie:

f_s – częstotliwość sieci zasilającej;

f_r – częstotliwość obrotowa;

f_{def} – częstotliwość wibracji związana z uszkodzeniem danego elementu łożyska.

Częstotliwość f_{def} określa się w zależności od poszukiwanego uszkodzenia jako częstotliwość elementów tocznych, częstotliwość bieżni zewnętrznej lub częstotliwość bieżni wewnętrznej (wzory 3.1, 3.3, 3.4).

Dotychczasowe badania nie pozwoliły jednak stwierdzić które z przedstawionych składowych są najbardziej wrażliwe na uszkodzenia łożysk. Zastosowany algorytm wymaga użycia tylko trzech składowych, dlatego ich wybór jest szczególnie ważny z punktu widzenia separacji pomiędzy przypadkami uszkodzonymi i nieuszkodzonymi. W związku z tym do wyboru zestawu trzech komponentów do obliczenia NTC została przygotowana odpowiednia procedura oparta o kryterium Fishera.

Rozważając 32 składowe i uwzględniając fakt, że zamiana miejscami pierwszego składnika z drugim nie ma wpływu na wartość NTC można uzyskać 14880 różnych kombinacji 3 spośród 32 komponentów. Spośród wszystkich kombinacji należy wybrać tę, która pozwoli uzyskać najlepsze rezultaty dla metody potrójnej kowariancji, a tym samym będzie najbardziej użyteczna do celów

diagnostycznych. Jako najlepszą możliwą kombinację składowych przyjęto tę, która osiągnie najwyższą wartość według kryterium Fishera danego wzorem 5.3:

$$F = \frac{|m_1 - m_2|^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (5.3)$$

gdzie:

m_1 – wartość średnia NTC dla przypadków nieuszkodzonych;

m_2 – wartość średnia NTC dla przypadków uszkodzonych;

σ_1^2 – wariancja NTC dla przypadków nieuszkodzonych;

σ_2^2 – wariancja NTC dla przypadków uszkodzonych;

Kryterium Fishera określa jakość separacji między przypadkami uszkodzonymi a nieuszkodzonymi. Wartość kryterium będzie tym wyższa, im większa będzie różnica między wartością średnią NTC dla przypadków uszkodzonych i dla przypadków nieuszkodzonych. Wartość kryterium Fishera będzie tym niższa, im większe będzie odchylenie standardowe wartości NTC dla danej klasy łożysk (nieuszkodzonych lub uszkodzonych).

Aby wyłonić zestaw składowych diagnostycznych który będzie możliwie najefektywniejszy do zastosowania przy użyciu metody potrójnej kowariancji przeprowadzono następujące kroki: obliczono NTC dla wszystkich możliwych kombinacji 3 spośród 32 składowych dla wszystkich wykonanych pomiarów prądu. Następnie dla danego uszkodzenia przy określonym obciążeniu, spośród wszystkich łożysk uszkodzonych i nieuszkodzonych należało wybrać część łożysk, które posłużą do wyboru diagnostycznych składowych widma. W zestawie łożysk przyjętym do wyboru komponentów muszą znajdować się zarówno łożyska uszkodzone jak i nieuszkodzone. Dla danego zestawu łożysk obliczono wartość kryterium Fishera (5.3) dla wszystkich możliwych 14 880 kombinacji. W kolejnym kroku spośród 14 880 kombinacji wybrano 5 kombinacji dla których wartość kryterium była najwyższa. Suma pięciu kowariancji dla tych pięciu kombinacji służy jako wskaźnik diagnostyczny (WD) do oceny stanu pozostałych łożysk, które nie zostały wykorzystane do wyboru komponentów.

W niniejszej pracy założono, że najlepsza kombinacja składowych może się zmieniać w zależności od obciążenia, ponieważ częstotliwość składowych związanych z uszkodzeniami łożysk zmienia się wraz ze zmianą prędkości obrotowej, co może powodować nakładanie się tych składowych na inne składowe prądu silnika nie związane z uszkodzeniami.

5.4 WYNIKI BADAŃ

Przeprowadzone badania obejmowały 48 łożysk w tym 24 łożyska nieuszkodzone. Lista łożysk celowo uszkodzonych znajduje się w tabeli 5.2., wraz z rodzajem i głębokością wprowadzonego uszkodzenia.

Dla wszystkich badanych łożysk przeprowadzono pomiary przy pomocy systemu diagnostyki wibracyjnej DREAM. Niektóre z łożysk zarówno uszkodzonych jak i nieuszkodzonych, należało odrzucić z dalszych rozważań ze względu na rozbieżności między wprowadzonym uszkodzeniem a diagnozą systemem DREAM. W sytuacji gdy dla nowego łożyska wyniki systemu DREAM wykazywały uszkodzenie lub dla łożyska z wprowadzonym uszkodzeniem system DREAM nie wykazywał uszkodzenia, łożysko to nie było brane pod uwagę w dalszych badaniach. Po wykluczeniu trzech uszkodzonych łożysk ustalono numerację łożysk zgodnie z tabelą 5.2. Spośród łożysk nieuszkodzonych również wyeliminowano 3 łożyska, dla których system DREAM wykazał uszkodzenia. łożyskom nieuszkodzonym nadano numery od 22 do 42.

Pomiary prądu dla silników zarówno z łożyskami uszkodzonymi jak i nieuszkodzonymi zostały wykonane przy zasilaniu sieciowym dla ośmiu stopni obciążenia: 1,1 kW, 1,0 kW, 0,9 kW, 0,8 kW, 0,7 kW, 0,6 kW, 0,5 kW oraz dla biegu jałowego z mechanicznie odłączonym obciążeniem około 0,2 kW.

W dalszej części pracy przedstawiono badania eksperymentalne z podziałem na rodzaje uszkodzeń. Rozpatrując określony typ uszkodzenia, np. uszkodzenie bieżni zewnętrznej, łożyska posiadające inny typ uszkodzenia niż poszukiwane są traktowane jako łożyska nieuszkodzone. Dla każdego rodzaju uszkodzenia i dla każdego stopnia obciążenia przeprowadzono pięciokrotnie procedurę wyboru komponentów opisaną w rozdziale 5.3 dla pięciu różnych zestawów łożysk.

Wynik wyboru komponentów jest zależny od wyboru zestawu łożysk, służących do wyznaczenia wskaźnika diagnostycznego. Ze względu na brak wiedzy o tym, które z łożysk biorących udział w eksperymencie są najbardziej reprezentatywne dla danej grupy (uszkodzone/nieuszkodzone), do wyboru wskaźnika diagnostycznego autor posłużył się wylosowanymi zestawami łożysk. Aby możliwa była weryfikacja wyznaczonego wskaźnika diagnostycznego, za każdym razem do wykonania procedury wyboru komponentów wykorzystano 50% łożysk uszkodzonych oraz 50% łożysk nieuszkodzonych. Pozostałe 50% łożysk służy do sprawdzenia trafności danego wskaźnika diagnostycznego. Rezultaty badań zaprezentowano na wykresach oraz zestawiono w tabelach. Na osi poziomej wykresu zaznaczono numery kolejnych łożysk, natomiast na osi pionowej wartość wskaźnika diagnostycznego WD, będącego sumą pięciu kowariancji. Informacja jaki WD znajduje się na danym wykresie, została umieszczona w opisie osi pionowej. Przy każdej kowariancji podano numery trzech składowych, które zostały wybrane za pomocą opisaną w rozdziale 5.3 procedury,

np. NTC(2, 14, 22) oznacza wartość potrójnej kowariancji dla składowych nr 2, 14 i 22 z tabeli 5.1. Na wykresach umieszczono wyniki zarówno dla łożysk, które wylosowano do procedury wyboru komponentów jak i wyniki dla pozostałych łożysk, których nie brano pod uwagę przy wyznaczaniu WD.

Tabela 5.2. Lista łożysk z wprowadzonymi uszkodzeniami

Numer łożyska	Wprowadzone uszkodzenia	Średnica	Głębokość	Szerokość	Długość
Pierścień zewnętrzny					
1	Punktowy wżer mała głębokość	1mm	0,5 mm		
2	Punktowy wżer średnia głębokość	1,5mm	0,7 mm		
3	Punktowy wżer duża głębokość	2,0mm	1,0 mm		
4	Rysa wzdłuż kierunku toczenia dł. 3 mm mała głębokość		0,5 mm	1 mm	3 mm
5	Rysa wzdłuż kierunku toczenia dł. 3 mm średnia głębokość		0,7 mm	1 mm	3 mm
6	Rysa wzdłuż kierunku toczenia dł. 3 mm duża głębokość		1,0 mm	1 mm	3 mm
	Rysa wzdłuż kierunku toczenia dł. 6 mm mała głębokość		0,5 mm	1 mm	6 mm
7	Rysa wzdłuż kierunku toczenia dł. 6 mm średnia głębokość		0,7 mm	1 mm	6 mm
	Rysa wzdłuż kierunku toczenia dł. 6 mm duża głębokość		1,0 mm	1 mm	6 mm
8	Rysa w poprzek kierunku toczenia dł. 3mm mała głębokość		0,5 mm	1 mm	3 mm
9	Rysa w poprzek kierunku toczenia dł. 3mm średnia głębokość		0,7 mm	1 mm	3 mm
10	Rysa w poprzek kierunku toczenia dł. 3mm duża głębokość		1,0 mm	1 mm	3 mm
Pierścień wewnętrzny.					
11	Punktowy wżer mała głębokość	1mm	0,5 mm		
12	Punktowy wżer średnia głębokość	1,5mm	0,7 mm		
13	Punktowy wżer duża głębokość	2,0mm	1,0 mm		
14	Rysa w poprzek kierunku toczenia dł. 3mm mała głębokość		0,5 mm	1 mm	3 mm
15	Rysa w poprzek kierunku toczenia dł. 3mm średnia głębokość		0,7 mm	1 mm	3 mm
16	Rysa w poprzek kierunku toczenia dł. 3mm duża głębokość		1,0 mm	1 mm	3 mm
Kulka					
17	Punktowy wżer mała głębokość	1mm	0,5 mm		
18	Punktowy wżer średnia głębokość	1,5mm	0,7 mm		
	Punktowy wżer duża głębokość	2,0mm	1,0 mm		
19	Zeszlifowane spłaszczenie mała głębokość.		0,5 mm		
20	Zeszlifowane spłaszczenie średnia głębokość.		0,7 mm		
21	Zeszlifowane spłaszczenie duża głębokość.		1,0 mm		

Do prezentacji danych na wykresach zastosowano następujące oznaczenia:

- czerwone krzyżyki – łożyska uszkodzone;
- niebieskie okręgi – łożyska nieuszkodzone;
- czarna pozioma prosta – granica pomiędzy łożyskami uszkodzonymi a nieuszkodzonymi, dana wzorem:

$$\frac{\frac{1}{i}\sum W D_u + \frac{1}{j}\sum W D_{nu}}{2} \quad (5.4)$$

gdzie:

$\frac{1}{i}\sum W D_u$ – średnia wartości wskaźnika diagnostycznego dla łożysk uszkodzonych

$\frac{1}{j}\sum W D_{nu}$ – średnia wartości wskaźnika diagnostycznego dla łożysk nieuszkodzonych

5.4.1 USZKODZENIA BIEŻNI ZEWNĘTRZNEJ

Zgodnie z tabelą 5.2. do badania uszkodzeń bieżni zewnętrznej przygotowano 10 łożysk z celowo wprowadzonymi uszkodzeniami, ponumerowanych od 1 do 10 oraz 32 łożyska nieuszkodzone, ponumerowane od 11 do 42. Przyjmując zasadę, że do wyboru WD można użyć 50% łożysk uszkodzonych i 50% łożysk nieuszkodzonych, w tym wypadku istnieje $10!/(5! \cdot (10-5)!)=252$ możliwości wylosowania różnych zestawów łożysk uszkodzonych oraz $32!/(16! \cdot (32-16)!)=601080390$ możliwości wylosowania różnych zestawów łożysk nieuszkodzonych. Stąd możliwe jest wylosowanie $252 \cdot 601080390=151472258280$ różnych zestawów łożysk do wyboru WD. Ze względu na tak dużą liczbę możliwych kombinacji, autor przeprowadził procedurę wyboru komponentów jedynie pięciokrotnie dla każdego obciążenia. W dalszej części przedstawiono i opisano jeden przykładowy wykres wskaźnika diagnostycznego. Wyniki uzyskane na podstawie kolejnych zestawów zamieszczono w tabeli 5.3. Pozostałe wykresy wskaźników diagnostycznych, do badania uszkodzeń bieżni zewnętrznej, wybranych zgodnie z procedurą przedstawioną w rozdziale 5.3., ze względu na dużą objętość zostały przeniesione do załącznika A.

Uwzględniając częstotliwości składowych z tabeli 5.1. przyjęto, że $f_{def} = f_{out}$. Wartość kryterium Fishera obliczona została dla wszystkich łożysk, łącznie z łożyskami biorącymi udział w procedurze wyboru komponentów.

Poniżej przedstawiono rezultaty uzyskane dla jednego wylosowanego zestawu łożysk przy obciążeniu 1,1 kW:

Zestaw 1. Do wyboru WD

Poniżej umieszczono numery łożysk wylosowanych do wyboru WD:

Numery łożysk uszkodzonych: 1, 7, 6, 2, 9

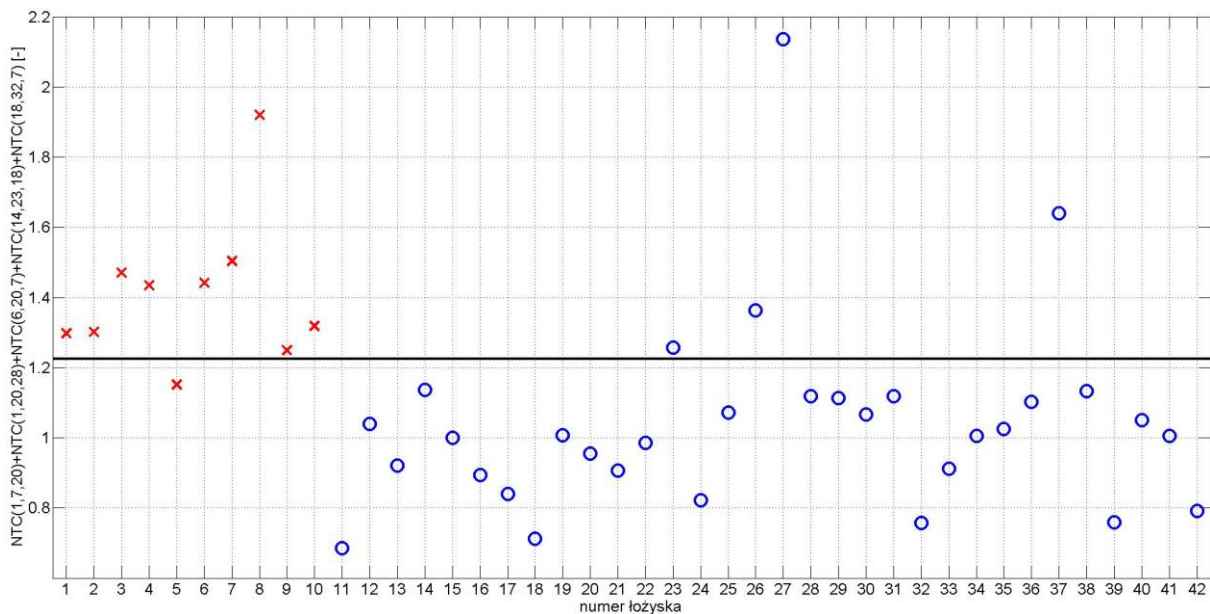
Numery łożysk nieuszkodzonych: 28, 39, 21, 14, 13, 23, 40, 12, 19, 41, 36, 18, 22, 33, 17, 15

Kryterium Fishera $F=1,12$

Pozostałe łożyska, których nie wykorzystano do procedury wyboru WD:

Numery łożysk uszkodzonych: 3, 4, 5, 8, 10

Numery łożysk nieuszkodzonych: 11, 16, 20, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 37, 38, 42



Rys. 5.5. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 1,1 kW

Na podstawie Rys. 5.5. można stwierdzić, że spośród łożysk nie znajdujących się w zestawie do wyboru WD, 4 z 5 łożysk uszkodzonych o numerach: 3, 4, 8, 10 zostały poprawnie zdiagnozowane, co daje 80% trafności diagnoz. W przypadku łożysk nieuszkodzonych poprawnie zdiagnozowanych zostało 13 spośród 16 łożysk, o numerach: 11, 16, 20, 24, 25, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 38, 42, co daje 81% trafności. Należy zauważyć, że wśród łożysk należących do zestawu do wyboru WD, wartość WD dla łożyska z numerem 23 jest wyższa niż wartość granicy oddzielającej łożyska uszkodzone od nieuszkodzonych. Ze względu na to, że łożysko 23 znajduje się w zestawie do wyboru WD, nie jest ono diagnozowane. Gdyby łożysko to poddano diagnozie przy pomocy rozpatrywanego WD, wynik diagnozy byłby niepoprawny.

Wskaźnik diagnostyczny dla tego przypadku to suma następujących kowariancji:

$$NTC(1,7,20)+NTC(1,20,28)+NTC(6,20,7)+NTC(14,23,18)+NTC(18,32,7)$$

Trafność diagnoz dla łożysk spoza zestawu do wyboru WD wynosi: $17/21 = 81\%$

Tabela 5.3. Zestawienie uzyskanych wyników dla badania uszkodzeń bieźni zewnętrznej

Obciążenie silnika [kW]	Numer zestawu	Numery łożysk wylosowanych do wyboru WD		Wartość Kryterium Fishera	Trafność diagnoz dla łożysk uszkodzonych	Trafność diagnoz dla łożysk nieuszkodzonych	Wskaźnik diagnostyczny	Trafność dla łożysk spoza zestawu do wyboru WD	Numer rysunku
		łożyska uszkodzone	łożyska nieuszkodzone						
1,1	1.	1, 7, 6, 2, 9	28, 39, 21, 14, 13, 23, 40, 12, 19, 41, 36, 18, 22, 33, 17, 15	1,12	4/5 80%	13/16 81%	NTC(1,7,20)+NTC(1,20,28)+NTC(6,20,7)+ NTC(14,23,18)+NTC(18,32,7)	17/21 81%	5.5.
	2.	5, 7, 10, 8, 1	32, 13, 29, 38, 28, 30, 40, 39, 21, 17, 26, 14, 37, 23, 42, 19	1,11	4/5 80%	12/16 75%	NTC(3,18,19)+NTC(4,16,29)+NTC(6,20,7)+ NTC(7,17,21)+NTC(14,22,10)	16/21 76%	A.1.
	3.	8, 10, 4, 9, 2	38, 34, 25, 40, 12, 20, 18, 32, 37, 22, 16, 39, 30, 31, 28, 11	1,68	3/5 60%	12/16 75%	NTC(4,11,10)+NTC(6,20,7)+NTC(7,16,6)+ NTC(14,16,17)+NTC(16,20,14)	15/21 71%	A.2.
	4.	4, 1, 8, 2, 10	26, 27, 16, 24, 39, 30, 41, 37, 21, 12, 29, 42, 19, 25, 32, 38	1,56	2/5 40%	15/16 94%	NTC(2,31,23)+NTC(4,16,29)+NTC(6,20,7)+ NTC(7,16,6)+NTC(7,17,4)	17/21 81%	A.3.
	5.	10, 4, 8, 9, 7	14, 36, 24, 23, 22, 13, 15, 42, 26, 18, 40, 20, 32, 33, 30, 31	1,41	3/5 60%	10/16 63%	NTC(4,16,9)+NTC(5,10,14)+NTC(5,20,7)+ NTC(6,20,7)+NTC(26,27,18)	13/21 62%	A.4.
1,0	1.	7, 2, 3, 4, 5	30, 18, 13, 21, 20, 26, 40, 28, 41, 39, 17, 42, 25, 35, 34, 24	0,83	4/5 80%	12/16 75%	NTC(2,4,25)+NTC(3,19,31)+NTC(9,17,1)+ NTC(9,22,31)+NTC(9,26,1)	16/21 76%	A.5.
	2.	5, 2, 8, 10, 3	28, 13, 20, 29, 42, 11, 40, 32, 33, 16, 23, 35, 30, 38, 18, 41	1,07	2/5 40%	12/16 75%	NTC(2,4,25)+NTC(12,16,27)+NTC(14,29,15)+ NTC(15,21,17)+NTC(18,27,8)	14/21 67%	A.6.



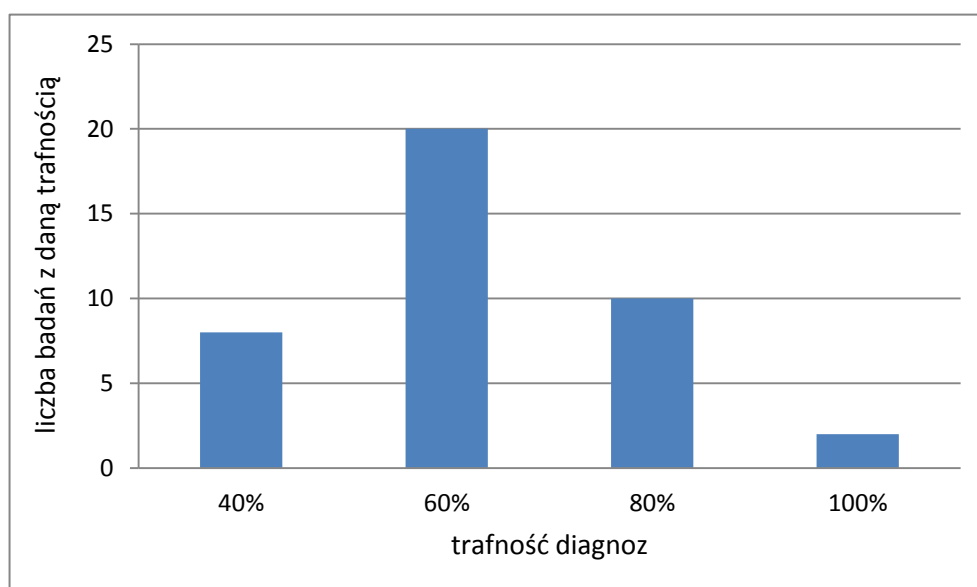
	3.	10, 5, 9, 6, 7	37, 12, 14, 35, 29, 30, 23, 26, 28, 18, 13, 21, 38, 39, 20, 22	1,25	3/5 60%	13/16 81%	NTC(4,17,16)+NTC(4,22,21)+NTC(16,27,9)+ NTC(21,28,14)+NTC(21,31,32)	16/21 76%	A.7.
	4.	4, 9, 5, 10, 6	12, 35, 21, 11, 32, 27, 16, 40, 26, 25, 13, 24, 20, 19, 14, 33	0,62	2/5 40%	14/16 88%	NTC(5,14,12)+NTC(9,16,31)+NTC(15,16,31)+ NTC(15,18,16)+NTC(16,32,15)	16/21 76%	A.8.
	5.	10, 9, 3, 7, 2	34, 16, 30, 12, 36, 38, 19, 40, 13, 23, 33, 17, 11, 24, 29, 35	1,08	3/5 60%	11/16 69%	NTC(1,21,17)+NTC(3,18,32)+NTC(6,31,22)+ NTC(16,26,21)+NTC(16,31,18)	14/21 67%	A.9.
0,9	1.	7, 4, 5, 2, 6	15, 37, 16, 11, 41, 32, 24, 14, 12, 17, 30, 18, 25, 31, 26, 28	2,17	4/5 80%	13/16 81%	NTC(5,21,23)+NTC(5,32,1)+NTC(12,28,32)+ NTC(13,32,20)+NTC(20,32,1)	17/21 81%	A.10.
	2.	9, 4, 5, 2, 6	38, 25, 21, 17, 31, 16, 12, 29, 40, 37, 19, 33, 14, 11, 41, 28	1,03	3/5 60%	12/16 75%	NTC(5,21,23)+NTC(5,32,1)+NTC(6,11,23)+ NTC(6,30,9)+NTC(7,23,1)	15/21 71%	A.11.
	3.	7, 2, 3, 6, 4	12, 26, 34, 13, 25, 29, 36, 16, 19, 30, 40, 18, 24, 32, 35, 17	1,50	3/5 60%	12/16 75%	NTC(1,25,32)+NTC(5,32,1)+NTC(9,16,27)+ NTC(12,28,32)+NTC(13,32,20)	15/21 71%	A.12.
	4.	3, 5, 4, 7, 6	35, 30, 26, 29, 17, 12, 37, 18, 34, 21, 25, 28, 16, 39, 11, 31	2,08	2/5 40%	13/16 81%	NTC(1,32,20)+NTC(5,32,1)+NTC(7,13,32)+ NTC(12,28,32)+NTC(22,29,28)	15/21 71%	A.13.
	5.	3, 7, 4, 6, 10	20, 14, 12, 21, 25, 29, 37, 16, 26, 34, 11, 13, 35, 19, 15, 31	2,03	3/5 60%	12/16 75%	NTC(1,32,20)+NTC(5,32,1)+NTC(6,19,27)+ NTC(7,13,32)+NTC(13,32,20)	15/21 71%	A.14.
0,8	1.	5, 1, 7, 8, 6	33, 17, 40, 25, 24, 31, 30, 23, 20, 29, 41, 39, 22, 11, 28, 37	1,87	3/5 60%	12/16 75%	NTC(5,19,28)+NTC(6,26,28)+NTC(6,28,11)+ NTC(12,27,17)+NTC(14,28,32)	15/21 71%	A.15.
	2.	9, 4, 3, 5, 2	17, 14, 32, 42, 29, 41, 16, 22, 38, 34, 21, 25, 28, 35, 40, 11	1,53	3/5 60%	13/16 81%	NTC(6,27,18)+NTC(6,28,11)+NTC(9,25,19)+ NTC(11,19,8)+NTC(20,24,7)	16/21 76%	A.16.
	3.	4, 9, 2, 8, 6	42, 29, 11, 33, 37, 24, 27, 20, 12, 13, 16, 35, 19, 18, 23, 17	1,90	2/5 40%	14/16 88%	NTC(1,7,4)+NTC(5,11,24)+NTC(13,28,11)+ NTC(19,21,25)+NTC(20,26,28)	16/21 76%	A.17.
	4.	2, 4, 1, 8, 6	15, 33, 36, 26, 17, 29, 28, 38, 21, 14, 42, 19, 18, 12, 11, 31	2,12	4/5 80%	15/16 94%	NTC(1,6,16)+NTC(5,16,20)+NTC(6,28,11)+ NTC(7,32,29)+NTC(19,21,25)	19/21 90%	A.18.
	5.	2, 5, 4, 9, 3	24, 28, 18, 30, 32, 12, 39, 25, 36, 14, 15, 27, 22, 20, 26, 31	1,31	3/5 60%	12/16 75%	NTC(1,30,8)+NTC(5,11,24)+NTC(5,24,11)+ NTC(13,16,2)+NTC(20,24,32)	15/21 71%	A.19.
0,7	1.	5, 7, 4, 2, 10	12, 11, 27, 31, 41, 36, 19, 22, 18,	1,45	2/5	14/16	NTC(3,32,20)+NTC(6,23,21)+NTC(8,30,19)+	16/21	A.20.

			37, 16, 42, 23, 29, 33, 20		40%	88%	NTC(16,21,14)+NTC(16,30,19)	76%	
	2.	5, 6, 8, 4, 7	13, 25, 11, 12, 40, 42, 37, 22, 16, 14, 17, 27, 28, 18, 23, 39	1,80	3/5 60%	15/16 94%	NTC(7,18,19)+NTC(7,27,24)+NTC(11,13,2)+ NTC(11,17,26)+NTC(16,23,14)	18/21 86%	A.21.
	3.	4, 6, 9, 7, 2	14, 34, 30, 32, 15, 31, 17, 24, 25, 28, 37, 20, 39, 19, 23, 29	1,04	3/5 60%	13/16 81%	NTC(2,18,10)+NTC(3,11,8)+NTC(13,16,25)+ NTC(15,25,22)+NTC(21,28,23)	16/21 76%	A.22.
	4.	7, 2, 8, 1, 6	18, 22, 39, 13, 36, 14, 35, 41, 33, 20, 25, 24, 21, 34, 40, 38	1,17	3/5 60%	14/16 88%	NTC(1,19,18)+NTC(2,18,10)+NTC(7,10,14)+ NTC(18,22,19)+NTC(20,32,30)	17/21 81%	A.23.
	5.	4, 3, 8, 9, 7	23, 42, 15, 19, 37, 41, 35, 31, 13, 29, 26, 21, 36, 25, 14, 24	1,01	3/5 60%	14/16 88%	NTC(2,18,10)+NTC(3,30,19)+NTC(10,14,25)+ NTC(19,26,14)+NTC(30,31,19)	17/21 81%	A.24.
0,6	1.	4, 2, 7, 10, 5	31, 21, 37, 18, 13, 38, 14, 29, 17, 42, 35, 36, 39, 40, 32, 30	1,44	3/5 60%	12/16 75%	NTC(2,9,21)+NTC(3,23,9)+NTC(3,26,28)+ NTC(6,10,11)+NTC(19,20,5)	15/21 71%	A.25.
	2.	1, 7, 4, 2, 3	30, 40, 23, 19, 13, 21, 25, 26, 32, 17, 20, 36, 22, 29, 42, 33	1,58	3/5 60%	11/16 69%	NTC(3,23,9)+NTC(3,25,20)+NTC(6,30,20)+ NTC(8,25,9)+NTC(17,26,25)	14/21 67%	A.26.
	3.	9, 6, 7, 2, 4	23, 29, 16, 36, 42, 35, 37, 15, 32, 38, 18, 26, 12, 17, 21, 20	1,39	3/5 60%	12/16 75%	NTC(5,18,20)+NTC(15,28,16)+NTC(15,32,22)+ NTC(17,18,22)+NTC(21,26,20)	15/21 71%	A.27.
	4.	4, 3, 10, 8, 9	25, 32, 38, 29, 19, 33, 13, 40, 27, 35, 20, 14, 22, 16, 23, 37	2,09	4/5 80%	11/16 69%	NTC(3,19,20)+NTC(3,23,9)+NTC(10,15,24)+ NTC(17,20,26)+NTC(17,29,13)	15/21 71%	A.28.
	5.	2, 6, 7, 8, 10	28, 17, 15, 34, 23, 31, 35, 42, 11, 27, 30, 26, 39, 33, 38, 25	2,11	2/5 40%	15/16 94%	NTC(3,17,8)+NTC(3,22,4)+NTC(6,12,9)+ NTC(8,24,30)+NTC(10,32,24)	17/21 81%	A.29.
0,5	1.	2, 5, 8, 7, 4	41, 23, 13, 12, 18, 26, 29, 14, 34, 20, 21, 38, 25, 36, 31, 32	3,32	4/5 80%	12/16 75%	NTC(5,16,13)+NTC(15,18,31)+NTC(18,20,25)+ NTC(26,31,4)+NTC(26,31,12)	16/21 76%	A.30.
	2.	3, 8, 10, 5, 1	29, 16, 20, 33, 24, 39, 30, 15, 19, 32, 17, 38, 14, 34, 18, 12	1,64	2/5 40%	14/16 88%	NTC(2,5,6)+NTC(3,9,31)+NTC(9,26,3)+ NTC(13,16,27)+NTC(26,31,12)	16/21 76%	A.31.
	3.	7, 2, 4, 6, 8	35, 34, 41, 20, 38, 25, 17, 42, 12, 14, 26, 22, 21, 15, 24, 40	2,46	3/5 60%	15/16 94%	NTC(6,14,9)+NTC(7,27,26)+NTC(15,18,31)+ NTC(18,22,31)+NTC(26,31,4)	18/21 86%	A.32.
	4.	4, 10, 9, 6, 8	20, 13, 26, 21, 18, 14, 41, 15, 36, 17, 12, 29, 38, 34, 42, 16	1,96	3/5 60%	13/16 81%	NTC(15,18,31)+NTC(18,22,31)+NTC(21,25,8)+ NTC(22,27,7)+NTC(27,32,21)	16/21 76%	A.33.

	5.	5, 2, 7, 6, 10	36, 32, 28, 40, 33, 19, 31, 27, 41, 15, 20, 38, 34, 18, 42, 26	5,04	5/5 100%	15/16 94%	NTC(12,27,28)+NTC(15,18,31)+NTC(15,23,29)+ NTC(22,23,29)+NTC(26,31,4)	20/21 95%	A.34.
Bez obc	1.	5, 10, 7, 2, 9	24, 34, 37, 14, 25, 30, 27, 20, 15, 35, 40, 36, 28, 11, 17, 29	2,11	3/5 60%	14/16 88%	NTC(4,25,18)+NTC(4,26,25)+NTC(9,18,22)+ NTC(10,20,32)+NTC(21,32,2)	17/21 81%	A.35.
	2.	10, 1, 6, 8, 2	35, 37, 41, 24, 25, 13, 29, 23, 17, 16, 12, 33, 26, 36, 14, 27	2,25	5/5 100%	13/16 81%	NTC(3,8,25)+NTC(4,11,28)+NTC(9,12,10)+ NTC(11,15,28)+NTC(12,30,31)	18/21 86%	A.36.
	3.	7, 1, 2, 4, 3	14, 41, 22, 42, 25, 27, 40, 29, 19, 30, 13, 24, 39, 20, 26, 31	1,58	4/5 80%	12/16 75%	NTC(5,27,18)+NTC(11,28,2)+NTC(14,21,18)+ NTC(18,28,15)+NTC(21,24,3)	16/21 76%	A.37.
	4.	6, 10, 4, 9, 3	17, 31, 21, 33, 37, 24, 42, 39, 36, 16, 22, 20, 34, 38, 32, 27	1,88	4/5 80%	15/16 94%	NTC(4,18,5)+NTC(10,20,32)+NTC(11,15,28)+ NTC(16,30,8)+NTC(31,32,4)	19/21 90%	A.38.
	5.	9, 2, 10, 5, 4	31, 39, 20, 30, 41, 22, 32, 38, 28, 40, 29, 12, 15, 26, 35, 16	2,37	4/5 80%	14/16 88%	NTC(4,22,12)+NTC(6,12,4)+NTC(8,12,9)+ NTC(10,20,32)+NTC(31,32,4)	18/21 86%	A.39.

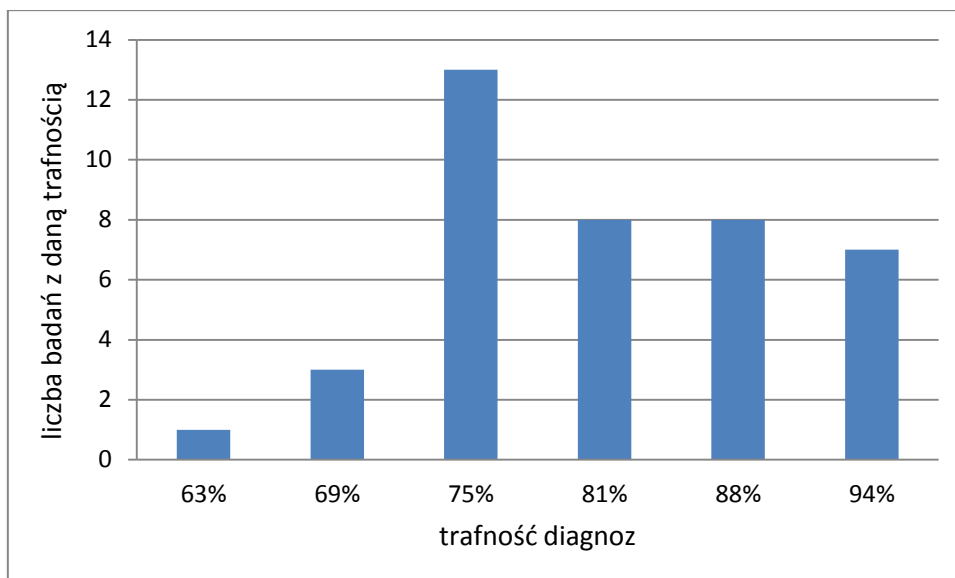
Na bazie zestawionych w tabeli 5.3. wyników utworzono 3 histogramy (Rys. 5.6, Rys. 5.7, Rys. 5.8), z których każdy obrazuje procentową trafność diagnoz przy badaniu uszkodzenia bieżni zewnętrznej. Każde badanie diagnostyczne zostało przeprowadzone dla różnych zestawów łożysk, wybieranych spośród łożysk nie biorących udziału w procedurze wyboru komponentów, oraz dla różnych wskaźników diagnostycznych.

Pierwszy histogram (Rys. 5.6) przedstawia rozkład trafności diagnoz łożysk z uszkodzoną bieżnią zewnętrzną. Diagnozie poddano 5 spośród 10 uszkodzonych łożysk. Dla każdego stopnia obciążenia z przedziału 0,5 kW do 1,1 kW z gradacją 0,1 kW oraz bez obciążenia silnika przeprowadzono 5 badań, co daje łącznie 40 wyników. Połowa badań (20 spośród 40) wykazała trafność na poziomie 60%. W dwóch przypadkach osiągnięto trafność 100%: dla pomiarów wykonanych przy najmniejszym obciążeniu (około 0,5 kW) oraz bez obciążenia (około 0,2 kW). Średnia trafność diagnoz dla łożysk uszkodzonych wyniosła 63%.



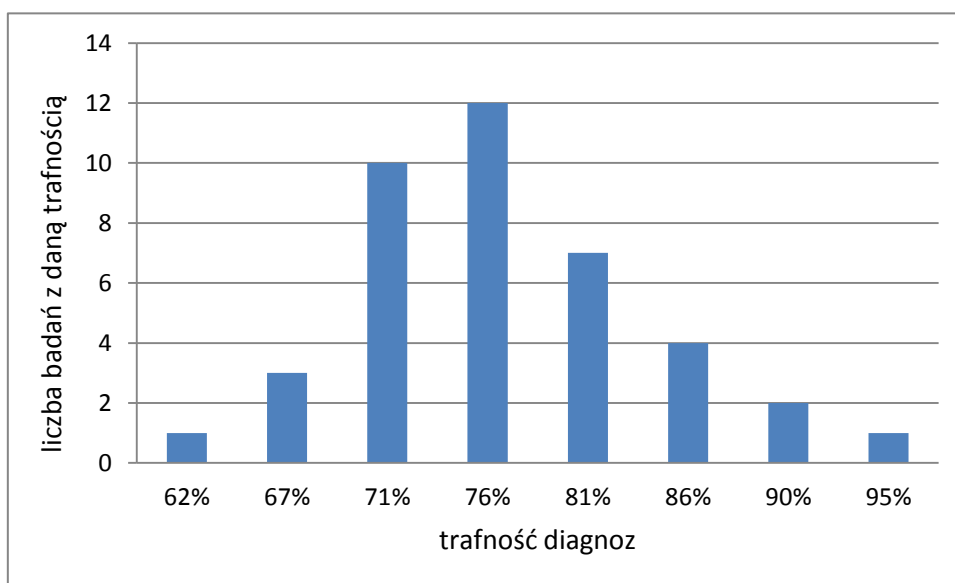
Rys. 5.6. Rozkład trafności diagnoz dla łożysk z uszkodzoną bieżnią zewnętrzną

Kolejny histogram (Rys. 5.7.) przedstawia rozkład trafności diagnoz dla łożysk z nieuszkodzoną bieżnią zewnętrzną. Diagnozie poddano 16 z 32 łożysk nieuszkodzonych. Średnia trafność diagnoz w tym przypadku wyniosła w przybliżeniu 81%. Najniższą trafność diagnoz na poziomie 63% uzyskano dla obciążenia 1,1 kW.



Rys. 5.7. Rozkład trafności diagnoz dla łóżek z nieuszkodzoną bieżnią zewnętrzną

Rys. 5.8. przedstawia rozkład trafności diagnoz dla łóżek spoza zestawu do wyboru WD przy wprowadzonym uszkodzeniu bieżni zewnętrznej. Średnia trafność diagnoz dla łóżek spoza zestawu do wyboru WD wyniosła około 77%. Najwyższą wartość – 95% osiągnięto dla pomiaru wykonanego przy obciążeniu 0,5 kW, natomiast najniższą wartość – 62% dla pomiaru wykonanego przy obciążeniu 1,1 kW. Wartość kryterium Fischera obliczona na podstawie wszystkich wyników zawiera się w przedziale od 0,62 do 5,04. Średnia wartość kryterium Fishera wyniosła 1,72.



Rys. 5.8. Rozkład trafności diagnoz dla łóżek spoza zestawu do wyboru WD przy wprowadzonym uszkodzeniu bieżni zewnętrznej

5.4.2 USZKODZENIA BIEŻNI WEWNĘTRZNEJ

Zgodnie z tabelą 5.2. do badania uszkodzeń bieżni wewnętrznej przygotowano 6 łożysk z celowo wprowadzonymi uszkodzeniami, o numerach od 11 do 16 oraz 36 łożysk z nieuszkodzoną bieżnią wewnętrzną (1 do 10 oraz 17 do 42). Przyjmując zasadę, że do wyboru WD można użyć 50% łożysk uszkodzonych i 50% łożysk nieuszkodzonych, w tym wypadku istnieje $6!/(3!(6-3)!)=20$ możliwości wylosowania różnych zestawów łożysk uszkodzonych oraz $36!/(18!(36-18)!)=9075135300$ możliwości wylosowania różnych zestawów łożysk nieuszkodzonych. Stąd możliwe jest wylosowanie $20 \cdot 9075135300 = 181502706000$ różnych zestawów łożysk do wyboru WD. Ze względu na tak dużą liczbę możliwych kombinacji, autor przeprowadził procedurę wyboru komponentów jedynie pięciokrotnie dla każdego obciążenia. W dalszej części przedstawiono i opisano jeden przykładowy wykres wskaźnika diagnostycznego. Wyniki uzyskane na podstawie kolejnych zestawów zamieszczono w tabeli 5.4. Pozostałe wykresy wskaźników diagnostycznych, do badania uszkodzeń bieżni wewnętrznej, wybranych zgodnie z procedurą przedstawioną w rozdziale 5.3. zamieszczono w załączniku B.

Do badania uszkodzeń bieżni wewnętrznej, uwzględniając częstotliwości składowych z tabeli 5.1. należy przyjąć, że $f_{def} = f_{in}$. Wartość kryterium Fishera obliczona została dla wszystkich łożysk, łącznie z łożyskami biorącymi udział w procedurze wyboru komponentów.

Poniżej przedstawiono rezultaty uzyskane dla jednego wylosowanego zestawu łożysk przy obciążeniu 1,1 kW:

Zestaw 1. Do wyboru WD

Poniżej umieszczono numery łożysk wylosowanych do wyboru WD:

Numery łożysk uszkodzonych: 14, 11, 12

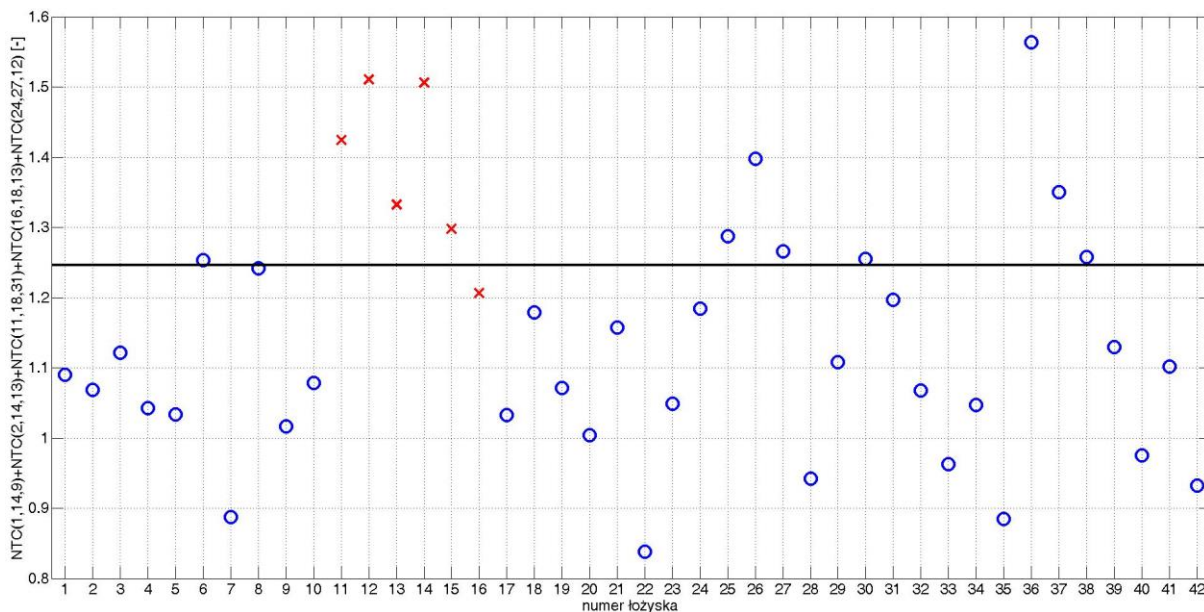
Numery łożysk nieuszkodzonych: 19, 20, 29, 23, 41, 3, 38, 17, 22, 7, 6, 1, 8, 2, 31, 5, 9, 27

$F=1,85$

Pozostałe łożyska, których nie wykorzystano do procedury wyboru WD:

Numery łożysk uszkodzonych: 13, 15, 16

Numery łożysk nieuszkodzonych: 4, 10, 18, 21, 24, 25, 26, 28, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 42



Rys. 5.9. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 1,1 kW

Na podstawie powyższego wykresu można odczytać, że spośród 3 łożysk spoza zestawu do wyboru WD, 2 z 3 uszkodzonych o numerach: 13 i 15 zostały zdiagnozowane poprawnie, co oznacza 67% trafność wykrycia uszkodzenia. W przypadku łożysk nieuszkodzonych poprawnie zdiagnozowanych zostało 13 spośród 18 łożysk, o numerach: 4, 10, 18, 21, 24, 28, 32, 33, 34, 35, 39, 40, 42 co daje 72% trafności. Zgodnie z początkowymi założeniami łożyska należące do zestawu do wyboru WD nie podlegają diagnozie. Gdyby jednak uwzględnić je w rozważaniach, w tym przypadku 3 spośród nich zostałyby zdiagnozowane niepoprawnie. Są to łożyska o numerach 6, 27 i 38.

Wskaźnik diagnostyczny to suma następujących kowariancji:

$$NTC(1,4,9)+NTC(2,14,13)+NTC(11,18,31)+NTC(16,18,13)+NTC(24,27,12)$$

Ogólna trafność diagnoz dla łożysk spoza zestawu do wyboru WD wynosi: $15/21 = 71\%$

Tabela 5.4. Zestawienie uzyskanych wyników dla badania uszkodzeń bieżni wewnętrznej

Obciążenie silnika [kW]	Numer zestawu	Numery łożysk wylosowanych do wyboru WD		Wartość Kryterium Fishera	Trafność diagnoz dla łożysk uszkodzonych	Trafność diagnoz dla łożysk nieuszkodzonych	Wskaźnik diagnostyczny	Trafność diagnoz dla łożysk spoza zestawu do wyboru WD	Numer rysunku
		łożyska uszkodzone	łożyska nieuszkodzone						
1,1	1	14, 11, 12	19, 20, 29, 23, 41, 3, 38, 17, 22, 7, 6, 1, 8, 2, 31, 5, 9, 27	1,85	2/3 67%	13/18 72%	NTC(1,4,9)+NTC(2,14,13)+NTC(11,18,31)+ NTC(16,18,13)+NTC(24,27,12)	15/21 71%	5.9.
	2	15, 12, 13	29, 6, 20, 8, 22, 27, 5, 25, 9, 18, 21, 35, 39, 42, 31, 23, 2, 1	1,01	2/3 67%	14/18 78%	NTC(3,26,6)+NTC(5,26,32)+NTC(11,27,12)+ NTC(14,21,16)+NTC(15,21,22)	16/21 76%	B.1.
	3	16, 15, 12	8, 40, 9, 35, 24, 6, 41, 19, 30, 20, 26, 39, 22, 38, 1, 29, 23, 10	1,11	2/3 67%	13/18 72%	NTC(12,20,19)+NTC(12,27,7)+NTC(13,24,9)+ NTC(14,24,11)+NTC(15,25,7)	15/21 71%	B.2.
	4	15, 16, 13	26, 37, 40, 2, 32, 38, 36, 1, 3, 34, 18, 29, 24, 27, 5, 20, 25, 35	1,22	1/3 33%	15/18 83%	NTC(5,16,21)+NTC(10,27,12)+NTC(11,13,30)+ NTC(11,29,2)+NTC(12,27,19)	16/21 76%	B.3.
	5	14, 12, 11	37, 33, 19, 18, 20, 22, 28, 27, 1, 4, 38, 39, 8, 3, 41, 30, 31, 5	1,48	2/3 67%	13/18 72%	NTC(2,14,13)+NTC(4,29,16)+NTC(13,26,15)+ NTC(16,18,13)+NTC(23,31,16)	15/21 71%	B.4.
1,0	1	15, 13, 14	4, 30, 27, 29, 33, 8, 39, 5, 38, 19, 10, 37, 6, 40, 9, 25, 1, 3	1,84	2/3 67%	14/18 78%	NTC(8,31,22)+NTC(10,23,25)+NTC(11,23,20)+ NTC(15,25,26)+NTC(25,28,13)	16/21 76%	B.5.
	2	14, 15, 12	3, 34, 19, 27, 21, 25, 35, 39, 28, 30, 26, 31, 24, 6, 29, 41, 33, 36	1,21	2/3 67%	16/18 88%	NTC(5,30,29)+NTC(8,31,22)+NTC(10,23,25)+ NTC(14,29,31)+NTC(15,25,26)	18/21 86%	B.6.
	3	14, 15, 13	33, 10, 24, 7, 6, 27, 8, 31, 28, 42,	1,56	2/3	16/18	NTC(8,31,22)+NTC(11,23,20)+NTC(15,25,26)+	18/21	B.7.

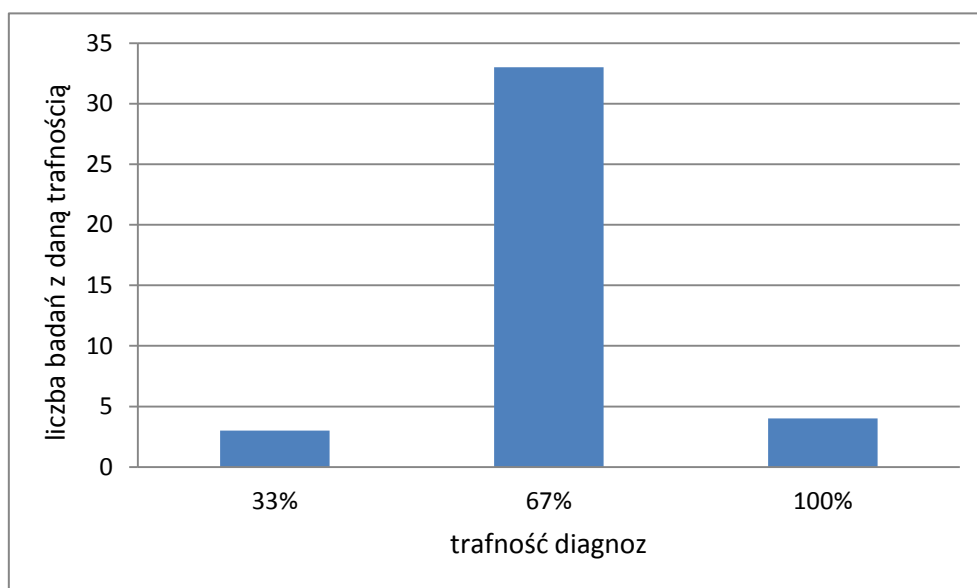
			1, 17, 22, 34, 2, 29, 40, 41		67%	88%	NTC(21,32,5)+NTC(27,29,10)	86%	
	4	12, 15, 13	31, 5, 34, 1, 21, 35, 30, 18, 24, 9, 37, 38, 20, 8, 4, 41, 29, 36	1,72	3/3 100%	14/18 78%	NTC(3,19,7)+NTC(8,31,22)+NTC(11,32,5)+ NTC(12,32,25)+NTC(15,25,26)	17/21 81%	B.8.
	5	15, 13, 14	31, 36, 39, 41, 37, 28, 26, 27, 5, 24, 34, 38, 1, 2, 19, 21, 7, 10	1,52	2/3 67%	14/18 78%	NTC(11,23,20)+NTC(12,32,11)+NTC(15,25,26)+ NTC(18,27,11)+NTC(21,32,5)	16/21 76%	B.9.
0,9	1	11, 16, 12	42, 7, 32, 22, 2, 41, 10, 39, 33, 40, 38, 36, 21, 4, 23, 19, 34, 35	2,02	2/3 67%	14/18 78%	NTC(6,18,4)+NTC(6,27,3)+NTC(9,13,16)+ NTC(12,23,20)+NTC(18,21,6)	16/21 76%	B.10.
	2	16, 11, 12	39, 6, 10, 18, 33, 2, 1, 38, 30, 42, 36, 20, 37, 41, 28, 21, 8, 32	1,61	2/3 67%	15/18 83%	NTC(6,27,3)+NTC(8,32,20)+NTC(9,13,16)+ NTC(12,23,20)+NTC(25,30,4)	17/21 81%	B.11.
	3	12, 16, 11	33, 41, 5, 42, 30, 32, 20, 26, 31, 9, 35, 34, 28, 2, 7, 39, 38, 29	1,34	2/3 67%	14/18 78%	NTC(6,18,4)+NTC(6,27,3)+NTC(9,13,16)+ NTC(12,23,20)+NTC(14,31,5)	16/21 76%	B.12.
	4	16, 15, 14	25, 34, 26, 21, 20, 2, 37, 18, 10, 19, 31, 27, 40, 23, 22, 17, 1, 33	1,92	2/3 67%	15/18 83%	NTC(1,3,28)+NTC(1,6,19)+NTC(2,6,19)+ NTC(2,10,5)+NTC(10,11,2)	17/21 81%	B.13.
	5	11, 16, 12	42, 31, 33, 5, 41, 39, 36, 17, 34, 9, 28, 4, 38, 40, 18, 22, 32, 21	1,43	2/3 67%	15/18 83%	NTC(6,27,3)+NTC(9,13,16)+NTC(12,23,20)+ NTC(19,27,5)+NTC(28,31,2)	17/21 81%	B.14.
0,8	1	12, 15, 14	20, 27, 28, 34, 31, 36, 8, 10, 29, 21, 25, 42, 33, 30, 41, 40, 22, 5	2,04	2/3 67%	15/18 83%	NTC(2,9,11)+NTC(3,25,16)+NTC(3,27,15)+ NTC(7,8,26)+NTC(20,28,31)	17/21 81%	B.15.
	2	15, 13, 12	40, 37, 23, 17, 31, 7, 38, 28, 22, 21, 1, 10, 36, 42, 9, 3, 8, 29	1,43	2/3 67%	11/18 61%	NTC(4,21,27)+NTC(5,17,31)+NTC(15,24,5)+ NTC(19,21,7)+NTC(25,31,16)	13/21 62%	B.16.
	3	13, 12, 11	36, 8, 32, 27, 24, 19, 20, 35, 1, 2, 4, 31, 29, 10, 17, 18, 6, 22	1,21	2/3 67%	15/18 83%	NTC(1,7,24)+NTC(4,5,1)+NTC(9,10,1)+ NTC(15,29,1)+NTC(15,30,11)	17/21 81%	B.17.
	4	15, 14, 13	7, 2, 22, 33, 18, 34, 20, 40, 31, 26, 36, 10, 38, 32, 35, 21, 25, 1	2,21	2/3 67%	14/18 78%	NTC(1,30,29)+NTC(11,29,16)+NTC(16,23,5)+ NTC(19,25,4)+NTC(21,27,15)	16/21 76%	B.18.
	5	12, 16, 14	33, 28, 18, 7, 23, 32, 5, 10, 17, 42, 40, 22, 1, 26, 6, 41, 19, 9	1,64	1/3 33%	16/18 88%	NTC(1,25,4)+NTC(3,27,15)+NTC(10,21,19)+ NTC(12,26,1)+NTC(23,25,19)	17/21 81%	B.19.
0,7	1	15, 16, 11	29, 30, 2, 25, 36, 33, 8, 9, 3, 34, 20, 37, 7, 41, 5, 39, 18, 27	2,34	2/3 67%	12/18 67%	NTC(3,19,31)+NTC(4,11,27)+NTC(5,19,15)+ NTC(8,24,29)+NTC(19,29,12)	14/21 67%	B.20.

	2	15, 16, 11	20, 22, 5, 26, 29, 25, 30, 4, 24, 19, 28, 32, 17, 3, 41, 8, 40, 33	3,52	3/3 100%	15/18 83%	NTC(5,19,15)+NTC(11,29,32)+NTC(15,29,19)+ NTC(16,19,7)+NTC(19,29,12)	18/21 86%	B.21.
	3	13, 16, 15	9, 40, 8, 33, 35, 32, 23, 22, 17, 31, 5, 25, 19, 30, 2, 6, 3, 18	1,59	2/3 67%	12/18 67%	NTC(3,6,10)+NTC(3,10,14)+NTC(6,7,27)+ NTC(7,11,3)+NTC(23,25,9)	14/21 67%	B.22.
	4	13, 15, 11	32, 41, 6, 38, 25, 27, 35, 29, 10, 8, 40, 3, 36, 5, 28, 21, 39, 17	1,21	2/3 67%	15/18 83%	NTC(1,15,3)+NTC(3,6,10)+NTC(6,11,19)+ NTC(6,24,19)+NTC(10,20,11)	17/21 81%	B.23.
	5	16, 11, 13	22, 19, 39, 10, 8, 30, 35, 29, 42, 37, 17, 34, 2, 5, 7, 41, 20, 36	1,66	2/3 67%	14/18 78%	NTC(1,15,3)+NTC(3,6,10)+NTC(3,19,31)+ NTC(10,26,30)+NTC(15,29,14)	16/21 76%	B.24.
0,6	1	13, 16, 15	10, 39, 32, 17, 6, 23, 27, 1, 9, 41, 8, 25, 4, 18, 5, 3, 34, 19	1,75	2/3 67%	14/18 78%	NTC(5,29,20)+NTC(6,18,24)+NTC(8,20,3)+ NTC(10,31,17)+NTC(20,27,8)	16/21 76%	B.25.
	2	12, 15, 16	37, 8, 34, 23, 10, 3, 39, 41, 24, 5, 30, 7, 38, 20, 18, 32, 33, 2	1,85	2/3 67%	15/18 83%	NTC(2,29,25)+NTC(5,18,9)+NTC(5,29,20)+ NTC(11,21,18)+NTC(12,29,5)	17/21 81%	B.26.
	3	15, 16, 12	22, 34, 35, 21, 8, 24, 30, 2, 33, 41, 27, 37, 3, 1, 4, 38, 39, 36	2,36	2/3 67%	15/18 83%	NTC(1,23,7)+NTC(2,29,25)+NTC(3,28,31)+ NTC(5,29,20)+NTC(6,24,32)	17/21 81%	B.27.
	4	16, 14, 12	17, 21, 39, 2, 7, 1, 37, 25, 20, 34, 4, 42, 31, 27, 26, 28, 32, 38	1,05	1/3 33%	13/18 72%	NTC(3,12,7)+NTC(6,18,29)+NTC(9,16,1)+ NTC(12,22,11)+NTC(21,32,26)	14/21 67%	B.28.
	5	12, 15, 16	27, 20, 22, 36, 29, 41, 3, 4, 23, 25, 17, 38, 10, 31, 28, 32, 1, 18	2,87	3/3 100%	15/18 83%	NTC(2,29,25)+NTC(6,20,11)+NTC(6,24,26)+ NTC(12,21,26)+NTC(21,24,2)	18/21 86%	B.29.
0,5	1	15, 11, 16	42, 5, 1, 29, 3, 28, 20, 26, 38, 34, 37, 23, 6, 33, 32, 30, 8, 9	3,81	2/3 67%	14/18 78%	NTC(3,17,15)+NTC(4,11,10)+NTC(5,21,26)+ NTC(11,15,7)+NTC(15,27,24)	16/21 76%	B.30.
	2	14, 15, 16	35, 2, 39, 22, 37, 19, 4, 40, 28, 42, 1, 33, 31, 32, 41, 10, 25, 6	2,81	2/3 67%	15/18 83%	NTC(6,17,11)+NTC(7,29,19)+NTC(11,15,7)+ NTC(14,28,25)+NTC(23,32,31)	17/21 81%	B.31.
	3	13, 14, 15	7, 28, 41, 6, 2, 4, 36, 19, 1, 10, 34, 18, 31, 29, 23, 38, 5, 26	1,28	2/3 67%	13/18 72%	NTC(4,25,14)+NTC(13,17,18)+NTC(22,30,9)+ NTC(23,32,31)+NTC(27,29,19)	15/21 71%	B.32.
	4	12, 14, 13	36, 4, 31, 32, 24, 3, 28, 5, 38, 6, 27, 19, 9, 29, 26, 1, 34, 37	1,64	2/3 67%	13/18 72%	NTC(1,19,8)+NTC(7,11,26)+NTC(10,19,25)+ NTC(11,15,7)+NTC(23,30,26)	15/21 71%	B.33.
	5	11, 13, 16	22, 42, 35, 2, 27, 23, 32, 18, 6, 31,	2,23	2/3	17/18	NTC(5,9,1)+NTC(11,15,7)+NTC(13,20,8)+	19/21	B.34.

			26, 21, 40, 33, 7, 36, 8, 39		67%	94%	NTC(14,23,22)+NTC(18,25,11)	90%	
Bez obc	1	14, 12, 13	3, 25, 19, 39, 31, 8, 32, 7, 38, 5, 26, 41, 17, 18, 22, 28, 29, 20	1,25	2/3 67%	15/18 83%	NTC(2,31,15)+NTC(3,27,8)+NTC(5,21,28)+ NTC(16,31,2)+NTC(21,26,13)	17/21 81%	B.35.
	2	16, 13, 11	10, 37, 30, 28, 17, 42, 35, 29, 39, 38, 25, 8, 4, 33, 36, 32, 6, 19	1,69	2/3 67%	16/18 88%	NTC(4,11,8)+NTC(5,26,28)+NTC(11,29,2)+ NTC(11,29,9)+NTC(18,25,31)	18/21 86%	B.36.
	3	14, 12, 13	19, 35, 39, 36, 1, 9, 24, 8, 32, 41, 2, 38, 4, 5, 7, 6, 25, 42	1,87	2/3 67%	14/18 78%	NTC(2,31,15)+NTC(3,27,8)+NTC(5,21,28)+ NTC(11,22,23)+NTC(16,31,2)	16/21 76%	B.37.
	4	12, 15, 13	18, 22, 21, 29, 5, 32, 37, 17, 39, 40, 41, 28, 3, 34, 4, 31, 42, 36	1,58	2/3 67%	14/18 78%	NTC(2,19,15)+NTC(3,5,9)+NTC(3,20,17)+ NTC(3,27,8)+NTC(19,24,2)	16/21 76%	B.38.
	5	13, 12, 15	35, 17, 7, 22, 21, 5, 19, 10, 27, 23, 26, 38, 2, 29, 32, 31, 33, 28	2,48	3/3 100%	13/18 72%	NTC(2,19,15)+NTC(3,9,20)+NTC(3,27,8)+ NTC(5,26,28)+NTC(16,31,2)	16/21 76%	B.39.

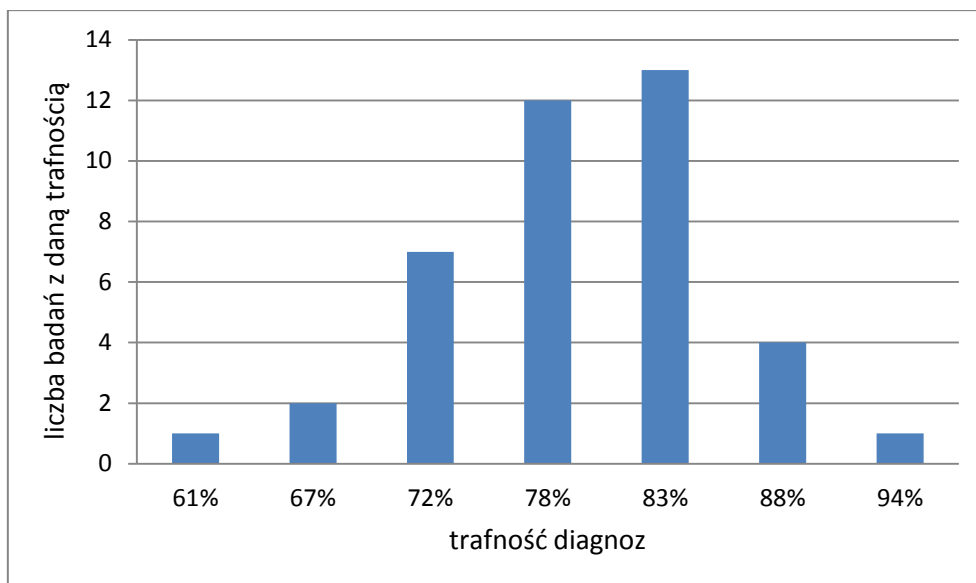
W oparciu o dane umieszczone w tabeli 5.4., dotyczące oceny stanu łożysk sporządzono trzy histogramy (Rys. 5.10, Rys. 5.11, Rys. 5.12), przedstawiające trafność diagnoz dla badania uszkodzeń bieżni wewnętrznej. Łożyska, które poddawano diagnozie pochodziły za każdym razem z innego zestawu łożysk i były badane przy użyciu innego wskaźnika diagnostycznego.

Pierwszy histogram (Rys. 5.10) prezentuje rozkład trafności diagnoz łożysk uszkodzonych. Diagnozie poddano 3 spośród 6 uszkodzonych łożysk. Pozostałe 3 łożyska posłużyły do wyboru WD. Biorąc pod uwagę rezultaty uzyskane dla wszystkich rozpatrywanych obciążeń, umieszczone w tabeli 5.4., dla większości wylosowanych przypadków – 33 spośród 40, poprawnie zdiagnozowano 2 z 3 uszkodzonych łożysk. Średnia trafność diagnoz dla łożysk uszkodzonych wynosi w przybliżeniu 69%.



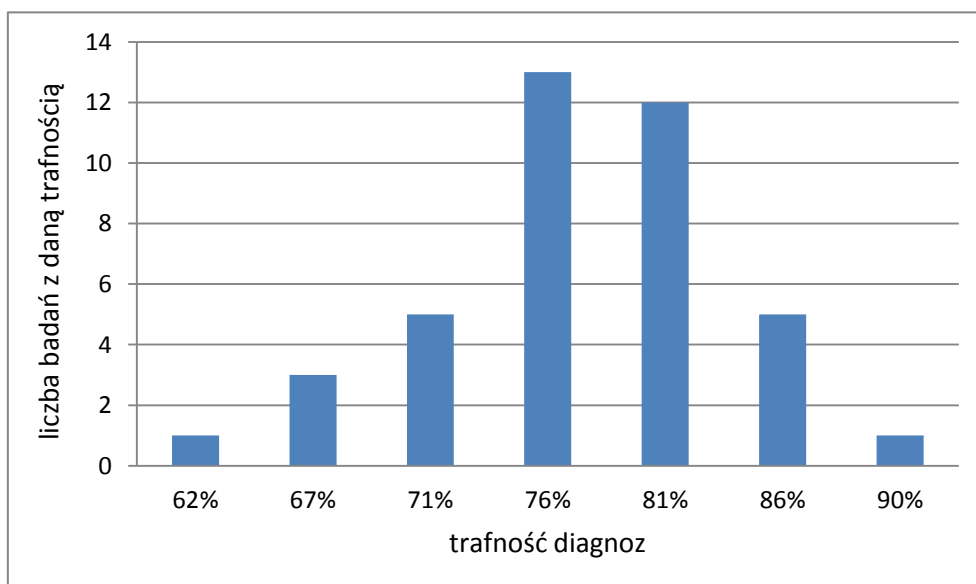
Rys. 5.10. Rozkład trafności diagnoz dla łożysk z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną

Rysunek 5.11 obrazuje rozkład trafności diagnoz dla łożysk z nieuszkodzoną bieżnią wewnętrzną. Średnia trafność diagnoz dla tego przypadku wynosi 79%. Największą trafność, na poziomie 94% osiągnięto przy najmniejszym obciążeniu – 0,5 kW, natomiast najmniejszą – 61% dla pomiarów przy obciążeniu 0,8 kW.



Rys. 5.11. Rozkład trafności diagnoz dla łóżyk z nieuszkodzoną bieżnią wewnętrzną

Kolejny histogram (Rys. 5.12) przedstawia trafności diagnoz dla łóżyk spoza zestawu do wyboru WD przy wprowadzonym uszkodzeniu bieżni wewnętrznej. Średnia trafność diagnoz wynosi w przybliżeniu 77%. Najwyższą wartość – 90% osiągnięto dla pomiaru wykonanego przy obciążeniu 0,5 kW, natomiast najniższą wartość – 62% dla pomiaru wykonanego przy obciążeniu 0,8 kW. Wartość kryterium Fischera obliczona na podstawie wszystkich wyników zawiera się w przedziale od 1,0134 do 3,8120. Średnia wartość kryterium Fishera wyniosła 1,81.



Rys. 5.12. Rozkład trafności diagnoz dla łóżyk spoza zestawu do wyboru WD przy wprowadzonym uszkodzeniu bieżni wewnętrznej

5.4.3 USZKODZENIA ELEMENTÓW TOCZNYCH

Zgodnie z tabelą 5.2. do badania uszkodzeń elementów tocznych przygotowano 5 łożysk z celowo wprowadzonymi uszkodzeniami, o numerach od 17 do 21 oraz 37 łożysk z nieuszkodzonymi elementami tocznymi (1 do 16 oraz 22 do 42). W tym wypadku ze względu na nieparzystą liczbę łożysk, do wyznaczenia WD przyjęto 3 łożyska uszkodzone oraz 18 łożysk nieuszkodzonych. Stąd istnieje $5!/(3!(5-3)!)=10$ możliwości wylosowania różnych zestawów łożysk uszkodzonych oraz $37!/(18!(37-18)!)=17672631900$ możliwości wylosowania różnych zestawów łożysk nieuszkodzonych. Stąd możliwe jest wylosowanie $10 \cdot 17672631900=176726319000$ różnych zestawów łożysk do wyboru WD. Ze względu na tak dużą liczbę możliwych kombinacji, autor przeprowadził procedurę wyboru komponentów pięciokrotnie dla każdego obciążenia. W dalszej części przedstawiono i opisano jeden przykładowy wykres wskaźnika diagnostycznego. Dane i wyniki uzyskane na podstawie pozostałych zestawów zamieszczono w tabeli 5.5. Pozostałe wykresy wskaźników diagnostycznych, do badania uszkodzeń elementów tocznych, wybranych zgodnie z procedurą przedstawioną w rozdziale 5.3. zamieszczono w załączniku C.

Uwzględniając częstotliwości składowych z tabeli 5.1. należy przyjąć, że $f_{def} = f_{rol}$. Wartość kryterium Fishera obliczona została dla wszystkich łożysk, łącznie z łożyskami biorącymi udział w procedurze wyboru komponentów.

Poniżej przedstawiono rezultaty uzyskane dla jednego wylosowanego zestawu łożysk przy obciążeniu 1,1 kW:

Zestaw 1.

Numery łożysk uszkodzonych: 20, 19, 21

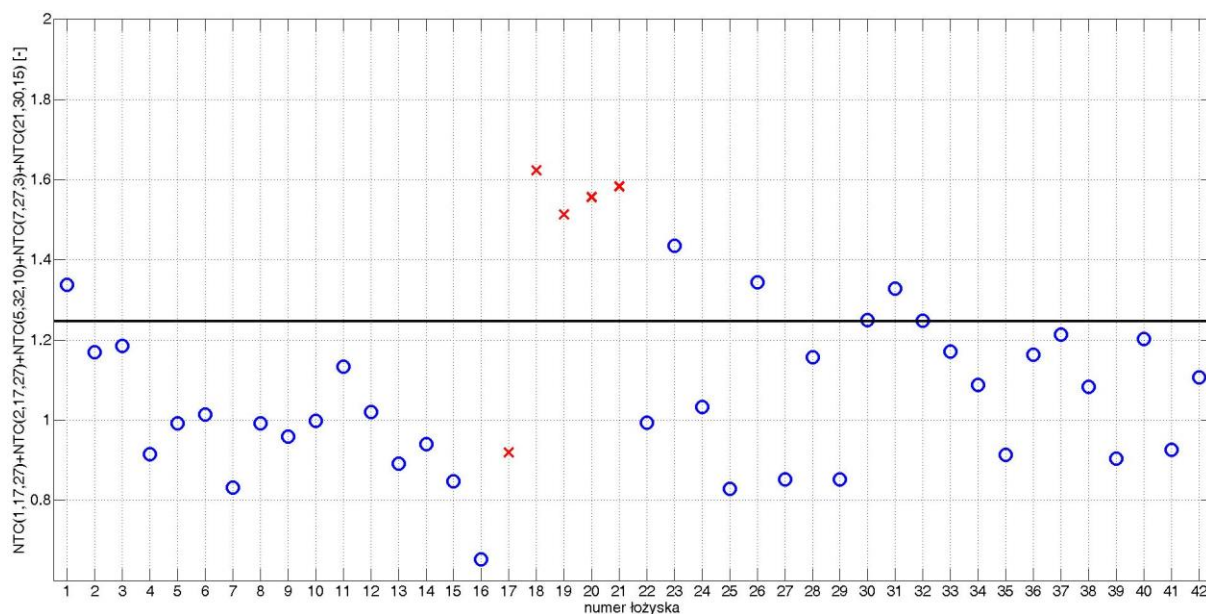
Numery łożysk nieuszkodzonych: 39, 6, 27, 24, 25, 32, 11, 33, 13, 36, 14, 9, 38, 3, 15, 29, 16, 8

$F=1,27$

Pozostałe łożyska, których nie wykorzystano do procedury wyboru WD:

Numery łożysk uszkodzonych: 17, 18

Numery łożysk nieuszkodzonych: 1, 2, 4, 5, 7, 10, 12, 22, 23, 26, 28, 30, 31, 34, 35, 37, 40, 41, 42



Rys. 5.13. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 1,1 kW

Na podstawie powyższego wykresu można odczytać, że spośród 2 łożysk spoza zestawu do wyboru WD 1 z 2 uszkodzonych, o numerze 18 zostało zdiagnozowane poprawnie, co oznacza 50% trafność wykrycia uszkodzenia. W przypadku łożysk nieuszkodzonych poprawnie zdiagnozowanych zostało 14 spośród 19 łożysk, o numerach: 2, 4, 5, 7, 10, 12, 22, 28, 34, 35, 37, 40, 41, 42, co daje 74% trafności. Ponadto wśród łożysk nieuszkodzonych, które nie zostały poprawnie zdiagnozowane znajduje się jedno, o numerze 32, należące do zestawu do wyboru WD.

Wskaźnik diagnostyczny to suma następujących kowariancji:

$$NTC(1,17,27)+NTC(2,17,27)+NTC(5,32,10)+NTC(7,27,3)+NTC(21,30,15)$$

Ogólna trafność diagnoz dla łożysk spoza zestawu do wyboru WD wynosi: $15/21 = 71\%$

Tabela 5.5. Zestawienie uzyskanych wyników dla badania uszkodzeń elementów toczyńnych

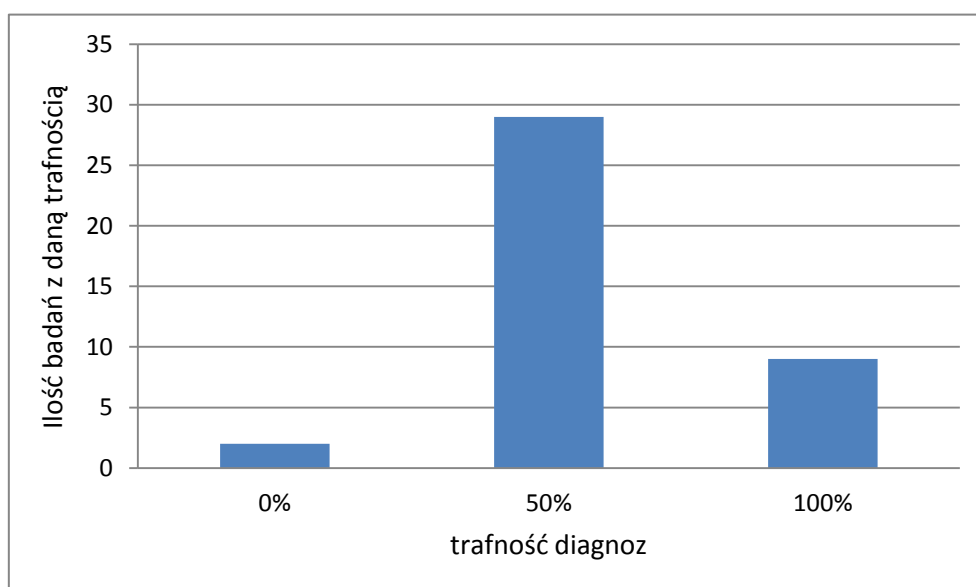
Obciążenie silnika [kW]	Numer zestawu	Numery tożysk wylasowanych do wyboru WD		Wartość Kryterium Fishera	Trafność diagnoz dla tożysk uszkodzonych	Trafność diagnoz dla tożysk nieuszkodzonych	Wskaźnik diagnostyczny	Trafność diagnoz dla tożysk spoza zestawu do wyboru WD	Numer rysunku
		tożyska uszkodzone	tożyska nieuszkodzone						
1,1	1	20, 19, 21	39, 6, 27, 24, 25, 32, 11, 33, 13, 36, 14, 9, 38, 3, 15, 29, 16, 8	1,27	1/2 50%	14/19 74%	NTC(1,17,27)+NTC(2,17,27)+NTC(5,32,10)+ NTC(7,27,3)+NTC(21,30,15)	15/21 71%	5.13
	2	19, 21, 20	11, 3, 6, 30, 29, 4, 28, 38, 16, 31, 5, 8, 26, 34, 32, 13, 2, 33	1,03	1/2 50%	18/19 95%	NTC(3,25,4)+NTC(4,25,3)+NTC(5,32,10)+ NTC(8,15,11)+NTC(20,32,21)	19/21 90%	C.1.
	3	20, 21, 19	31, 10, 22, 7, 6, 25, 8, 29, 26, 40, 1, 11, 16, 32, 2, 27, 38, 39	2,73	1/2 50%	15/19 79%	NTC(4,14,25)+NTC(5,32,10)+NTC(9,32,24)+ NTC(17,32,11)+NTC(18,19,1)	16/21 76%	C.2.
	4	19, 17, 21	31, 32, 29, 22, 37, 13, 23, 39, 26, 15, 42, 12, 5, 3, 24, 34, 35, 6	1,83	1/2 50%	16/19 84%	NTC(2,6,13)+NTC(4,24,13)+NTC(6,15,29)+ NTC(10,32,13)+NTC(14,17,26)	17/21 81%	C.3.
	5	20, 21, 17	14, 29, 42, 4, 40, 16, 24, 36, 26, 6, 37, 22, 28, 27, 34, 3, 33, 8	3,45	1/2 50%	17/19 89%	NTC(5,13,8)+NTC(6,7,25)+NTC(6,29,25)+ NTC(15,20,5)+NTC(18,23,17)	18/21 86%	C.4.
1,0	1	21, 20, 19	14, 2, 31, 8, 9, 3, 33, 1, 6, 32, 28, 38, 37, 30, 36, 34, 35, 42	1,65	1/2 50%	16/19 84%	NTC(10,29,8)+NTC(17,20,31)+NTC(19,23,24)+ NTC(22,31,25)+NTC(22,32,18)	17/21 81%	C.5.
	2	18, 20, 21	27, 13, 24, 25, 14, 12, 9, 33, 15, 30, 5, 36, 2, 42, 3, 11, 26, 31	1,98	2/2 100%	12/19 63%	NTC(4,19,29)+NTC(10,29,8)+NTC(11,13,31)+ NTC(16,21,27)+NTC(19,30,4)	14/21 67%	C.6.
	3	19, 21, 20	13, 32, 22, 1, 29, 28, 37, 40, 3, 2, 30, 12, 6, 15, 25, 31, 38, 35	1,71	1/2 50%	14/19 74%	NTC(10,29,8)+NTC(17,20,31)+NTC(22,31,25)+ NTC(22,32,18)+NTC(25,32,11)	15/21 71%	C.7.
	4	18, 21, 20	12, 3, 37, 4, 10, 27, 36, 24, 11, 9, 13, 1, 7, 16, 14, 35, 42, 38	2,51	2/2 100%	14/19 74%	NTC(5,25,9)+NTC(10,11,3)+NTC(10,29,8)+ NTC(11,24,31)+NTC(12,21,11)	16/21 76%	C.8.

	5	21, 19, 18	11, 27, 23, 22, 33, 42, 30, 37, 34, 36, 6, 9, 40, 1, 31, 15, 25, 29	1,16	0/2 0%	17/19 89%	NTC(3,11,2)+NTC(4,29,13)+NTC(6,31,5)+ NTC(16,19,21)+NTC(16,21,3)	17/21 81%	C.9.
0,9	1	21, 17, 18	16, 12, 3, 26, 25, 33, 28, 35, 1, 39, 40, 24, 5, 7, 10, 36, 13, 31	2,08	0/2 0%	17/19 89%	NTC(2,29,23)+NTC(2,29,32)+NTC(14,29,23)+ NTC(14,31,4)+NTC(26,31,4)	17/21 81%	C.10.
	2	18, 17, 21	2, 26, 37, 8, 39, 35, 36, 30, 12, 6, 1, 33, 32, 11, 27, 5, 4, 31	3,06	2/2 100%	16/19 84%	NTC(7,21,22)+NTC(14,17,31)+NTC(14,31,4)+ NTC(15,16,13)+NTC(26,31,4)	18/21 86%	C.11.
	3	20, 18, 17	22, 37, 31, 14, 33, 30, 27, 42, 25, 39, 29, 6, 16, 26, 9, 4, 28, 40	1,19	1/2 50%	16/19 84%	NTC(1,22,15)+NTC(8,18,27)+NTC(8,31,27)+ NTC(17,19,27)+NTC(26,31,4)	17/21 81%	C.12.
	4	20, 17, 19	33, 23, 5, 9, 3, 24, 36, 8, 15, 4, 14, 28, 2, 38, 12, 22, 10, 40	3,69	2/2 100%	15/19 79%	NTC(4,11,31)+NTC(4,15,20)+NTC(7,11,27)+ NTC(11,28,3)+NTC(26,31,4)	17/21 81%	C.13.
	5	19, 20, 17	29, 25, 28, 32, 40, 4, 38, 34, 35, 24, 5, 36, 22, 14, 33, 30, 37, 39	1,98	1/2 50%	14/19 74%	NTC(5,23,9)+NTC(13,22,3)+NTC(13,22,11)+ NTC(26,31,4)+NTC(31,32,23)	15/21 71%	C.14.
0,8	1	17, 19, 21	3, 37, 7, 25, 23, 30, 34, 14, 32, 1, 2, 28, 10, 40, 29, 11, 36, 4	1,41	1/2 50%	15/19 79%	NTC(4,6,26)+NTC(4,31,6)+NTC(6,19,30)+ NTC(10,24,31)+NTC(19,27,6)	16/21 76%	C.15.
	2	18, 19, 17	4, 6, 25, 37, 10, 15, 36, 1, 33, 40, 31, 22, 28, 16, 2, 7, 26, 13	2,13	1/2 50%	17/19 89%	NTC(6,20,5)+NTC(6,25,20)+NTC(6,29,23)+ NTC(6,32,16)+NTC(10,24,31)	18/21 86%	C.16.
	3	18, 19, 17	11, 34, 36, 9, 13, 37, 2, 15, 30, 31, 24, 32, 10, 39, 12, 29, 3, 38	2,49	1/2 50%	15/19 79%	NTC(4,5,14)+NTC(6,15,12)+NTC(6,16,26)+ NTC(6,26,24)+NTC(6,32,16)	16/21 76%	C.17.
	4	19, 20, 21	34, 38, 27, 26, 5, 36, 13, 14, 3, 23, 12, 4, 30, 29, 2, 39, 31, 10	1,51	1/2 50%	15/19 79%	NTC(1,6,22)+NTC(1,6,27)+NTC(5,6,30)+ NTC(16,27,6)+NTC(27,31,6)	16/21 76%	C.18.
	5	17, 19, 18	36, 35, 10, 28, 16, 1, 23, 33, 38, 5, 6, 2, 39, 12, 31, 30, 25, 34	4,70	2/2 100%	14/19 74%	NTC(4,5,14)+NTC(6,25,18)+NTC(6,32,16)+ NTC(18,24,19)+NTC(18,30,14)	16/21 76%	C.19.
0,7	1	21, 20, 18	26, 1, 32, 16, 11, 2, 25, 39, 8, 9, 15, 10, 6, 36, 12, 38, 29, 22	2,23	1/2 50%	16/19 84%	NTC(2,5,11)+NTC(5,21,11)+NTC(9,17,21)+ NTC(21,28,31)+NTC(23,28,21)	17/21 81%	C.20.
	2	21, 17, 18	16, 12, 3, 26, 25, 33, 28, 35, 1, 39, 40, 24, 5, 7, 10, 36, 13, 31	1,49	1/2 50%	17/19 89%	NTC(4,29,27)+NTC(5,20,11)+NTC(9,20,19)+ NTC(9,27,29)+NTC(10,12,17)	18/21 86%	C.21.
	3	21, 18, 20	26, 16, 37, 27, 23, 1, 10, 36, 2, 8, 39, 5, 11, 33, 28, 40, 14, 12	1,79	1/2 50%	14/19 74%	NTC(2,5,11)+NTC(3,31,19)+NTC(5,6,29)+ NTC(5,21,11)+NTC(9,17,21)	15/21 71%	C.22.
	4	21, 19, 20	39, 14, 7, 15, 26, 30, 16, 2, 34, 35, 9, 6, 1, 5, 32, 36, 22, 37	2,89	1/2 50%	14/19 74%	NTC(2,5,11)+NTC(4,26,14)+NTC(5,21,11)+ NTC(21,28,16)+NTC(21,31,8)	15/21 71%	C.23.
	5	19, 17, 20	35, 13, 9, 25, 27, 28, 14, 23, 42, 1,	1,27	1/2	13/19	NTC(5,11,13)+NTC(5,28,4)+NTC(5,28,31)+	14/21	C.24.

			38, 10, 40, 36, 11, 39, 2, 6		50%	68%	NTC(6,29,14)+NTC(21,28,16)	67%	
0,6	1	17, 21, 18	40, 7, 25, 23, 38, 2, 28, 9, 32, 37, 6, 15, 34, 26, 12, 8, 10, 1	2,12	1/2 50%	17/19 89%	NTC(7,17,21)+NTC(8,26,30)+NTC(9,27,30)+ NTC(9,30,11)+NTC(18,30,26)	18/21 86%	C.25.
	2	21, 18, 20	7, 22, 26, 32, 13, 36, 9, 39, 8, 14, 42, 6, 23, 37, 25, 2, 31, 40	1,56	1/2 50%	14/19 74%	NTC(4,7,9)+NTC(6,13,8)+NTC(14,22,26)+ NTC(15,21,6)+NTC(16,28,25)	15/21 71%	C.26.
	3	21, 20, 18	22, 24, 10, 1, 15, 28, 38, 11, 23, 40, 36, 8, 9, 14, 2, 30, 33, 32	2,25	1/2 50%	14/19 74%	NTC(6,12,24)+NTC(9,19,13)+NTC(13,16,20)+ NTC(27,29,26)+NTC(29,32,15)	15/21 71%	C.27.
	4	21, 20, 18	9, 3, 25, 11, 5, 4, 33, 7, 14, 40, 8, 29, 2, 24, 16, 35, 38, 22	4,00	1/2 50%	18/19 95%	NTC(9,19,13)+NTC(13,16,20)+NTC(15,21,6)+ NTC(19,30,11)+NTC(27,29,26)	19/21 90%	C.28.
	5	21, 17, 18	36, 38, 3, 30, 39, 10, 4, 5, 2, 28, 8, 27, 32, 25, 29, 26, 9, 24	5,81	2/2 100%	17/19 89%	NTC(9,19,13)+NTC(9,30,11)+NTC(13,16,20)+ NTC(20,25,31)+NTC(21,25,20)	19/21 90%	C.29.
0,5	1	18, 21, 20	1, 2, 7, 29, 40, 6, 36, 15, 4, 27, 39, 37, 32, 34, 11, 25, 5, 35	1,71	1/2 50%	14/19 74%	NTC(1,24,28)+NTC(4,28,20)+NTC(5,29,32)+ NTC(10,16,19)+NTC(11,18,13)	15/21 71%	C.30.
	2	19, 20, 18	5, 25, 26, 35, 34, 16, 13, 37, 23, 40, 2, 3, 29, 6, 38, 11, 31, 15	2,39	2/2 100%	14/19 74%	NTC(3,12,27)+NTC(3,20,7)+NTC(4,15,12)+ NTC(15,19,21)+NTC(15,24,32)	16/21 76%	C.31.
	3	19, 21, 18	13, 40, 10, 15, 11, 9, 26, 27, 39, 24, 25, 28, 22, 1, 34, 7, 4, 14	2,86	1/2 50%	15/19 79%	NTC(4,28,22)+NTC(7,31,18)+NTC(14,18,7)+ NTC(14,30,19)+NTC(16,18,9)	16/21 76%	C.32.
	4	18, 20, 19	15, 23, 5, 42, 3, 39, 22, 1, 40, 6, 8, 14, 26, 16, 2, 34, 13, 38	1,22	1/2 50%	16/19 84%	NTC(4,14,22)+NTC(7,20,23)+NTC(12,15,1)+ NTC(20,30,28)+NTC(22,31,20)	17/21 81%	C.33.
	5	21, 18, 20	3, 42, 2, 4, 37, 33, 11, 12, 29, 25, 36, 5, 32, 6, 1, 10, 39, 28	5,60	2/2 100%	16/19 84%	NTC(1,24,28)+NTC(1,28,22)+NTC(4,24,10)+ NTC(4,28,20)+NTC(4,32,25)	18/21 86%	C.34.
Bez obc	1	19, 20, 18	5, 25, 26, 35, 34, 16, 13, 37, 23, 40, 2, 3, 29, 6, 38, 11, 31, 15	3,00	1/2 50%	17/19 89%	NTC(1,12,15)+NTC(8,32,23)+NTC(16,26,17)+ NTC(17,23,22)+NTC(28,32,17)	18/21 86%	C.35.
	2	17, 20, 19	36, 31, 4, 16, 12, 1, 29, 35, 39, 40, 10, 38, 24, 25, 42, 2, 14, 9	1,23	1/2 50%	18/19 95%	NTC(7,11,26)+NTC(8,32,23)+NTC(16,26,17)+ NTC(16,32,17)+NTC(17,26,15)	19/21 90%	C.36.
	3	18, 17, 19	2, 10, 40, 38, 11, 34, 7, 26, 42, 24, 39, 16, 32, 13, 31, 15, 6, 3	1,62	1/2 50%	18/19 95%	NTC(7,32,16)+NTC(8,17,22)+NTC(8,32,23)+ NTC(16,26,17)+NTC(19,26,30)	19/21 90%	C.37.
	4	21, 20, 19	37, 5, 4, 23, 14, 10, 8, 12, 9, 32, 30, 25, 26, 11, 2, 27, 6, 38	1,68	2/2 100%	16/19 84%	NTC(8,13,16)+NTC(9,27,17)+NTC(13,22,7)+ NTC(17,19,16)+NTC(23,31,20)	18/21 86%	C.38.
	5	17, 19, 18	5, 4, 22, 40, 9, 35, 3, 34, 11, 24, 15, 33, 12, 29, 31, 23, 26, 25	2,19	1/2 50%	18/19 95%	NTC(6,30,7)+NTC(8,32,23)+NTC(9,17,32)+ NTC(16,27,32)+NTC(17,19,32)	19/21 90%	C.39.

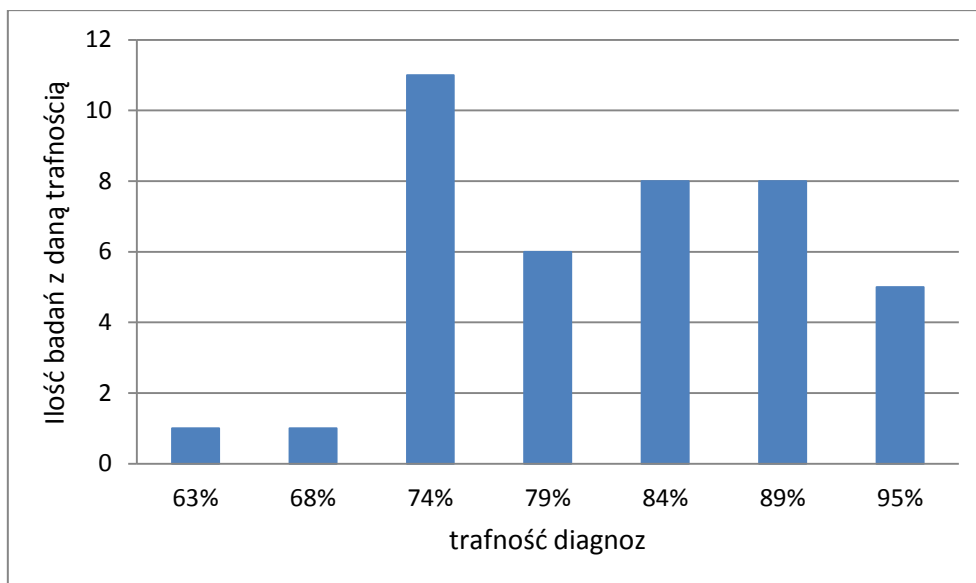
Na podstawie wyników zaprezentowanych w tabeli 5.5. sporządzono 3 histogramy (Rys. 5.14 Rys. 5.15 i Rys. 5.16) obrazujące kolejno rozkład trafności diagnoz dla łożysk uszkodzonych, nieuszkodzonych oraz ogólnego poziomu trafności diagnoz dla łożysk spoza zestawu do wyboru WD przy wprowadzonym uszkodzeniu elementów tocznych. Każde badanie diagnostyczne zostało przeprowadzone dla innego zestawu łożysk, wybieranych spośród łożysk nie biorących udziału w procedurze wyboru komponentów, oraz dla innego wskaźnika diagnostycznego.

Ze względu na to, że diagnostyce poddawano jedynie 2 łożyska uszkodzone spoza zestawu do wyboru WD trafność diagnoz wynosiła 0%, 50% lub 100%. Najczęściej powtarzała się trafność na poziomie 50% - 29 przypadków. W 9 przypadkach trafność wynosiła 100%, natomiast w dwóch przypadkach – przy obciążeniu 0,9kW i 1,0kW diagnozy okazały się nietrafne. Średnia trafność diagnoz dla łożysk uszkodzonych wynosi około 59%, zatem ponad połowa przypadków została zdiagnozowana poprawnie.



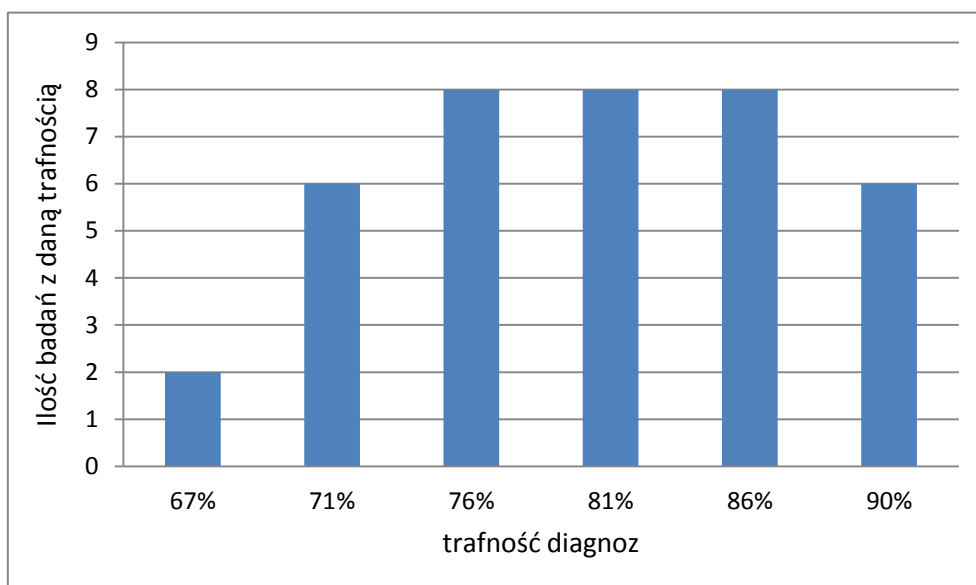
Rys. 5.14. Rozkład trafności diagnoz dla łożysk z uszkodzeniem elementów tocznych

Trafność diagnoz łożysk nieuszkodzonych zgodnie z Rys. 5.15 w większości rozpatrywanych przypadków wynosiła 74% i tylko w dwóch przypadkach była niższa – 63% i 68% dla obciążeń odpowiednio: 1,0 i 0,7 kW. Średnia trafność diagnoz dla łożysk nieuszkodzonych wynosi ok. 82%.



Rys. 5.15. Rozkład trafności diagnoz dla łóżek z nieuszkodzonymi elementami tocznymi

Trafność diagnoz dla łóżek spoza zestawu do wyboru WD wynosi od 67% do 90%. Przy czym minimalną trafność w tym przedziale osiągnęły tylko dwa przypadki: dla pomiarów przy obciążeniu 1,0 kW i 0,7 kW. Średnia trafność diagnoz dla łóżek spoza zestawu do wyboru WD wynosi ok. 80%. Wartość kryterium Fischera zawiera się w przedziale od 1,0348 do 5,8076, natomiast średnia wartość kryterium Fishera wynosi 2,31.

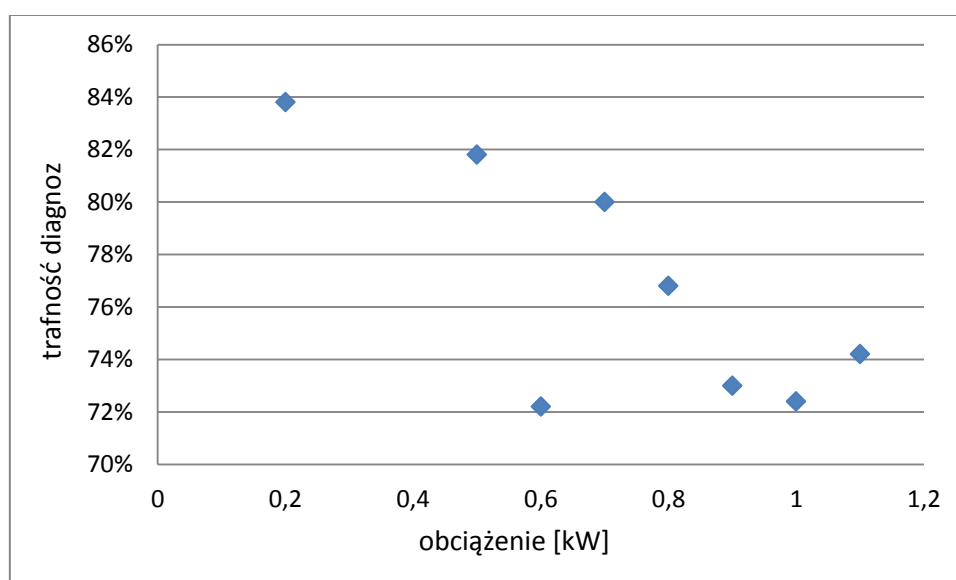


Rys. 5.16. Rozkład trafności diagnoz dla łóżek spoza zestawu do wyboru WD przy wprowadzonym uszkodzeniu elementów tocznych

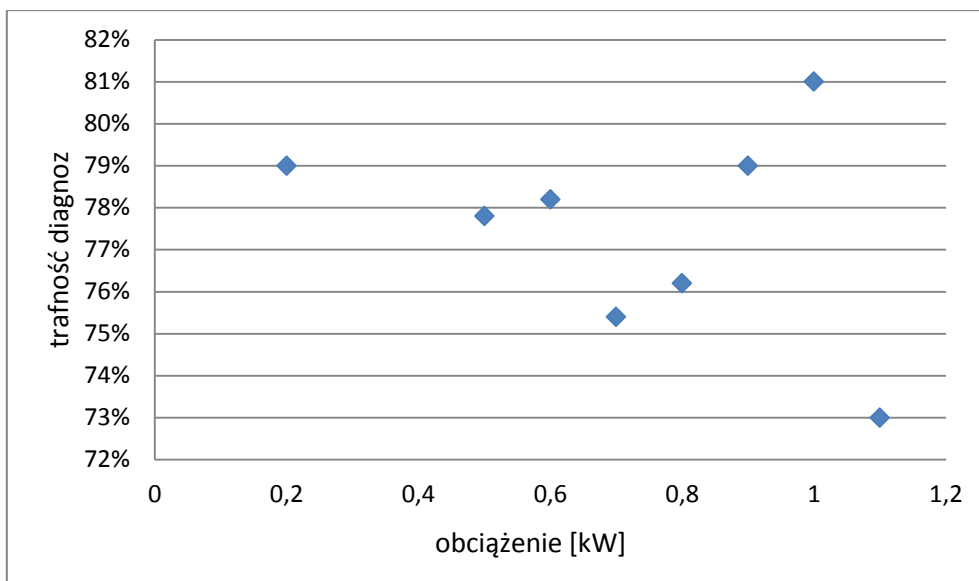
5.4.4 WPŁYW OBCIĄŻENIA NA TRAFNOŚĆ DIAGNOZ.

W literaturze [38] dotyczącej diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego metodą analizy widma prądu stojana stwierdzono zależność trafności diagnoz od obciążenia. Według tych badań trafność diagnoz jest odwrotnie proporcjonalna do obciążenia silnika. W związku z tym autor rozprawy zbadał czy zależność ta jest również słuszna dla metody potrójnej kowariancji.

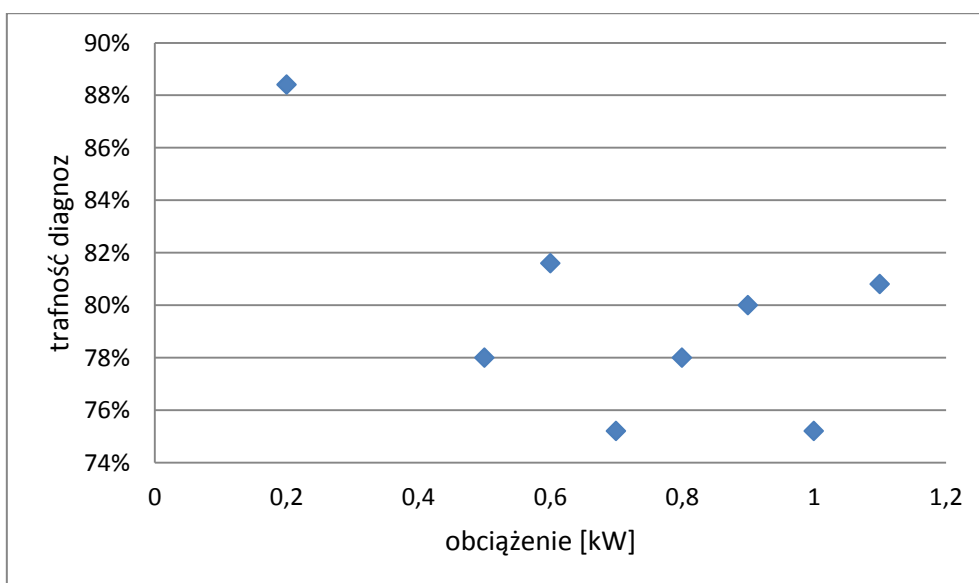
Poniżej przedstawiono wykresy zależności średniej trafności diagnoz łożysk spoza zestawu do wyboru WD od obciążenia dla diagnostyki łożysk przy badaniu uszkodzenia bieżni zewnętrznej, wewnętrznej oraz elementów tocznych łożyska. Średnią trafność uzyskano na podstawie średniej arytmetycznej pięciu wyników dla danego obciążenia. W zależności od uszkodzenia dane do obliczeń przyjęto z tabeli 5.3, 5.4 i 5.5.



Rys. 5.17. Trafność diagnoz dla poszczególnych obciążeń przy diagnostyce uszkodzenia bieżni zewnętrznej



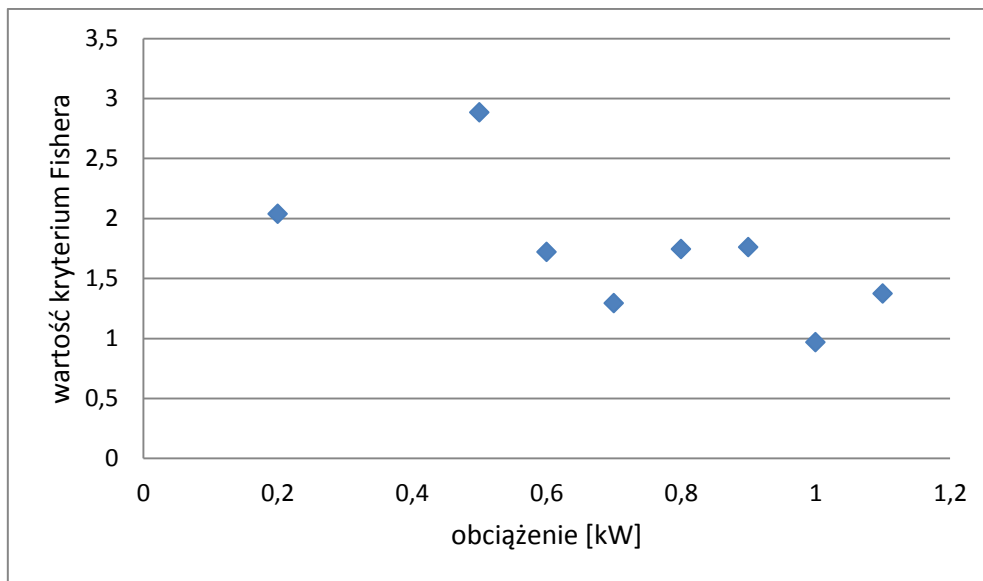
Rys. 5.18. Trafność diagnoz dla poszczególnych obciążeń przy diagnostyce uszkodzenia bieżni wewnętrznej



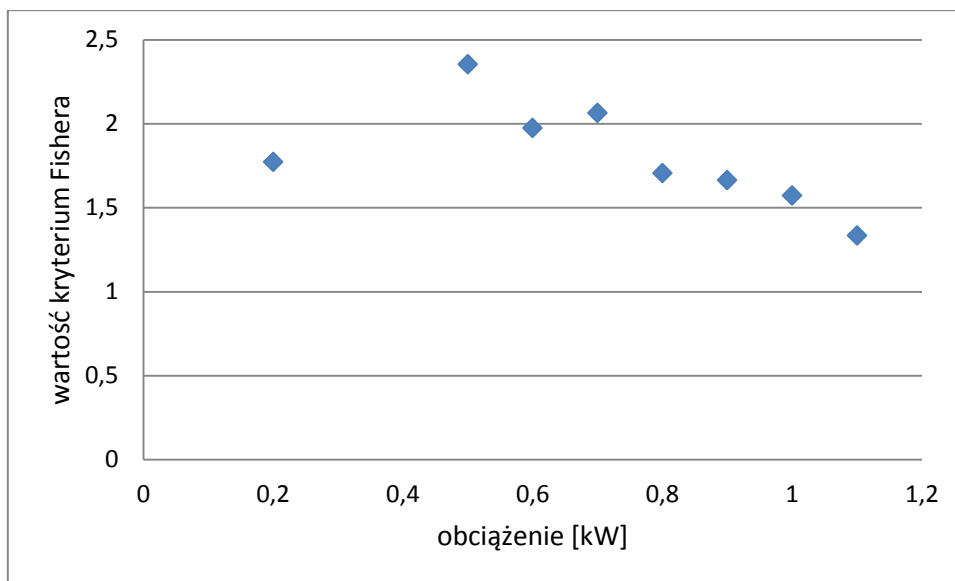
Rys. 5.19. Trafność diagnoz dla poszczególnych obciążeń przy diagnostyce uszkodzenia elementów tocznych

Analizując powyższe wykresy można wywnioskować, że przy badaniu uszkodzeń bieżni zewnętrznej trafność diagnoz jest wyraźnie wyższa przy niższych obciążeniach. Dla pozostałych typów uszkodzeń trafność diagnoz nie jest zależna w sposób jednoznaczny od obciążenia. Poziom trafności w dużej mierze zależy od wylosowanego zestawu do wyboru WD. Należy również zauważyć, że trafność diagnoz przedstawiona na wykresach jest średnią z pięciu trafności diagnoz, z których każda została określona dla innego wskaźnika diagnostycznego, jednakże przy pomocy tej samej metody.

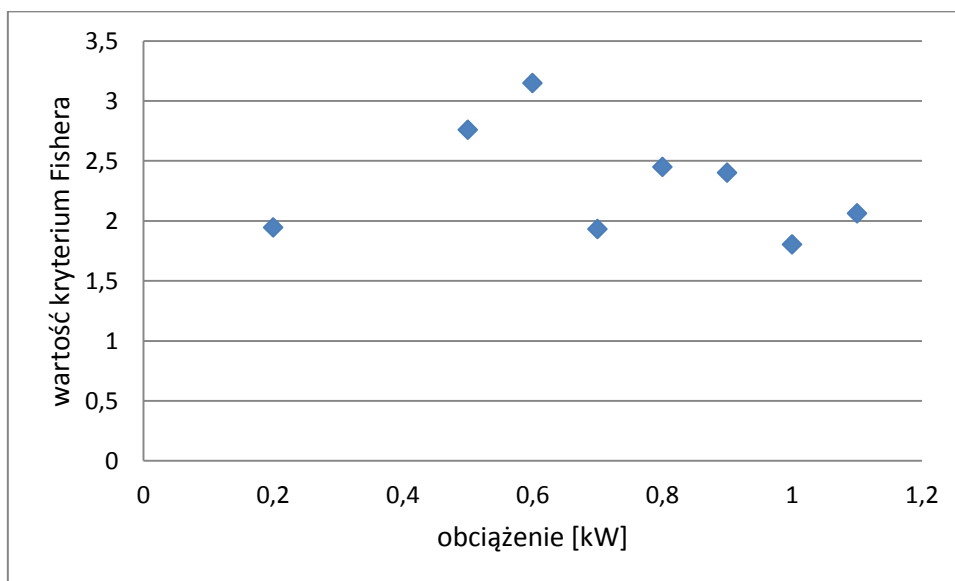
Przy diagnostyce uszkodzenia bieżni zewnętrznej największą trafność (około 84%) uzyskano dla silnika bez obciążenia, natomiast najmniejszą, (około 72%) dla obciążeń na poziomie 0,6 kW i 1,0 kW. Badania wykazały, że przy diagnostyce uszkodzeń bieżni wewnętrznej największą trafność, na poziomie 81% uzyskano przy obciążeniu 1 kW, natomiast najmniejszą, na poziomie 73% przy obciążeniu 1,1 kW. Jeśli chodzi o diagnostykę elementów tocznych to największą trafność – na poziomie 88% osiągnięto dla pomiarów wykonanych bez obciążenia, natomiast najmniejszą, na poziomie 75% dla obciążeń 0,7 kW i 1 kW.



Rys. 5.20. Wartość kryterium Fishera dla poszczególnych obciążeń przy diagnostyce uszkodzenia bieżni zewnętrznej



Rys. 5.21. Wartość kryterium Fishera dla poszczególnych obciążeń przy diagnostyce uszkodzenia bieżni wewnętrznej



Rys. 5.22. Wartość kryterium Fishera dla poszczególnych obciążeń przy diagnostyce uszkodzenia bieżni wewnętrznej

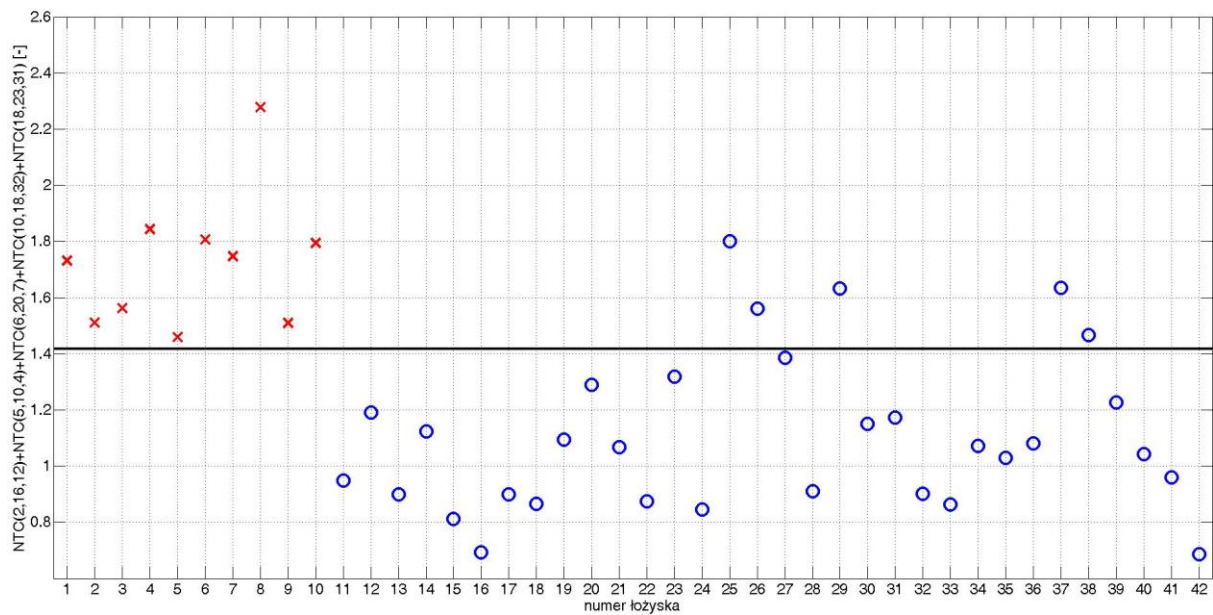
Ze względu na stosunkowo niewielką liczbę przeprowadzonych pomiarów nie jest możliwe jednoznaczne określenie zależności pomiędzy obciążeniem a trafnością diagnoz. Na podstawie zrealizowanych badań można przypuszczać, że wyższa trafność diagnoz występuje przy niższym obciążeniu. Jednak w celu weryfikacji tej zależności należałoby przeprowadzić dokładniejszą statystykę uszkodzeń, która wymagałaby wykorzystania znacznie większej liczby obiektów do badań.

5.5 WYZNACZENIE WSKAŹNIKA DIAGNOSTYCZNEGO DO DALSZYCH BADAŃ

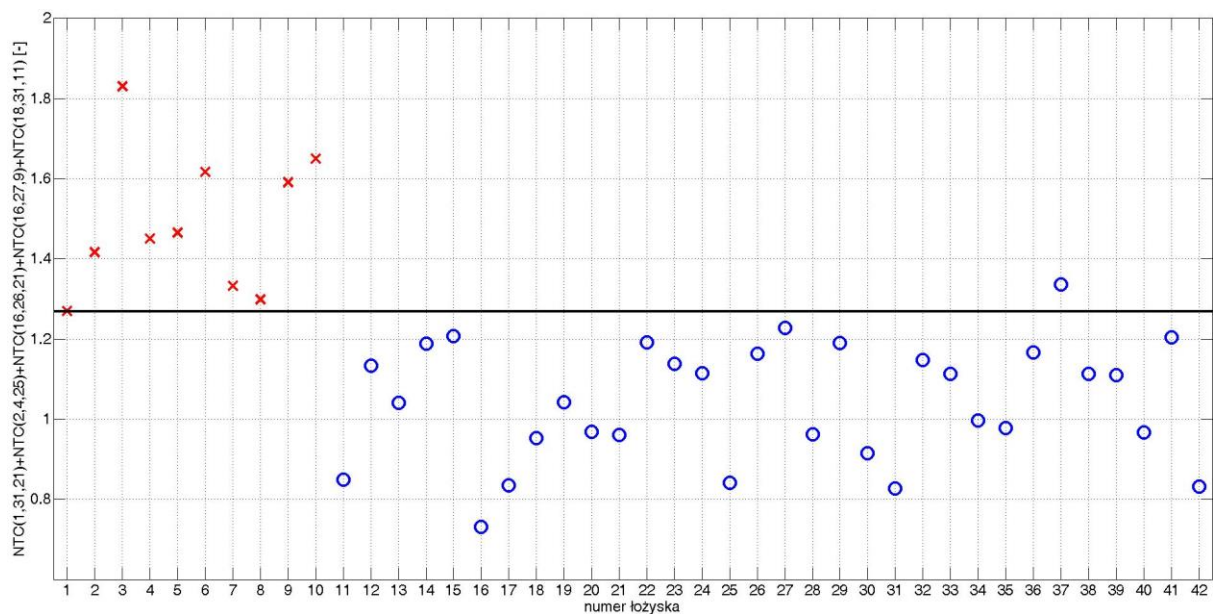
W badaniach nad prądową diagnostyką łożysk, których wyniki były dotychczas publikowane, autorzy opierali się na pomiarach, wykonywanych na kilku łożyskach. Rezultaty niniejszej pracy wskazują, że wyniki pomiarów na łożyskach o uszkodzeniach pozornie zbliżonych do siebie mogą się znacznie różnić. Dlatego też, aby móc sformułować ogólne wskaźniki diagnostyczne, potrzebne są badania na wielu egzemplarzach łożysk. W trakcie badań, wykonano pomiary prądu dla 42 łożysk (uszkodzonych i nieuszkodzonych) przy ośmiu stopniach obciążenia silnika. Uzyskane wyniki są, zdaniem autora, bardzo obiecujące, dlatego planowane są dalsze badania nad rozwojem przedstawionej metody. Kolejne prace wymagają badań na znacznie większej liczbie egzemplarzy łożysk oraz dla innych typów silników. Teoretycznie wskaźnik diagnostyczny wyznaczony na podstawie większej liczby danych powinien charakteryzować się większą trafnością diagnoz. W związku z tym autor rozprawy wyznaczył wskaźniki diagnostyczne przy wykorzystaniu wszystkich przeprowadzonych pomiarów. Wykorzystując do wyboru WD wszystkie dane nie ma możliwości weryfikacji uzyskanego WD, jednak jest to bardzo cenna wskazówka do dalszych badań.

Poniżej zamieszczono wyniki procedury wyboru komponentów przeprowadzonej dla wszystkich łożysk biorących udział w eksperymencie dla poszczególnych stopni obciążenia, z podziałem na rodzaje uszkodzeń (Rys. 5.23 – 5.46). Zamieszczone poniżej wyniki badań należy traktować jako wstęp do kolejnych badań nad tą metodą. Dalszy rozwój metody NTC należy rozpocząć od sprawdzenia trafności diagnoz WD uzyskanych przy użyciu wszystkich danych z prezentowanego eksperymentu. Aby to zrealizować konieczne jest wykonanie kolejnych pomiarów.

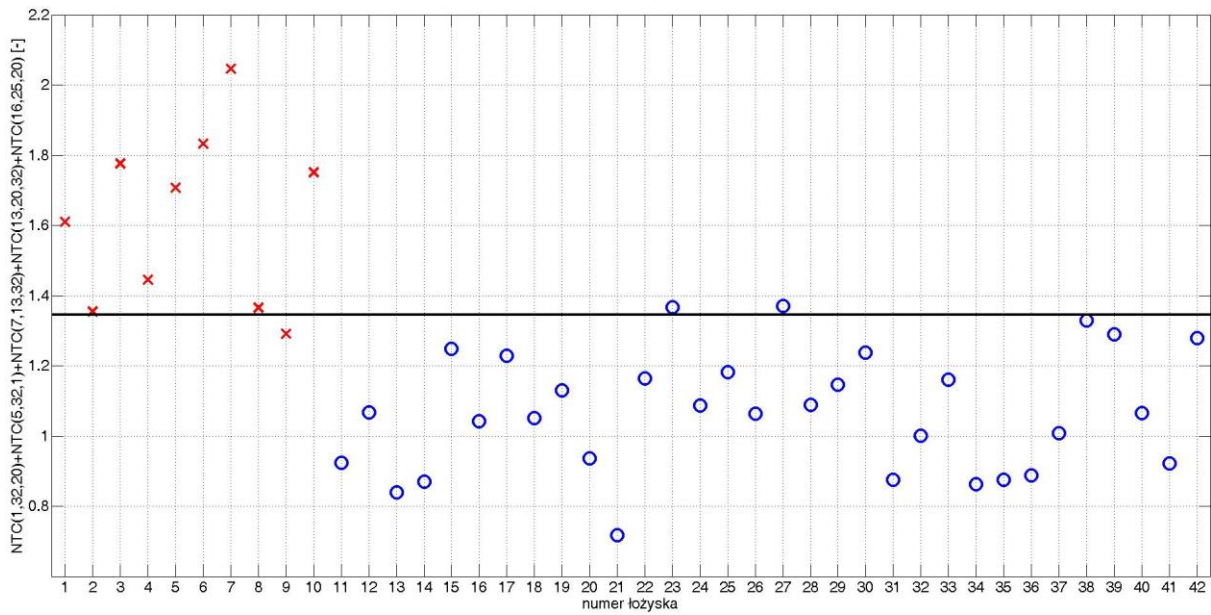
5.5.1 USZKODZENIA BIEŻNI ZEWNĘTRZNEJ



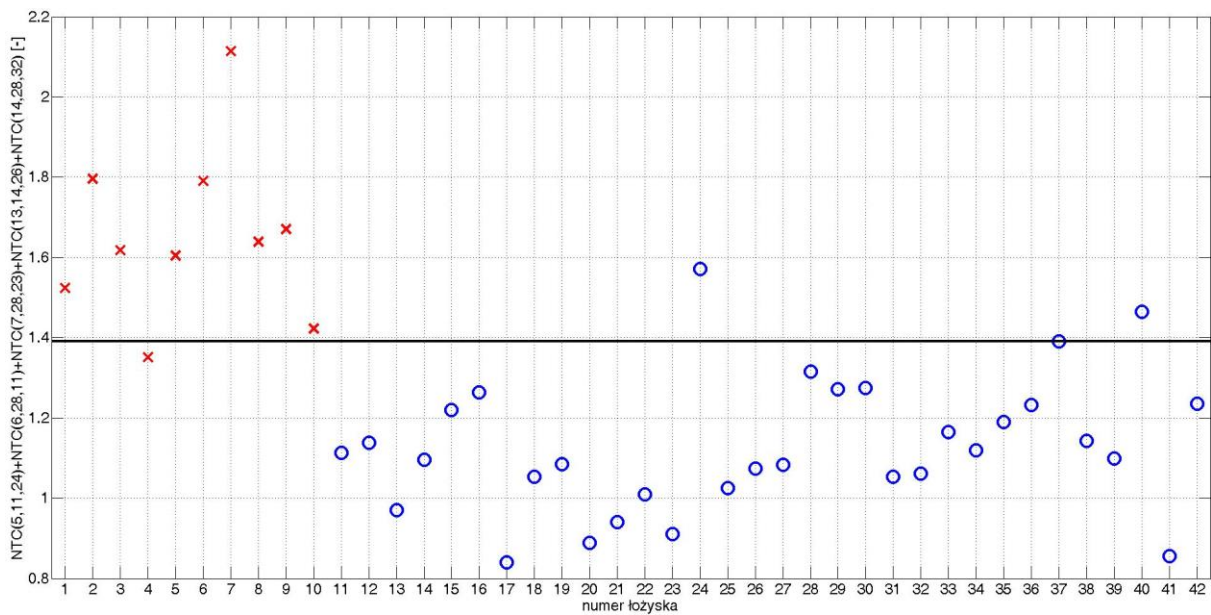
Rys. 5.23. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 1,1 kW



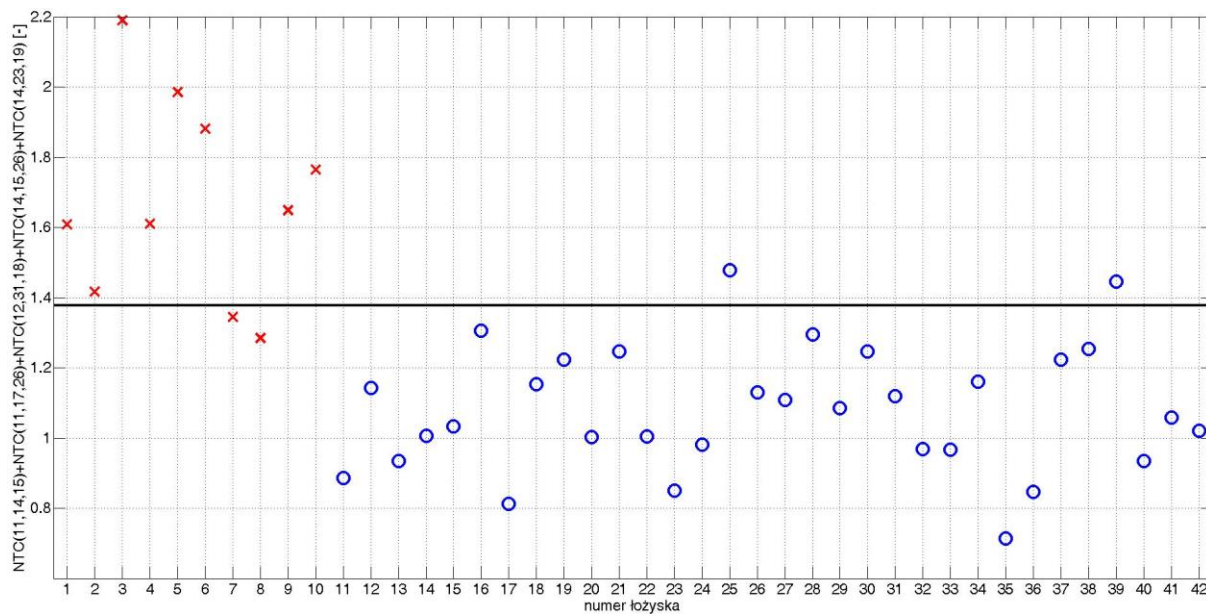
Rys. 5.24. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 1,0 kW



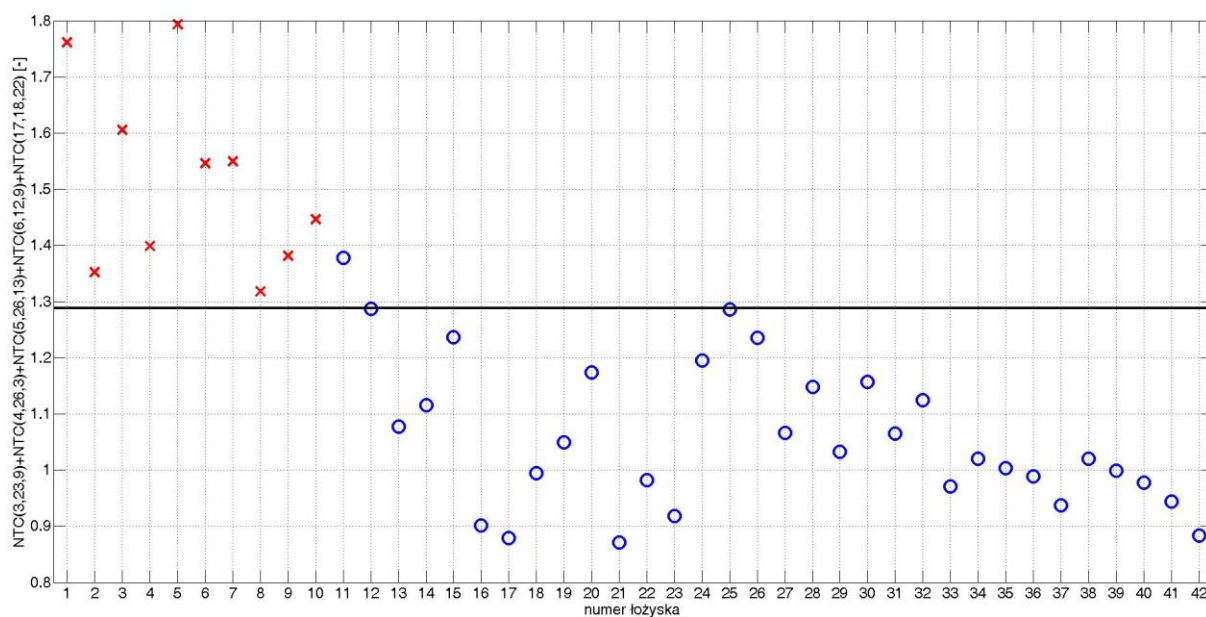
Rys. 5.25. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 0,9 kW



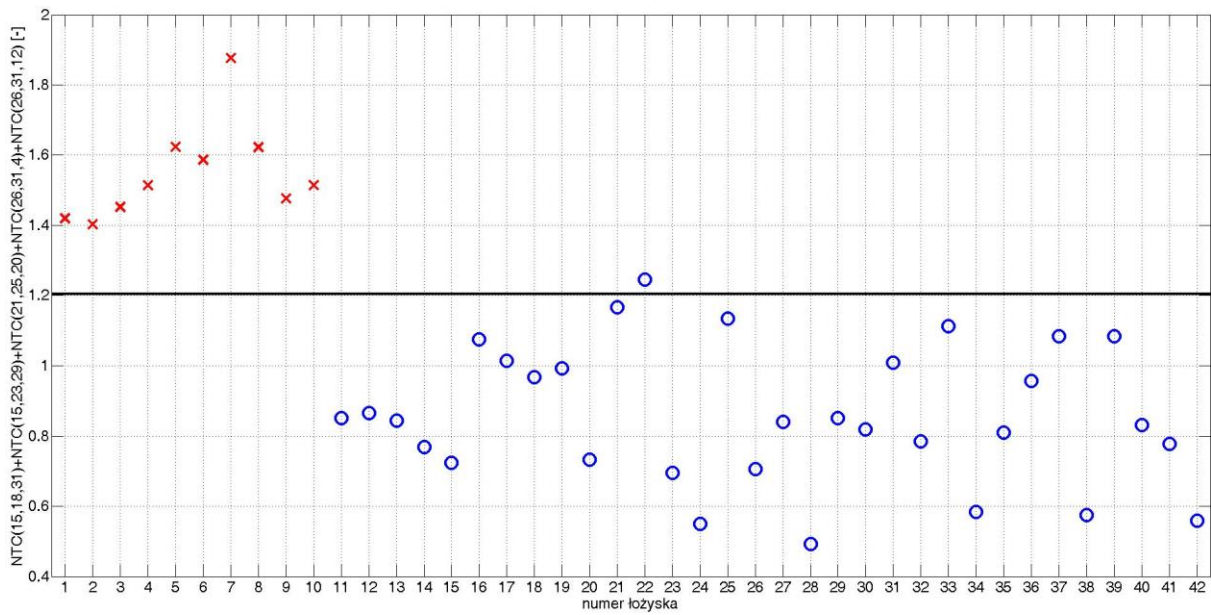
Rys. 5.26. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 0,8 kW



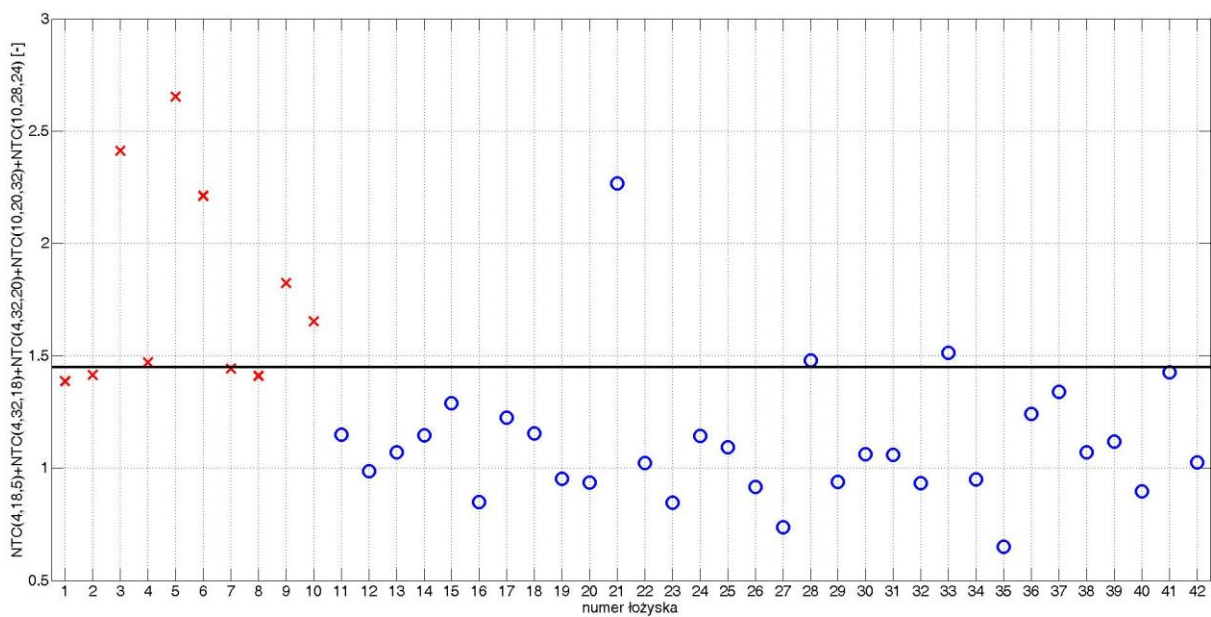
Rys. 5.27. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 0,7 kW



Rys. 5.28. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 0,6 kW

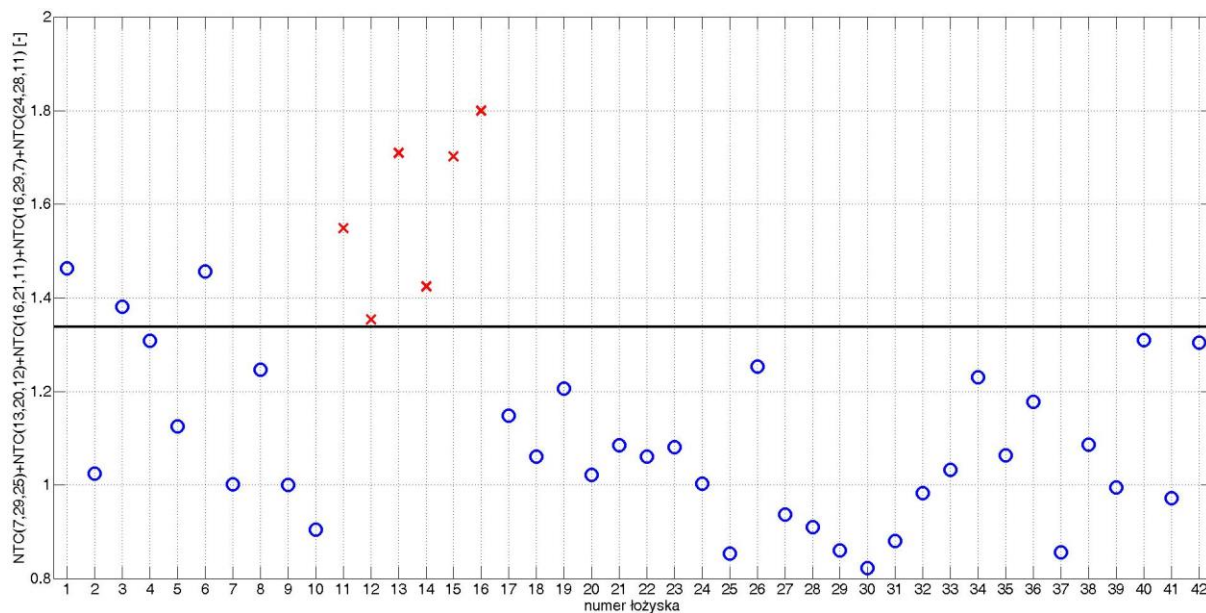


Rys. 5.29. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 0,5 kW

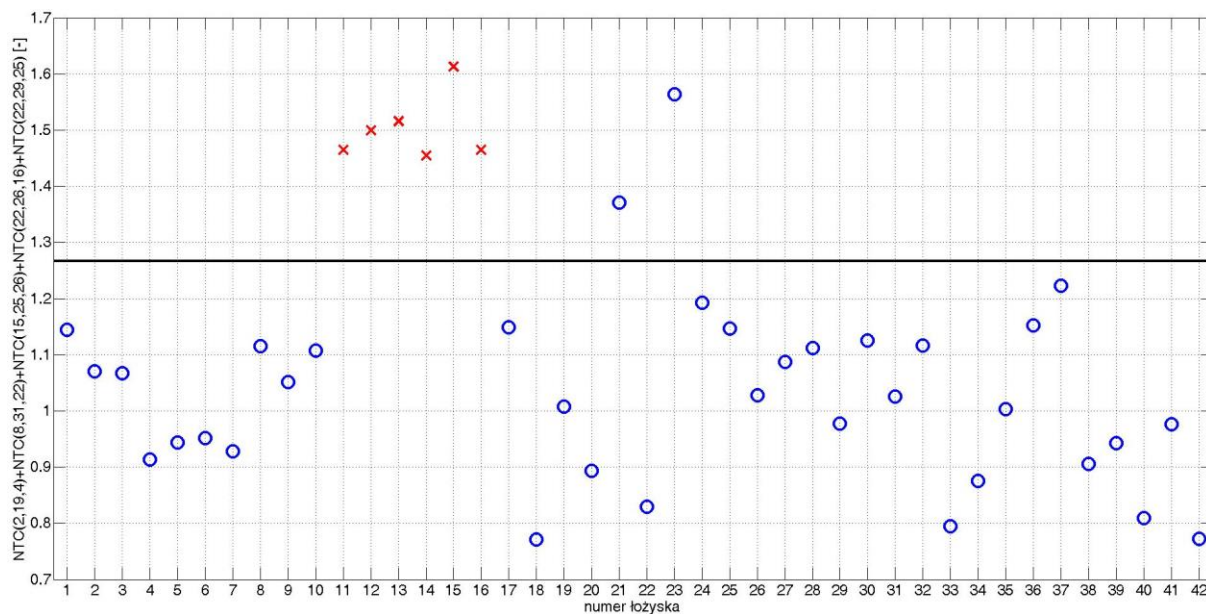


Rys. 5.30. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk bez obciążenia

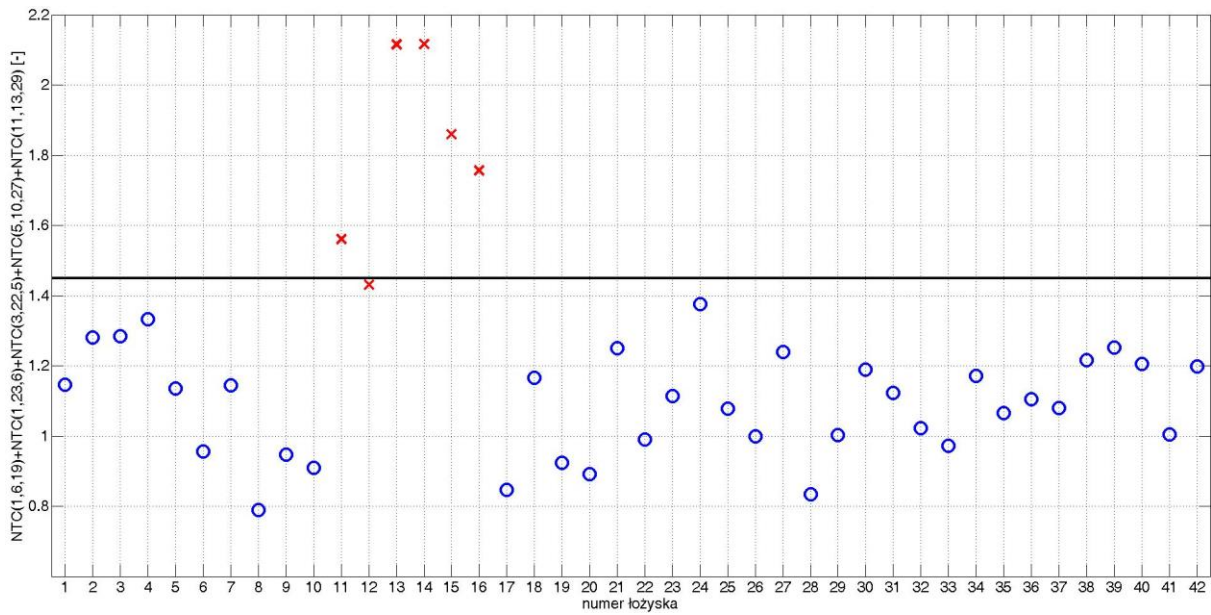
5.5.2 USZKODZENIA BIEŻNI WEWNĘTRZNEJ



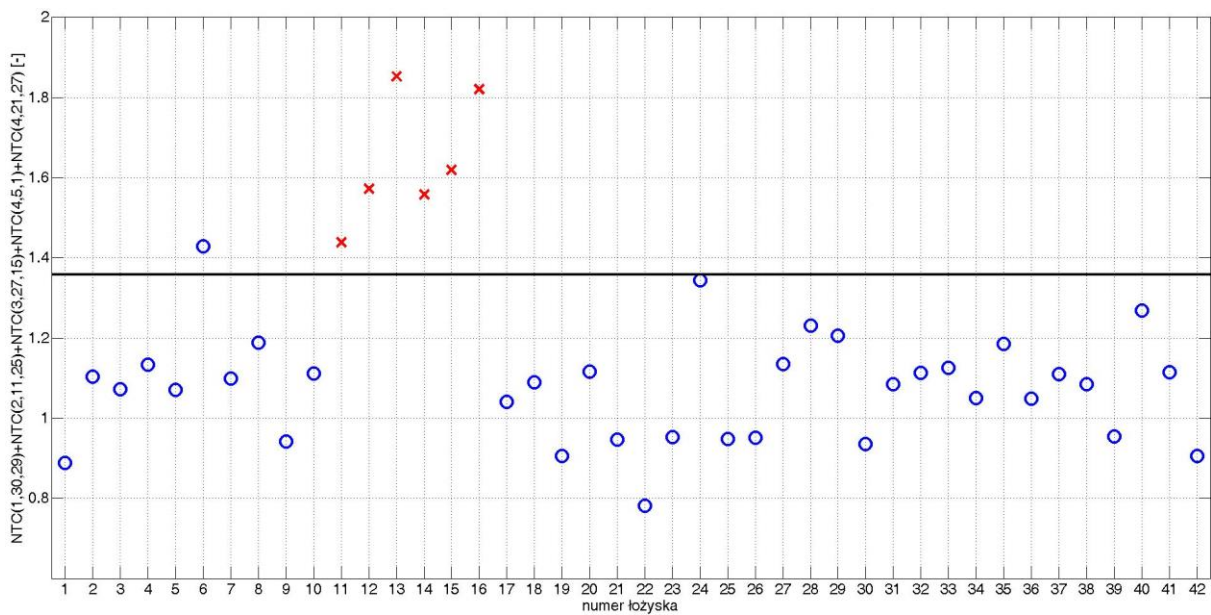
Rys. 5.31. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 1,1 kW



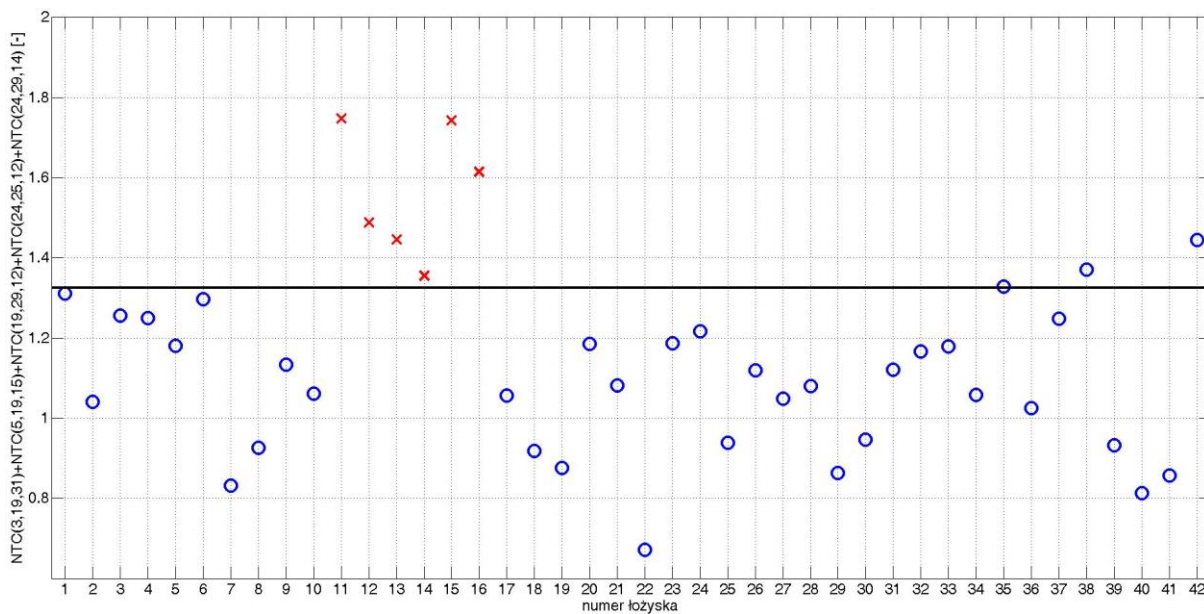
Rys. 5.32. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 1,0 kW



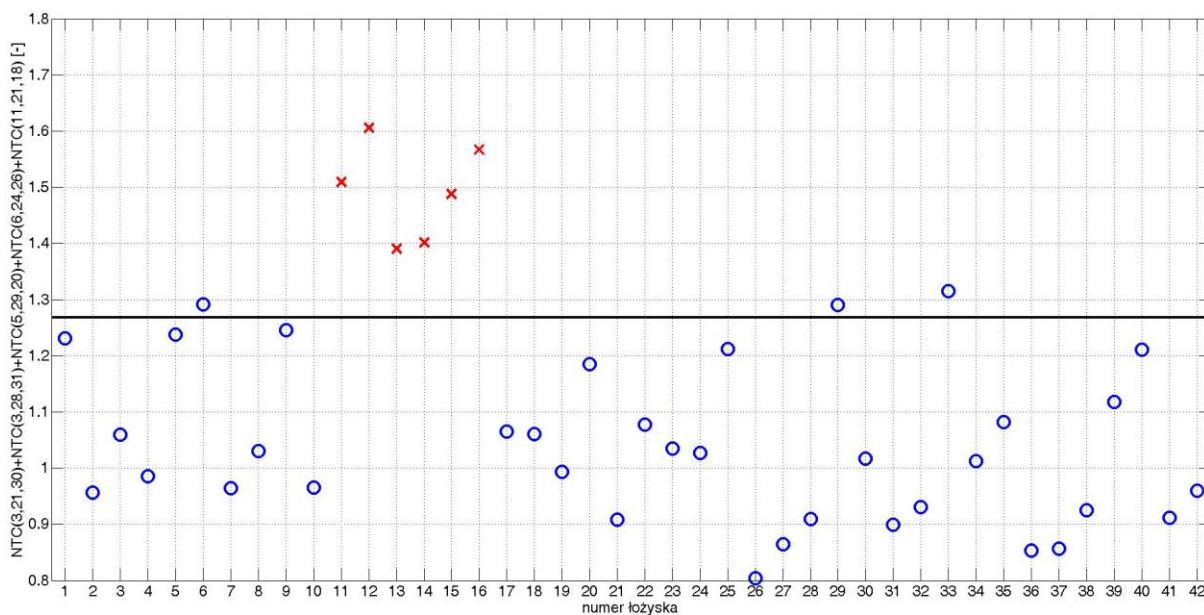
Rys. 5.33. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 0,9 kW



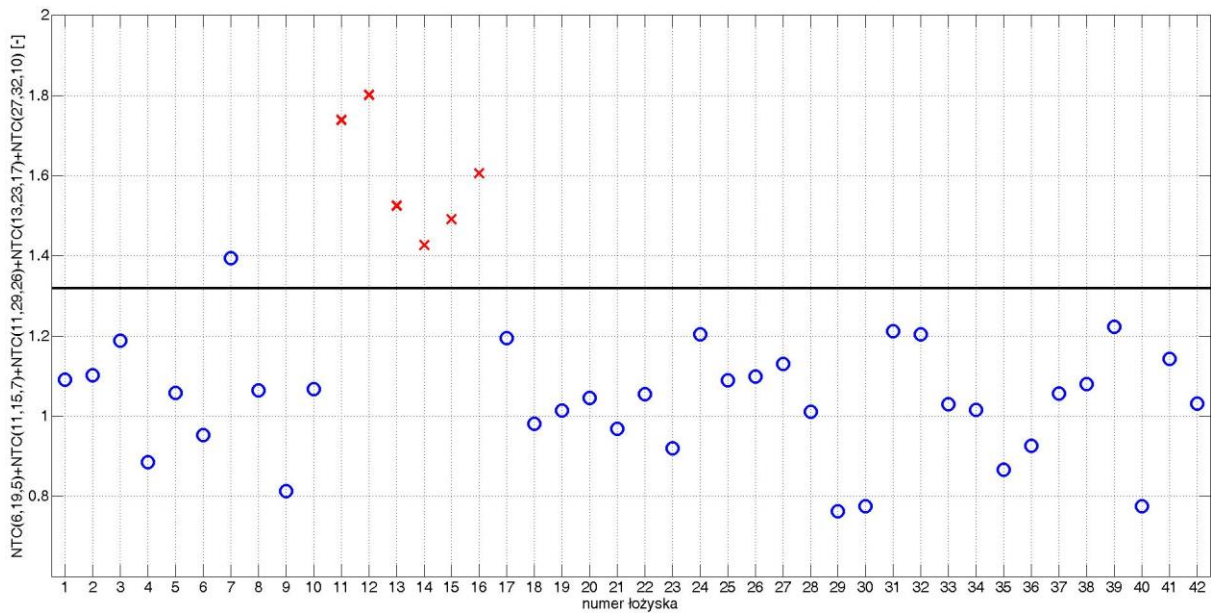
Rys. 5.34. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 0,8 kW



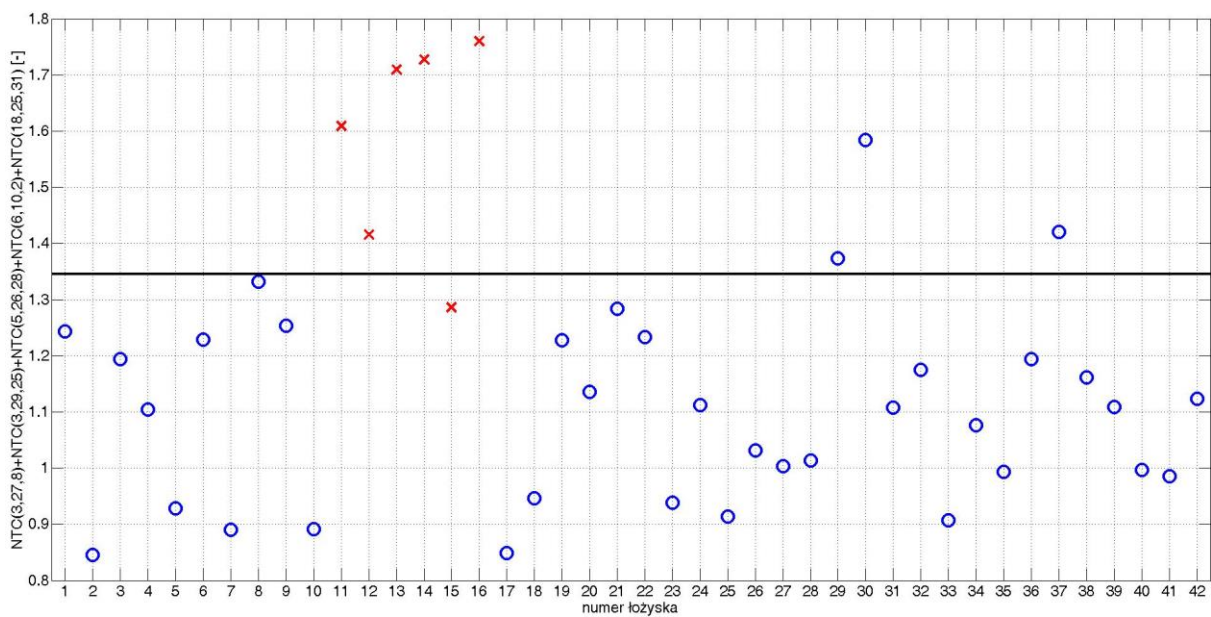
Rys. 5.35. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 0,7 kW



Rys. 5.36. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 0,6 kW

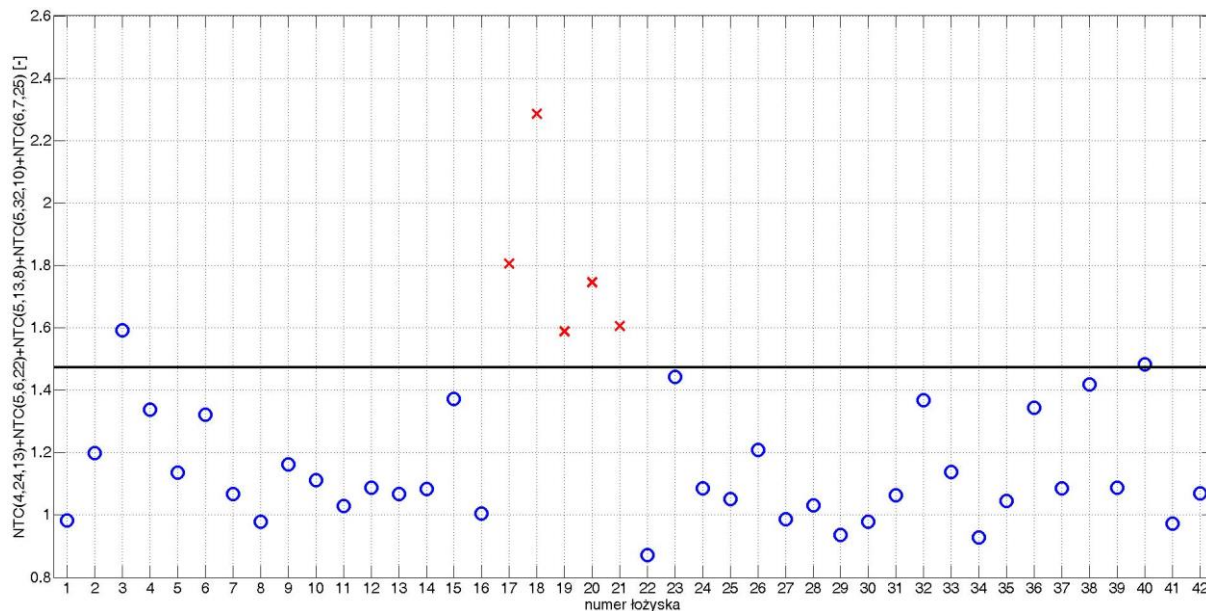


Rys. 5.37. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 0,5 kW

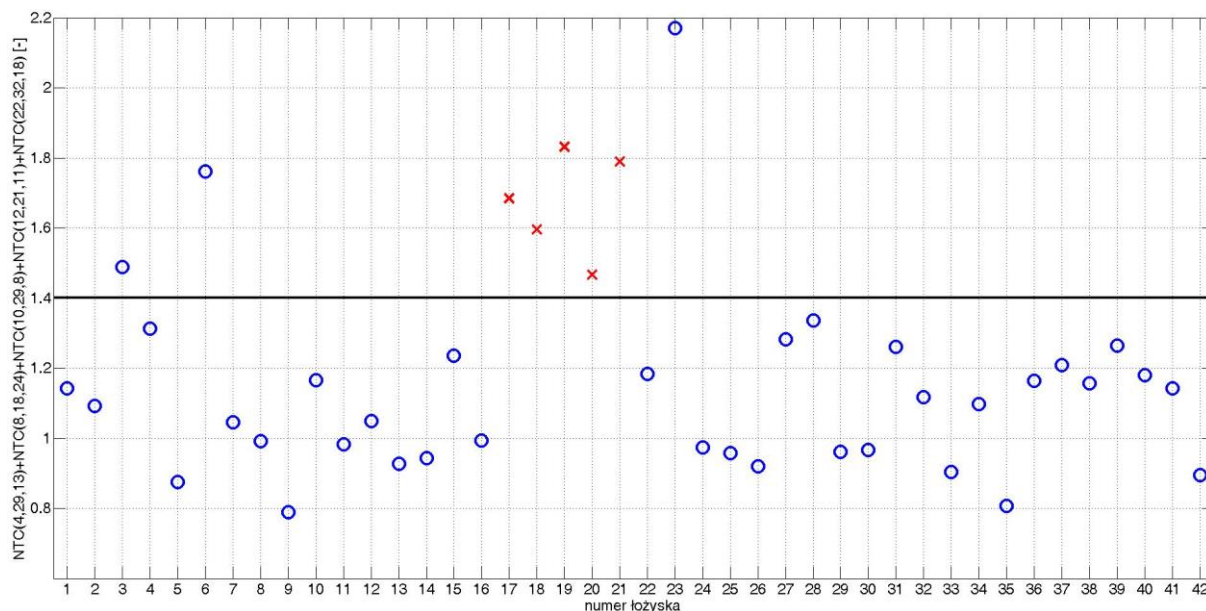


Rys. 5.38. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk bez obciążenia

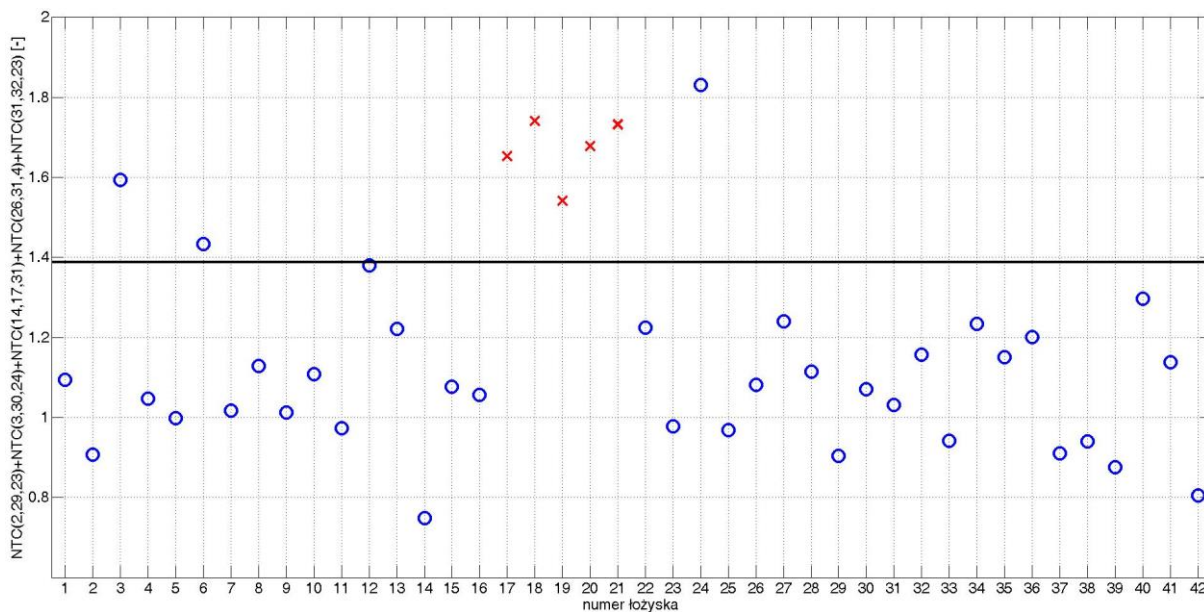
5.5.3 USZKODZENIA ELEMENTÓW TOCZNYCH



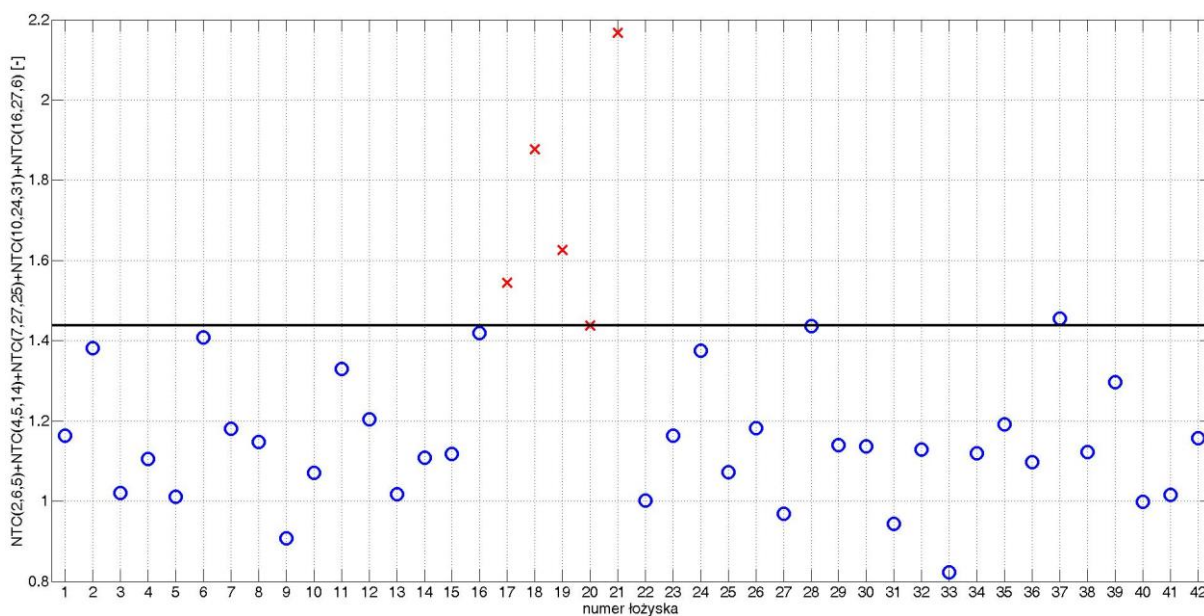
Rys. 5.39. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 1,1 kW



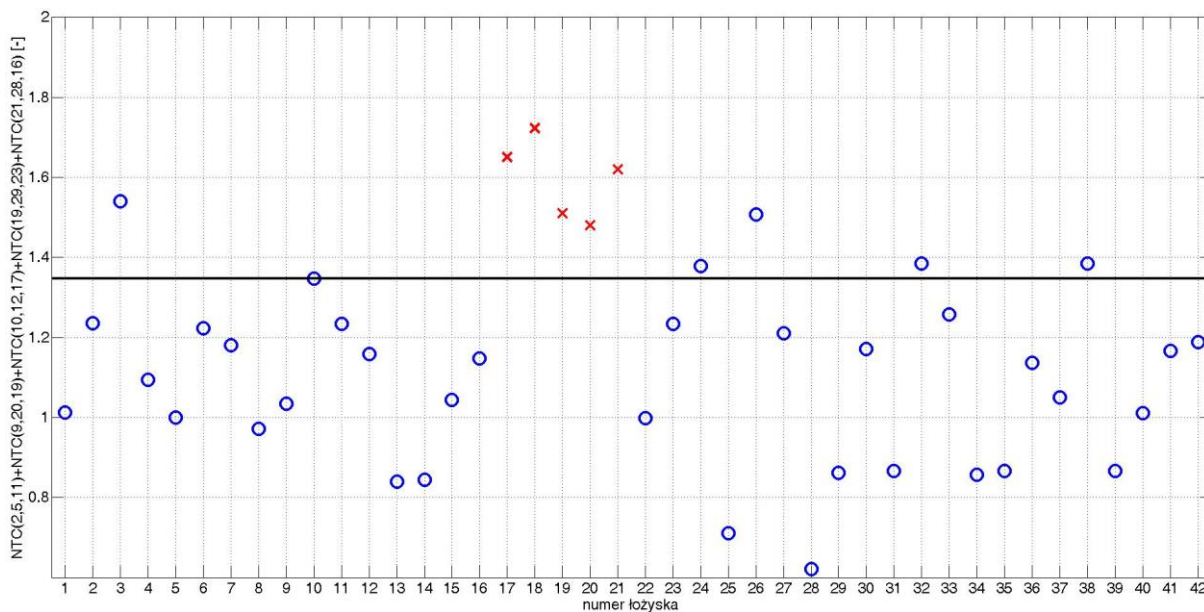
Rys. 5.40. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 1,0 kW



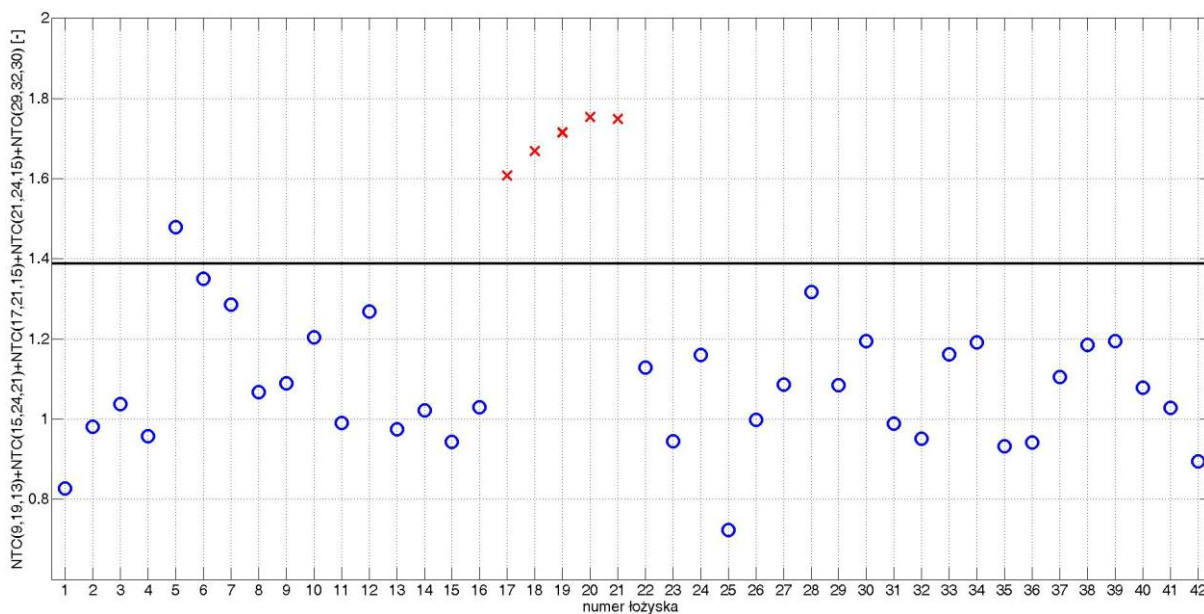
Rys. 5.41. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 0,9 kW



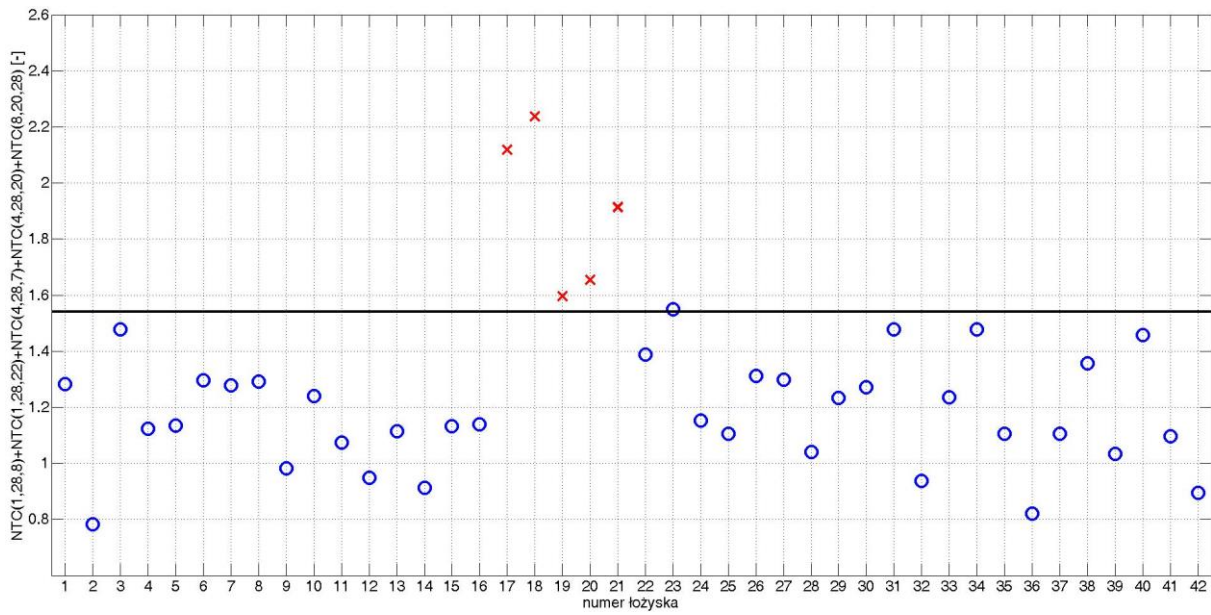
Rys. 5.42. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 0,8 kW



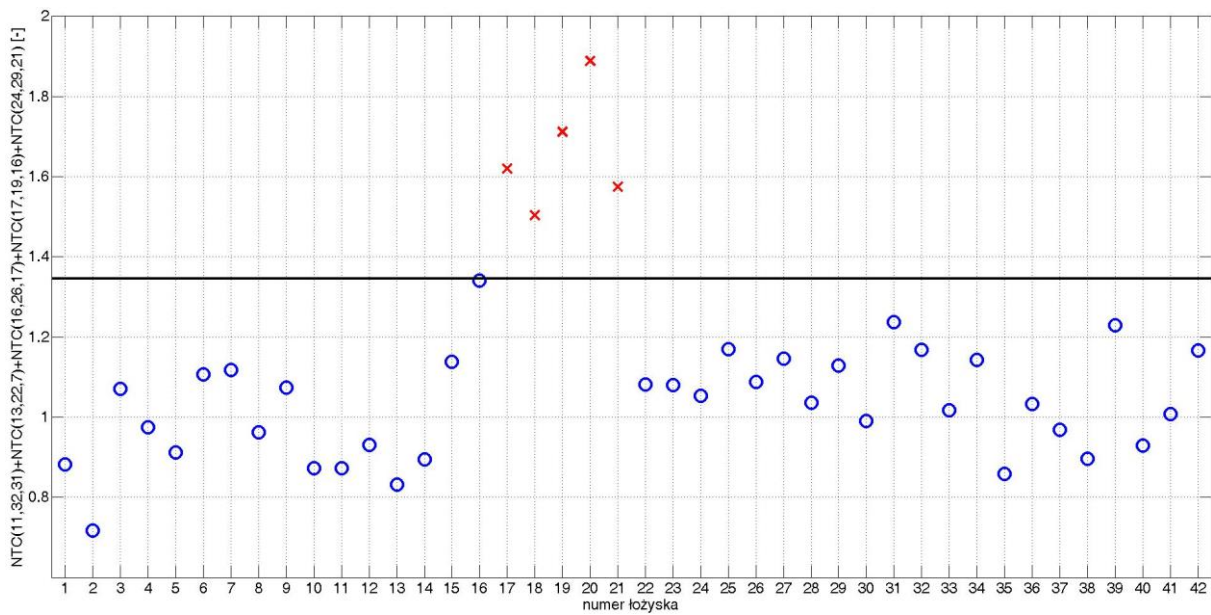
Rys. 5.43. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 0,7 kW



Rys. 5.44. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 0,6 kW



Rys. 5.45. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk przy obciążeniu 0,5 kW



Rys. 5.46. Wartość wskaźnika diagnostycznego wyznaczonego na podstawie wszystkich łożysk bez obciążenia

5.5.4 ZESTAWIENIE WYNIKÓW

Poniżej zamieszczono tabelę 5.6., zawierającą zestawienie wskaźników diagnostycznych uzyskanych w wyniku procedury wyboru komponentów, przeprowadzonej dla wszystkich łożysk biorących udział w eksperymencie.

Tabela 5.6. Zestawienie wyników procedury wyboru komponentów przeprowadzonej dla wszystkich łożysk biorących udział w eksperymencie

Rodzaj uszkodzenia	Obciążenie silnika [kW]	Wartość Kryterium Fishera	Wskaźnik diagnostyczny	Numer rysunku
Uszkodzenie bieżni zewnętrznej	1,1	2,76	NTC(2,16,12)+NTC(5,10,4)+NTC(6,20,7)+ NTC(10,18,32)+NTC(18,23,31)	5.23.
	1,0	3,73	NTC(1,31,21)+NTC(2,4,25)+NTC(16,26,21)+ NTC(16,27,9)+NTC(18,31,11)	5.24.
	0,9	3,30	NTC(1,32,20)+NTC(5,32,1)+NTC(7,13,32)+ NTC(13,20,32)+NTC(16,25,20)	5.25.
	0,8	3,66	NTC(5,11,24)+NTC(6,28,11)+NTC(7,28,23)+ NTC(13,14,26)+NTC(14,28,32)	5.26.
	0,7	3,03	NTC(11,14,15)+NTC(11,17,26)+NTC(12,31,18)+ NTC(14,15,26)+NTC(14,23,19)	5.27.
	0,6	4,60	NTC(3,23,9)+NTC(4,26,3)+NTC(5,26,13)+ NTC(6,12,9)+NTC(17,18,22)	5.28.
	0,5	8,15	NTC(15,18,31)+NTC(15,23,29)+NTC(21,25,20)+ NTC(26,31,4)+NTC(26,31,12)	5.29.
	Bez obciążenia	1,50	NTC(4,18,5)+NTC(4,32,18)+NTC(4,32,20)+ NTC(10,20,32)+NTC(10,28,24)	5.30.
Uszkodzenie bieżni wewnętrznej	1,1	4,17	NTC(7,29,25)+NTC(13,20,12)+NTC(16,21,11)+ NTC(16,29,7)+NTC(24,28,11)	5.31.
	1,0	7,21	NTC(2,19,4)+NTC(8,31,22)+NTC(15,25,26)+ NTC(22,26,16)+NTC(22,29,25)	5.32.
	0,9	5,06	NTC(1,6,19)+NTC(1,23,6)+NTC(3,22,5)+ NTC(5,10,27)+NTC(11,13,29)	5.33.
	0,8	7,45	NTC(1,30,29)+NTC(2,11,25)+NTC(3,27,15)+ NTC(4,5,1)+NTC(4,21,27)	5.34.
	0,7	4,03	NTC(3,19,31)+NTC(5,19,15)+NTC(19,29,12)+ NTC(24,25,12)+NTC(24,29,14)	5.35.
	0,6	7,51	NTC(3,21,30)+NTC(3,28,31)+NTC(5,29,20)+ NTC(6,24,26)+NTC(11,21,18)	5.36.
	0,5	7,57	NTC(6,19,5)+NTC(11,15,7)+NTC(11,29,26)+ NTC(13,23,17)+NTC(27,32,10)	5.37.
	Bez obciążenia	3,43	NTC(3,27,8)+NTC(3,29,25)+NTC(5,26,28)+ NTC(6,10,2)+NTC(18,25,31)	5.38.

Uszkodzenie elementów tocznych	1,1	4,02	NTC(4,24,13)+NTC(5,6,22)+NTC(5,13,8)+ NTC(5,32,10)+NTC(6,7,25)	5.39.
	1,0	3,29	NTC(4,29,13)+NTC(8,18,24)+NTC(10,29,8)+ NTC(12,21,11)+NTC(22,32,18)	5.40.
	0,9	6,26	NTC(2,29,23)+NTC(3,30,24)+NTC(14,17,31)+ NTC(26,31,4)+NTC(31,32,23)	5.41.
	0,8	3,11	NTC(2,6,5)+NTC(4,5,14)+NTC(7,27,25)+ NTC(10,24,31)+NTC(16,27,6)	5.42.
	0,7	4,44	NTC(2,5,11)+NTC(9,20,19)+NTC(10,12,17)+ NTC(19,29,23)+NTC(21,28,16)	5.43.
	0,6	14,40	NTC(9,19,13)+NTC(15,24,21)+NTC(17,21,15)+ NTC(21,24,15)+NTC(29,32,30)	5.44.
	0,5	4,57	NTC(1,28,8)+NTC(1,28,22)+NTC(4,28,7)+ NTC(4,28,20)+NTC(8,20,28)	5.45.
	Bez obciążenia	10,01	NTC(11,32,31)+NTC(13,22,7)+NTC(16,26,17)+ NTC(17,19,16)+NTC(24,29,21)	5.46.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zarówno przy uszkodzeniu bieżni zewnętrznej jak bieżni wewnętrznej najwyższe wartości kryterium Fishera występują dla pomiarów przy obciążeniu 0,5 kW i wynoszą one odpowiednio: 8,15 i 7,57. Najwyższa wartość kryterium Fishera dla badania uszkodzeń elementów tocznych wystąpiła przy obciążeniu 0,6 kW i wyniosła 14,40. W oparciu o przedstawione wyniki, można przyjmować, że najlepsze rezultaty przy użyciu tej metody można uzyskać przy obciążeniach na poziomie 50% obciążenia znamionowego, dla badanego silnika jest to 0,5 i 0,6 kW.

6 PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań wynika, że możliwe jest diagnozowanie łożysk silnika indukcyjnego poprzez wykrywanie nieliniowych zmian składowych charakterystycznych prądu, związanych z poszczególnymi elementami łożyska. Można zatem uznać, że postawiona teza została udowodniona. Podczas badań zebrano pomiary dla 21 łożysk uszkodzonych oraz 21 łożysk nieuszkodzonych. Zakres badań obejmował opracowanie procedury wyznaczania wskaźnika diagnostycznego oraz testowanie uzyskanych wskaźników diagnostycznych. W pracy przedstawiono wyniki badań dla 3 typów uszkodzeń: bieżni zewnętrznej, bieżni wewnętrznej oraz elementów tocznych łożysk. Średnia trafność diagnoz dla poszczególnych przypadków wyniosła kolejno: 77%, 77% oraz 80%. Pomimo wyznaczenia różnych wskaźników diagnostycznych średnia trafność diagnoz dla wszystkich 3 badanych uszkodzeń wyniosła 78%, co potwierdza skuteczność zastosowanej metody. Wśród przeglądu dobranej przez autora literatury, w żadnej pozycji dotyczącej zastosowania w diagnostyce łożysk metody prądowej, nie odnaleziono informacji na temat procentowej trafności diagnoz prezentowanych metod. Autorzy publikacji skupiają się raczej na udowodnieniu skuteczności metody dla konkretnego przypadku, ewentualnie pokazują uzyskane rezultaty dla kilku przypadków. Nie ma zatem możliwości porównania otrzymanych przez autora wyników z rezultatami opisywanymi w literaturze.

W dotychczasowych opracowaniach na temat prądowej diagnostyki łożysk autorzy opierali się na założeniu, że uszkodzenia łożysk powodują powstawanie dodatkowych harmonicznymi w widmie prądu o częstotliwościach powiązanych z rodzajem uszkodzenia. Dodatkowych harmonicznymi poszukiwano w widmie uśrednionym, co przynosi pozytywne rezultaty przy założeniu, że składowe nie są odkształcone. W niniejszej rozprawie autor zakłada, że te dodatkowe składowe w widmie prądu mogą być odkształcone, a stopień odkształcenia tych składowych może być symptomem diagnostycznym dla oceny stanu łożysk. Jako narzędzie do oceny stopnia odkształcenia harmonicznymi związanych z uszkodzeniem wybrano metodę znormalizowanej potrójnej kowariancji. Przeprowadzone badania symulacyjne wykazały, że wynik NTC nie jest zależny od amplitudy składowej diagnostycznej, pozwala natomiast uzyskać informację o stopniu jej odkształcenia. Badania eksperymentalne wykazały, że odkształcenie składowych diagnostycznych widma prądu może być wykorzystane jako symptom diagnostyczny dla różnych uszkodzeń łożysk silnika indukcyjnego.

Na podstawie badań przeprowadzonych w rozdziale 5.5 można stwierdzić, iż NTC jest bardzo obiecującym wskaźnikiem diagnostycznym. Badania te polegały na wyznaczeniu wskaźników diagnostycznych na podstawie wszystkich zebranych pomiarów. Ze względu na to, że do badań wykorzystano wszystkie pomiary, nie ma możliwości przeprowadzenia weryfikacji wyników

uzyskanych w tym badaniu. Skłania to do przeprowadzenia kolejnych badań z wykorzystaniem większej liczby łożysk, co umożliwiłoby walidację otrzymanych w rozdziale 5.5 wskaźników diagnostycznych. Dla wyznaczonych w tym rozdziale wskaźników diagnostycznych najwyższe kryteria Fischera uzyskano dla obciążeń 0,5 oraz 0,6 kW bez względu na rodzaj uszkodzenia. Na podstawie tych wyników można przypuszczać, że dla tej metody najlepsze rezultaty można uzyskać przy około 50% obciążenia znamionowego.

Stopień uszkodzeń wprowadzonych do badanych łożysk był stosunkowo niewielki, zatem zdaniem autora uzyskana trafność diagnoz na poziomie około 80% jest bardzo dobrym wynikiem. Dla porównania, dobrze opracowane i szeroko stosowane metody wibracyjne osiągają trafności diagnoz na poziomie około 90%. Porównując zasadę działania NTC do dotychczas badanych metod prądowych, metoda NTC powinna być bardziej skuteczna w wykrywaniu uszkodzeń we wczesnej fazie rozwoju. Uzyskane rezultaty są bardzo obiecujące, jednak, zdaniem autora, można uzyskać jeszcze lepsze poprzez wydłużenie czasu pomiaru. Rozwój opisanej metody i przebadanie jej działania na większej liczbie łożysk powinno dać bardzo duże szanse na wykorzystanie tej metody w przemyśle.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] Ciszewski T., Swędrowski L., Wołoszyk M., Ziółko M.: *Porównanie wyników badań diagnostycznych łożysk silnika indukcyjnego poprzez pomiary wibracji i prądu stojana*, Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, 2012.
- [2] Corne B., Vervisch B., Debruyne C., Knockaert J., Desmet J.: *Comparing MCSA with Vibration Analysis in order to detect Bearing Faults - A Case Study*, 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Coeur d'Alene, ID, 10-13.05.2015, p. 1366 – 1372.
- [3] Dybowski P., Elawgali S. S. H.: *Diagnostyka silnika indukcyjnego klatkowego – wykrywanie niecentryczności*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 2/2015 (106).
- [4] Dzwonkowski A.: *Pomiary mocy chwilowej w diagnostyce łożysk silników indukcyjnych*, PAK vol. 57, nr 12/2011, s. 1589-1591.
- [5] Dzwonkowski A., Swędrowski L.: *Motor Bearing Diagnostics Performed by Means of Laser Vibrometer, Diagnostics for Electric Machines*, IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED), Bologna, 05-08.09.2011, p. 482 – 486.
- [6] Ewert P., Kowalski C.T.: *Neuronowy detektor uszkodzeń łożysk tocznych*, Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe nr 92/2011, s. 205-210.
- [7] Ewert P., Kowalski C.T.: *Ocena skuteczności wykrywania uszkodzeń elementów konstrukcyjnych łożysk tocznych w silnikach indukcyjnych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały nr 30/2010, s. 291-302.
- [8] Fackrell J. W., White P. R., Hammond J. K., Pinnington R. J.: *The Interpretation of the bispectra of vibration signals*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 9, Issue 3, May 1995, p. 267–274.
- [9] Fidali M.: *Ultradźwięki w diagnostyce i eksploatacji łożysk tocznych*, Utrzymanie ruchu 1/2015, s. 56-61.
- [10] Frosini L., Bassi E.: *Stator Current and Motor Efficiency as Indicators for Different Types of Bearing Faults in Induction Motors*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, Issue 1, 17.07.2009, p. 244-251.
- [11] Frosini L., Magnaghi M., Albin A., Magrotti G.: *A new diagnostic instrument to detect generalized roughness in rolling bearings for induction motors*, IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Guarda, 1-4.09.2015, p. 239-245.
- [12] Gelman L., Petrunin I.: *The new multidimensional time/multi-frequency transform for higher order spectral analysis*, Multidimensional Systems and Signal Processing, Vol. 18, Issue 4, December 2007, p. 317–325.

- [13] Gelman L., Petrunin I. Komoda J.: *The new chirp-Wigner higher order spectra for transient signals with any known nonlinear frequency variation*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 24, Issue 2, February 2010, p. 567–571.
- [14] Gupta L.A., Peroulis D.: *Wireless Temperature Sensor for Condition Monitoring of Bearings Operating Through Thick Metal Plates*, IEEE Sensors Journal, Vol. 13, Issue 6, June 2013, p. 2292-2298.
- [15] Immovilli F., Cocconcelli M., Bellini A., Rubini R.: *Detection of Generalized-Roughness Bearing Fault by Spectral-Kurtosis Energy of Vibration or Current Signals*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 11, November 2009, p. 4710-4717.
- [16] Kiciński W.: *Dyskretne przekształcenie kosinusowe – nowe narzędzie w przetwarzaniu sygnałów pomiarowych*, PAK 2007, nr 9bis, s. 115-118.
- [17] Klimowski M.: *Diagnostyka łożysk tocznych silników elektrycznych przy wykorzystaniu metody analizy częstotliwościowej oraz metody detekcji obwiedni*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 2/2014 (102), s. 157-163.
- [18] Kokociński J.: *Wibroakustyczne badania węzłów łożyskowych*, Instytut Energetyki Oddział Techniki Ciepłej „ITC” w Łodzi:
http://www.kierunekenergetyka.pl/Resources/art/5405/bmp_50a9f30cf1709.pdf
 (stan na 09.09.2015).
- [19] Kowalski C.T., Orłowska-Kowalska T.: *Bearing fault monitoring using neural networks*, The 2001 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives. SDEMPED 2001, Grado, Italy, September 1-3, p. 313-317.
- [20] Krawczuk M., Biereg K., Doliński Ł.: *Projektowanie urządzeń elektromechanicznych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2006.
- [21] Laboratorium Kontroli Jakości firmy Complex: *Zasady montażu i demontażu łożysk*, Inżynieria & Utrzymanie Ruchu Zakładów Przemysłowych, 19.05.2009.
- [22] Lau Enzo C. C., Ngan H. W.: *Detection of Motor Bearing Outer Raceway Defect by Wavelet Packet Transformed Motor Current Signature Analysis*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 59, No. 10, October 2010, p. 2683-2690.
- [23] Materiały prasowe firmy SKF: *Uszkodzenia łożysk i ich przyczyny, Część I*, Przegląd Mechaniczny, zeszyt 10/2011.
- [24] Materiały prasowe firmy SKF: *Uszkodzenia łożysk i ich przyczyny, Cz. II, Przyczyny przedeksplatacyjne i eksploatacyjne*, Przegląd Mechaniczny, nr 11/2011.
- [25] Materiały prasowe firmy SKF: *Uszkodzenia łożysk i ich przyczyny, Część III*, Przegląd Mechaniczny, zeszyt 12/2011.

- [26] Materiały prasowe firmy SKF: *Uszkodzenia łożysk i ich przyczyny, Część IV, Eksploatacyjne przyczyny uszkodzeń*, Przegląd Mechaniczny, zeszyt 1/2012.
- [27] Materiały prasowe firmy SKF: *Uszkodzenia łożysk i ich przyczyny, Część V*, Przegląd Mechaniczny, zeszyt 2/2012.
- [28] Materiały Zakładu Inżynierii Systemów, Instytut Automatyki, Politechniki Śląskiej: <http://e-zipk.ia.polsl.pl/bearings/index.php?action=teoria03> (stan na 11.05.2015).
- [29] Morek R., Rostłowski A.: *Łożyska-wiadomości podstawowe*, Inżynieria & Utrzymanie Ruchu Zakładów Przemysłowych, 01.03.2007.
<http://www.utrzymanieruchu.pl/menu-gorne/arttykul/article/lozyska-wiadomosci-podstawowe/> (stan na 14.09.2015).
- [30] Pawlak M.: *Zastosowanie analizy sygnałów akustycznych do wykrywania uszkodzeń wirników i łożysk w silnikach indukcyjnych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 92/2011.
- [31] Pineda-Sanchez M., Puche-Panadero R., Riera-Guasp M., Perez-Cruz J., Roger-Folch J., Pons-Llinares J., Climente-Alarcon V., Antonino-Daviu J. A.: *Application of the Teager–Kaiser Energy Operator to the Fault Diagnosis of Induction Motors*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 28, no. 4, December 2013, p. 1036-1044.
- [32] Poradnik CX Bearings: http://e-katalog.home.pl/cx_bearings/poradnik.php?gr=2&pod=4&sub=5 (stan na 09.09.2015).
- [33] Poradnik CX Bearings:
http://e-katalog.home.pl/cx_bearings/poradnik.php?gr=5&pod=17&sub=4 (stan na 12.09.2015).
- [34] Poradnik CX Bearings:
http://e-katalog.home.pl/cx_bearings/poradnik.php?gr=5&pod=17&sub=5 (stan na 09.09.2015).
- [35] Radkowski S., Smalko Z., Pietak A., Woropay M.: *Use of bispectral Analysis in condition Monitoring of Machinery*, Third European Workshop on Structural Health Monitoring, 2006, p. 627-634.
- [36] Rzeszucinski P., Orman M., Pinto C. T., Tkaczyk A., Sulowicz M.: *A signal processing approach to bearing fault detection with the use of a mobile phone*, IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Guarda, 1-4.09.2015, p. 310-315.
- [37] Sobolewski A.: *Znaczenie harmonicznych żłobkowych w diagnostyce uszkodzeń klatki wirnika silnika indukcyjnego*, Diagnostyka '4 (40)/2006, s. 59-64.
- [38] Swędrowski L.: *Nowa metoda diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego, oparta na pomiarze i analizie widmowej prądu zasilającego*, Wydawnictwo PG, Gdańsk 2005, s. 14-24.

- [39] Swędrowski L.: *Pomiary w diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013.
- [40] Swędrowski L., Wołoszyk M., Ziółko M.: *Nowe rozwiązanie przetwornika prądu w diagnostyce prądowej silników indukcyjnych*, *Pomiary Automatyka Kontrola* vol. 57, nr 12, 2011, s. 1570 – 1572.
- [41] Wysogład B.: *Metody diagnozowania łożysk tocznych z zastosowaniem transformacji falkowej*, *DIAGNOSTYKA'29 – Artykuły główne*, s. 47-52.
- [42] Xin-min, T., Wan-Hai, C., Bao-Xiang, D., Yong, X., Han-Guang, D.: *A Novel Model of one-class Bearing Fault Detection using RNCS Algorithm based on HOS*, 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Harbin, 23-25.05.2007, p. 965-970.
- [43] Yang R., Kang J., Zhao J., Li J., Li H.: *A Case Study of Bearing Condition Monitoring Using SPM*, 2014 Prognostics and System Health Management Conference, Zhangjiajie, 24-27.08.2014, p. 695-698.
- [44] Zając M., Sułowicz M.: *Wykrywanie uszkodzeń łożysk tocznych z wykorzystaniem analizy falkowej*, Politechnika Krakowska, *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne* Nr 4/2014 (104), s. 279-285.
- [45] Zeari R., Ghanbarzadeh A., Attaran B., Moradi S.: *Artificial Neural Network Based Fault Diagnostics of Rolling Element bearings using Continuous Wavelet Transform*, 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA), Shiraz, 27-29.12.2011, p. 753 -758.
- [46] Zouzou S.E., Sahraoui M.: *Experimental Exploitation for the Diagnosis to the Induction Machine under a Bearing Fault – using MCSA*, 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Boumerdes, 13-15.12.2015, p. 1-4.

WYKAZ ZAŁĄCZNIKÓW

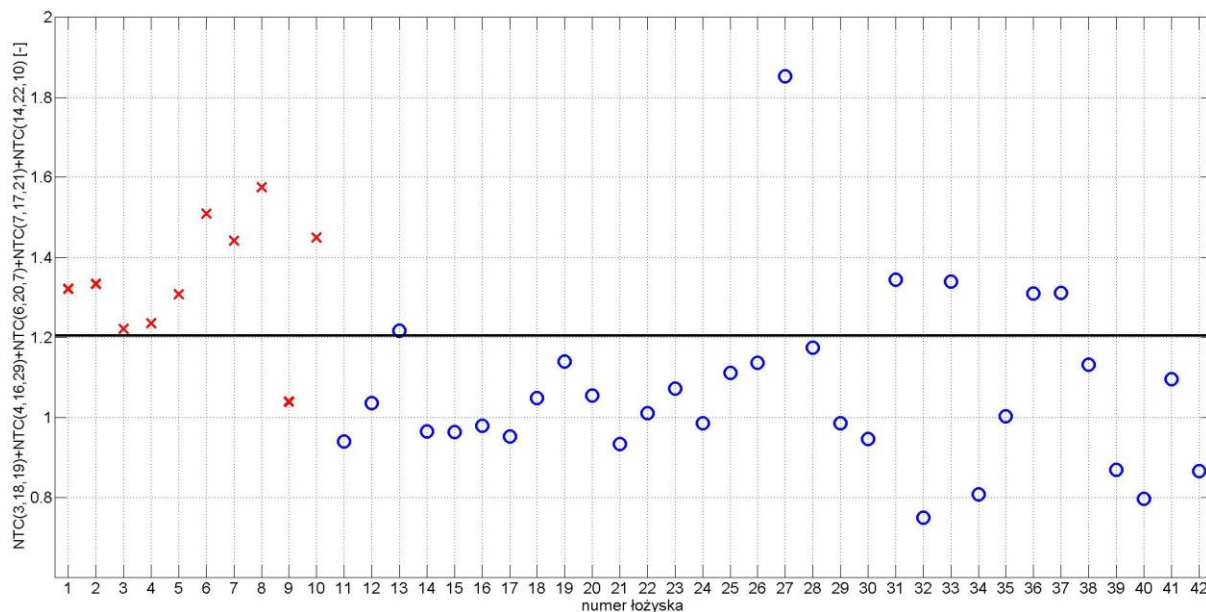
ZAŁĄCZNIK A – Wykresy wartości wskaźników diagnostycznych dla uszkodzeń bieżni zewnętrznej.

ZAŁĄCZNIK B – Wykresy wartości wskaźników diagnostycznych dla uszkodzeń bieżni wewnętrznej.

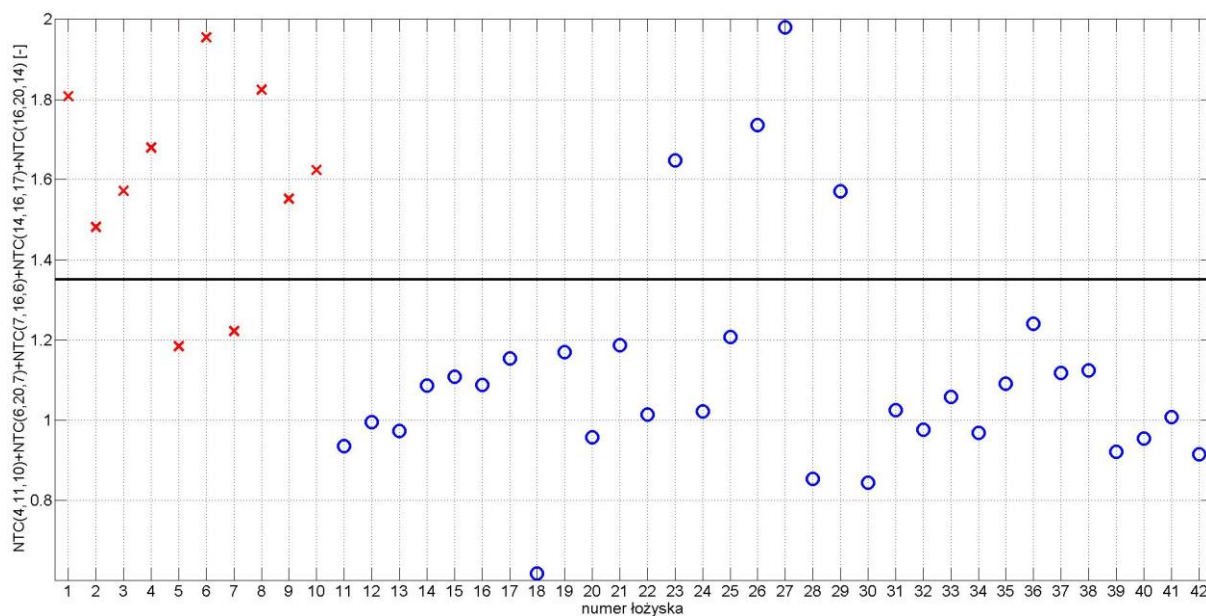
ZAŁĄCZNIK C – Wykresy wartości wskaźników diagnostycznych dla uszkodzeń elementów tocznych.

ZAŁĄCZNIK A

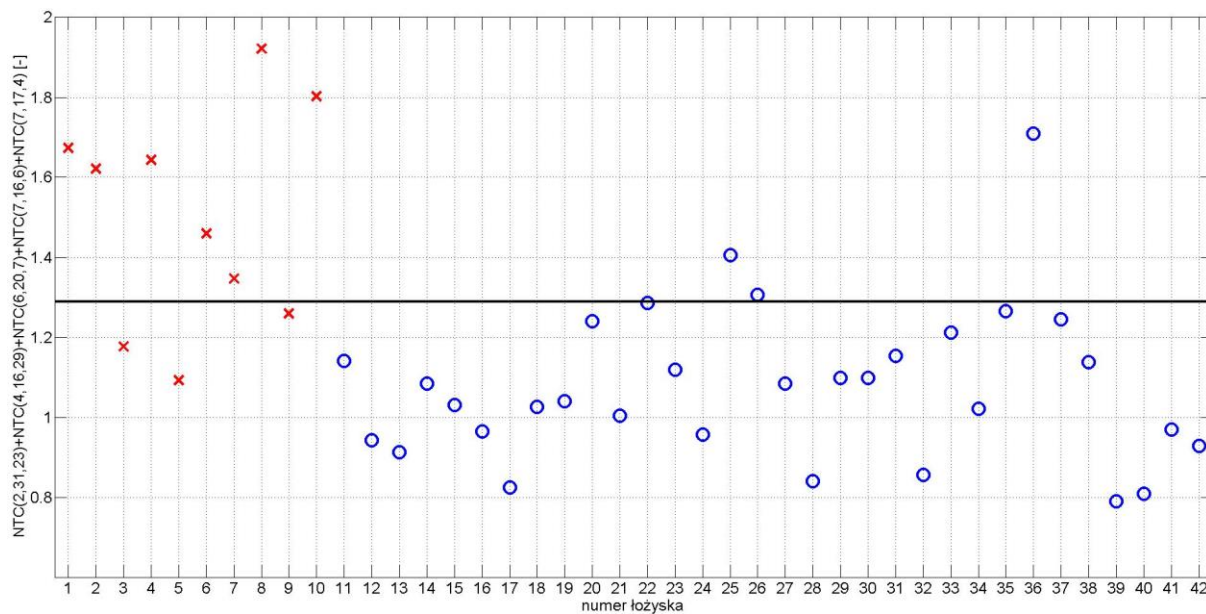
W załączniku A umieszczono wykresy wartości wskaźników diagnostycznych dla uszkodzeń bieżni zewnętrznej.



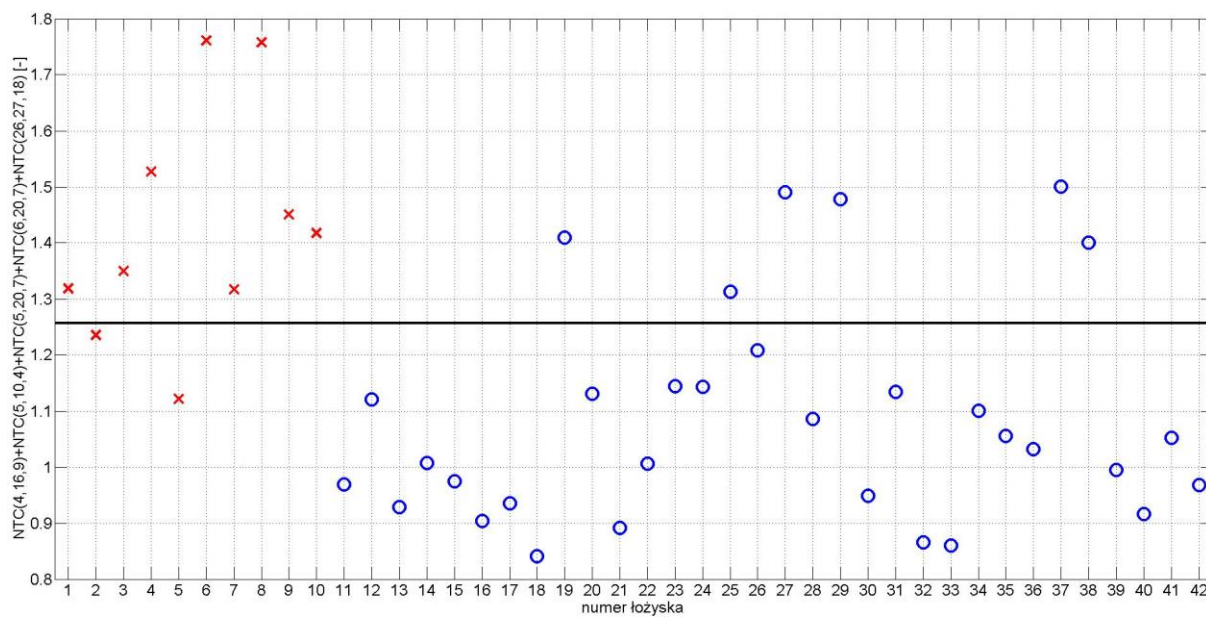
Rys. A. 1. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 1,1 kW



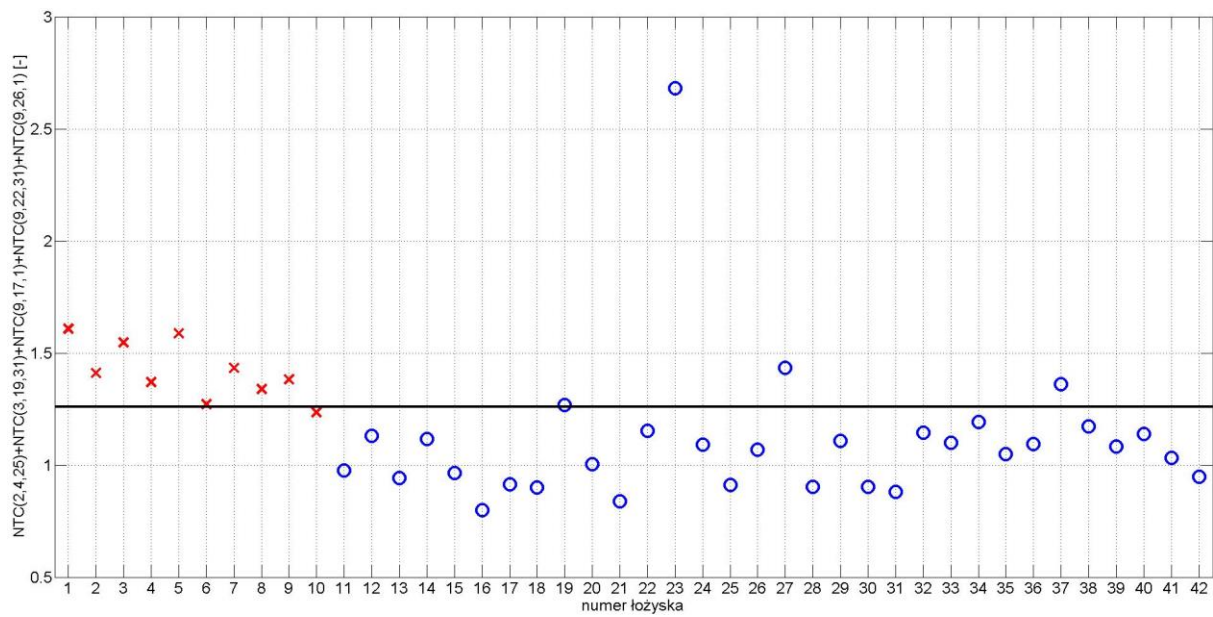
Rys. A. 2. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 1,1 kW



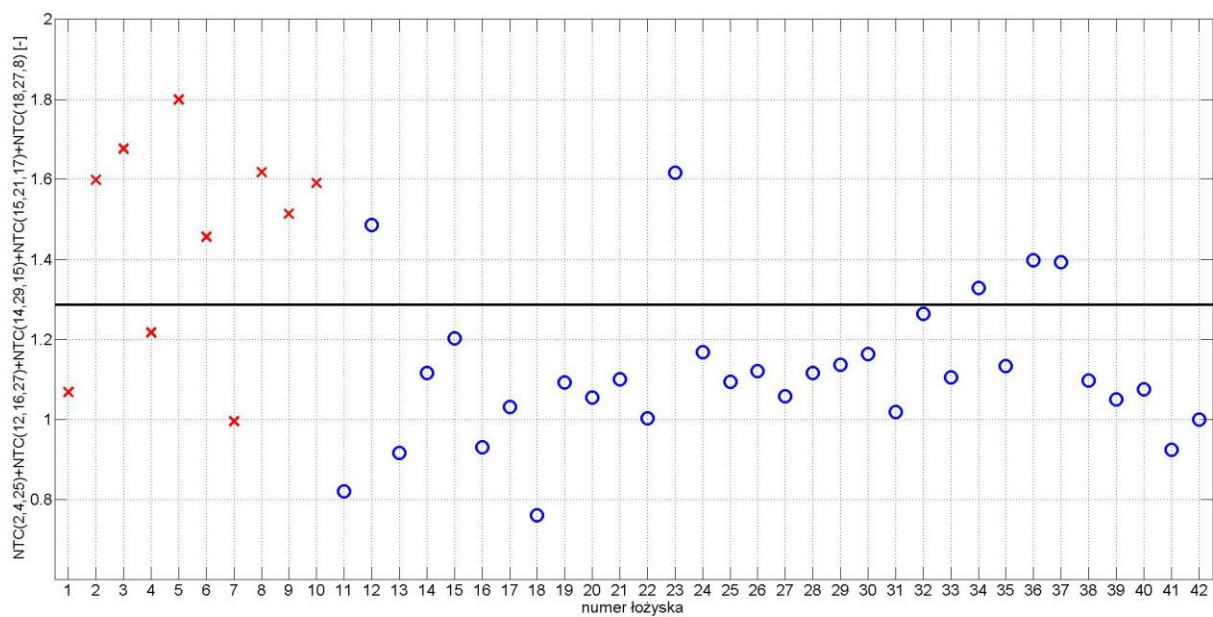
Rys. A. 3. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 1,1 kW



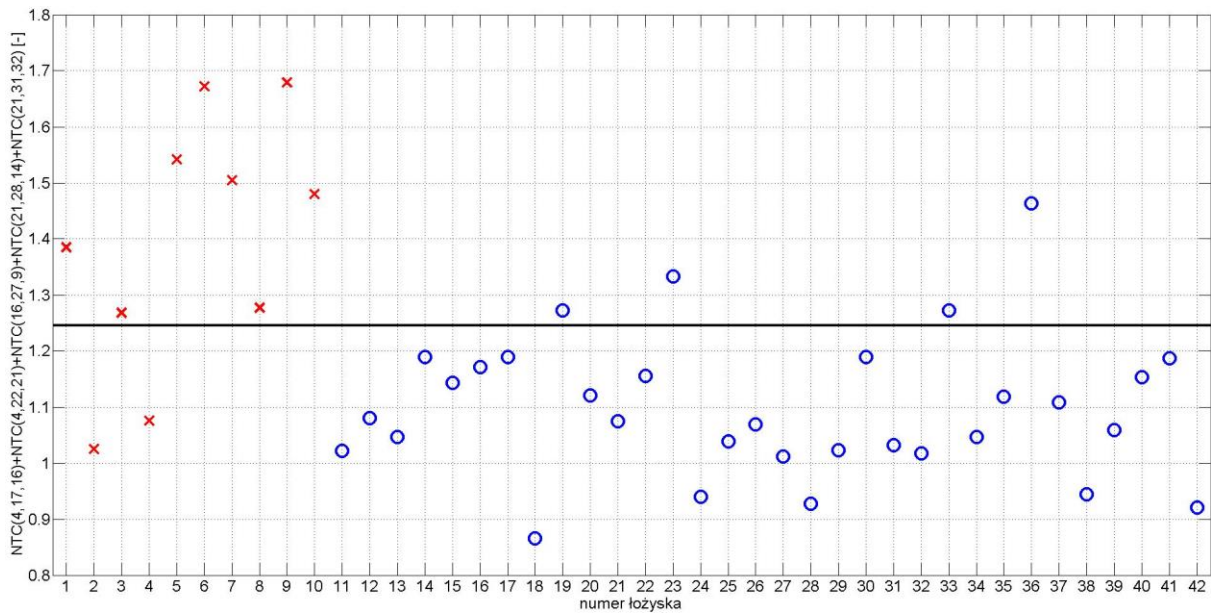
Rys. A. 4. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 1,1 kW



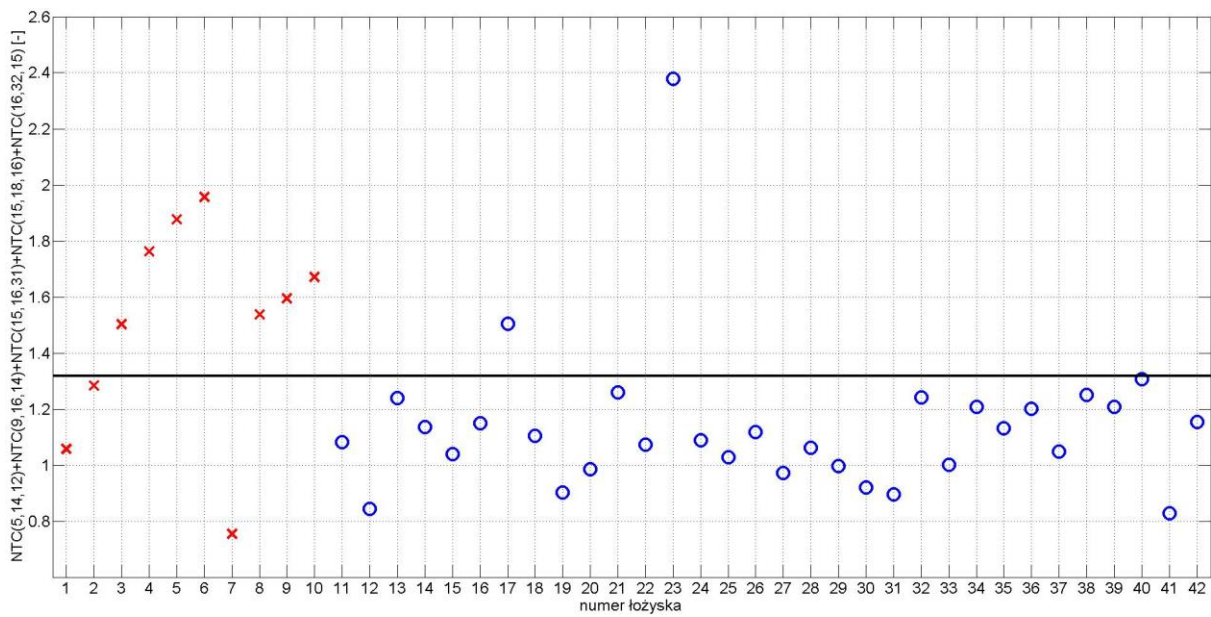
Rys. A. 5. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 1,0 kW



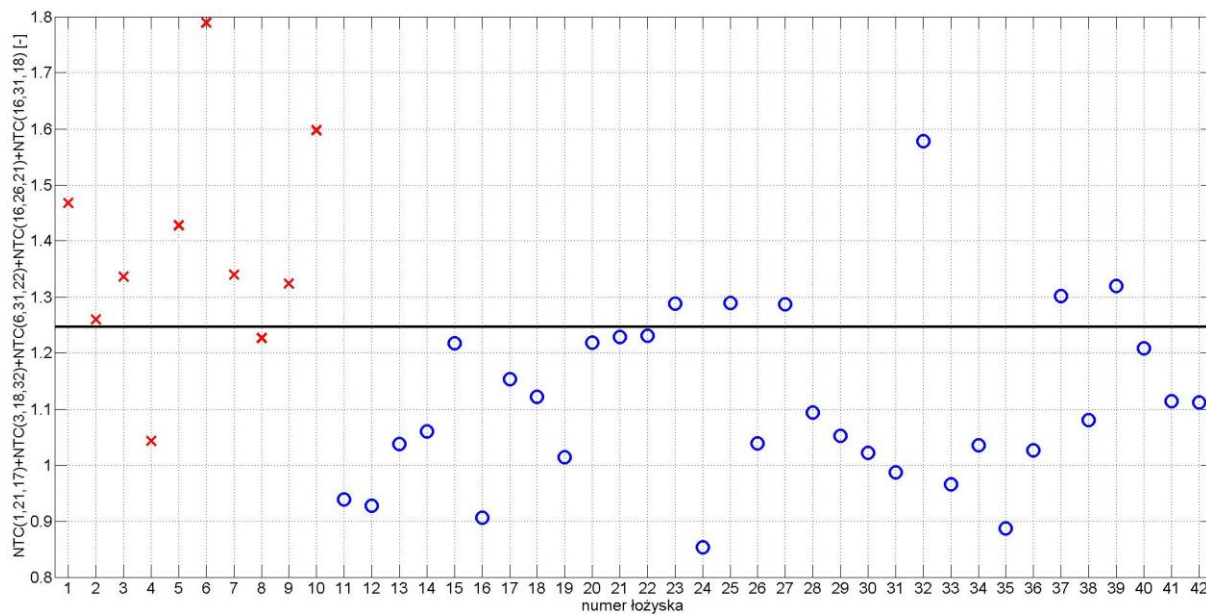
Rys. A. 6. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 1,0 kW



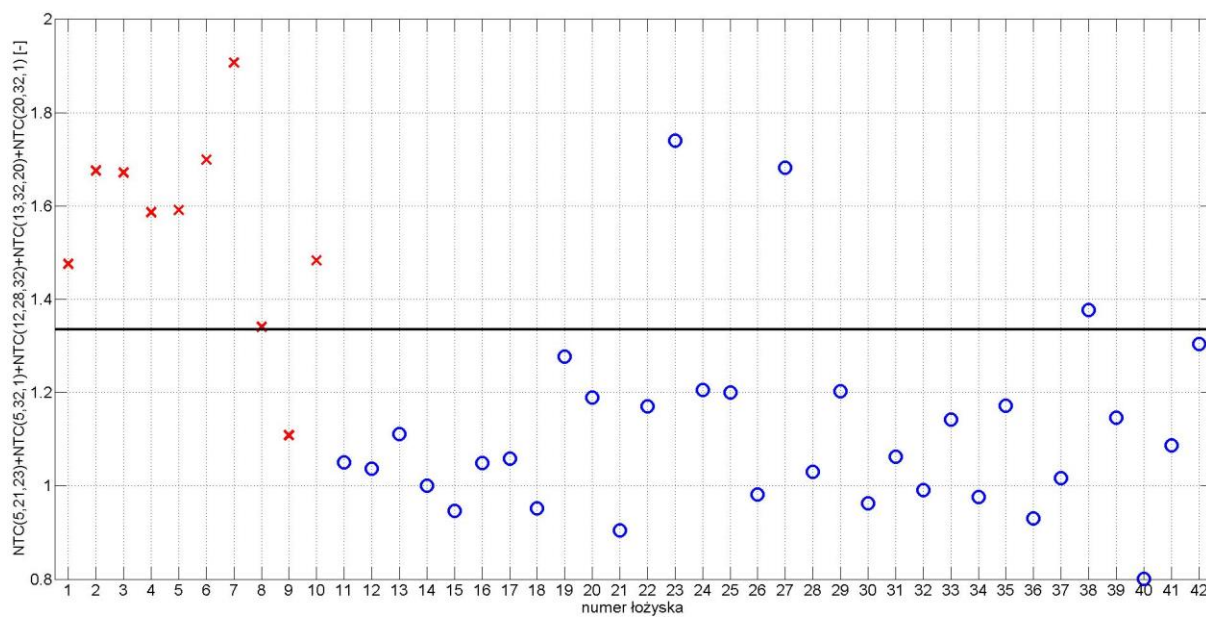
Rys. A. 7. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 1,0 kW



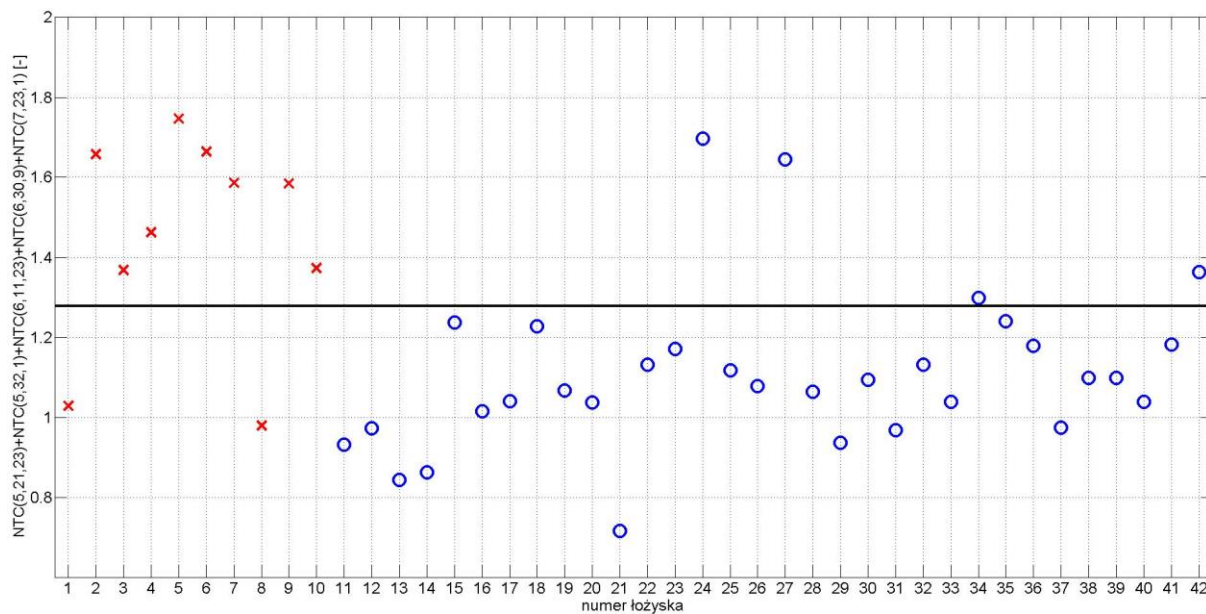
Rys. A. 8. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 1,0 kW



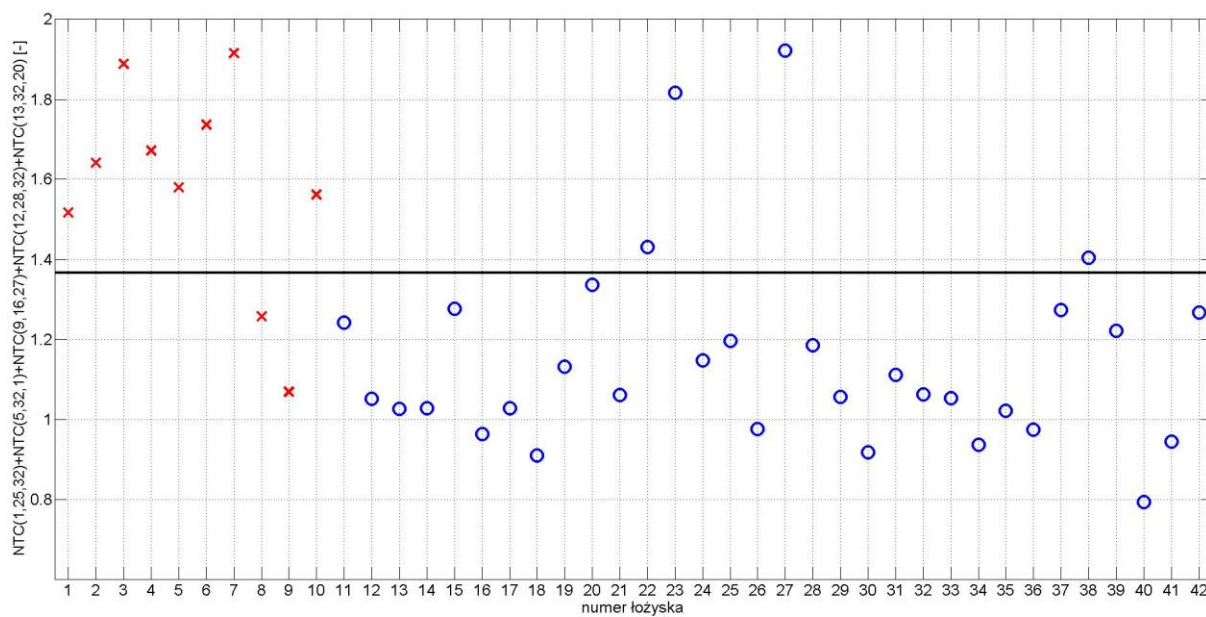
Rys. A. 9. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 1,0 kW



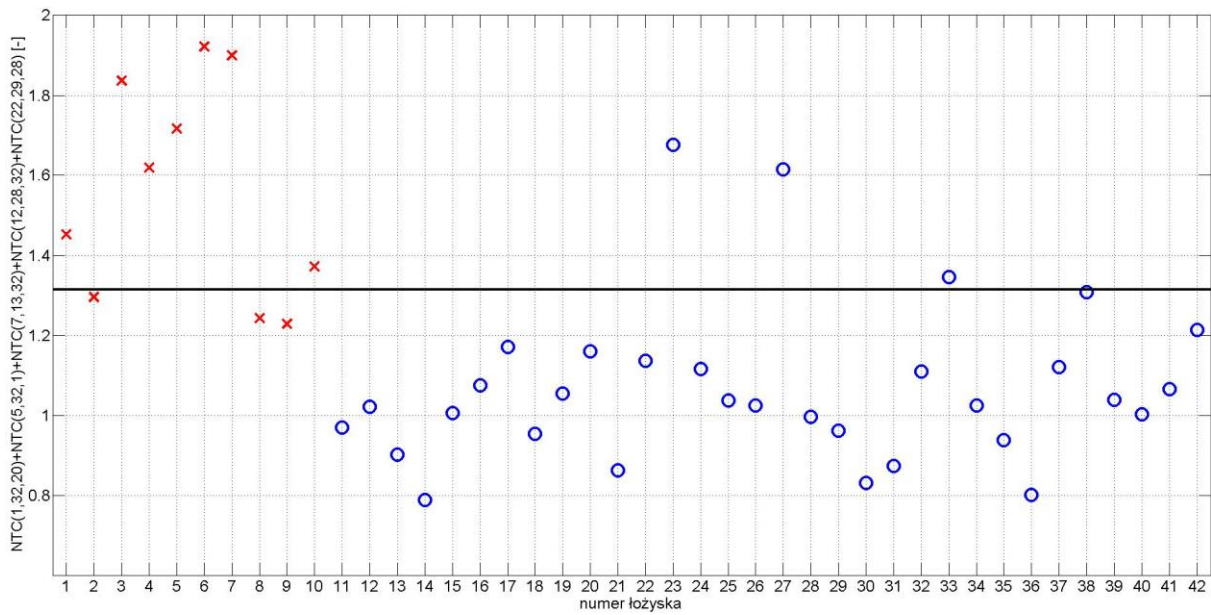
Rys. A. 10. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 0,9 kW



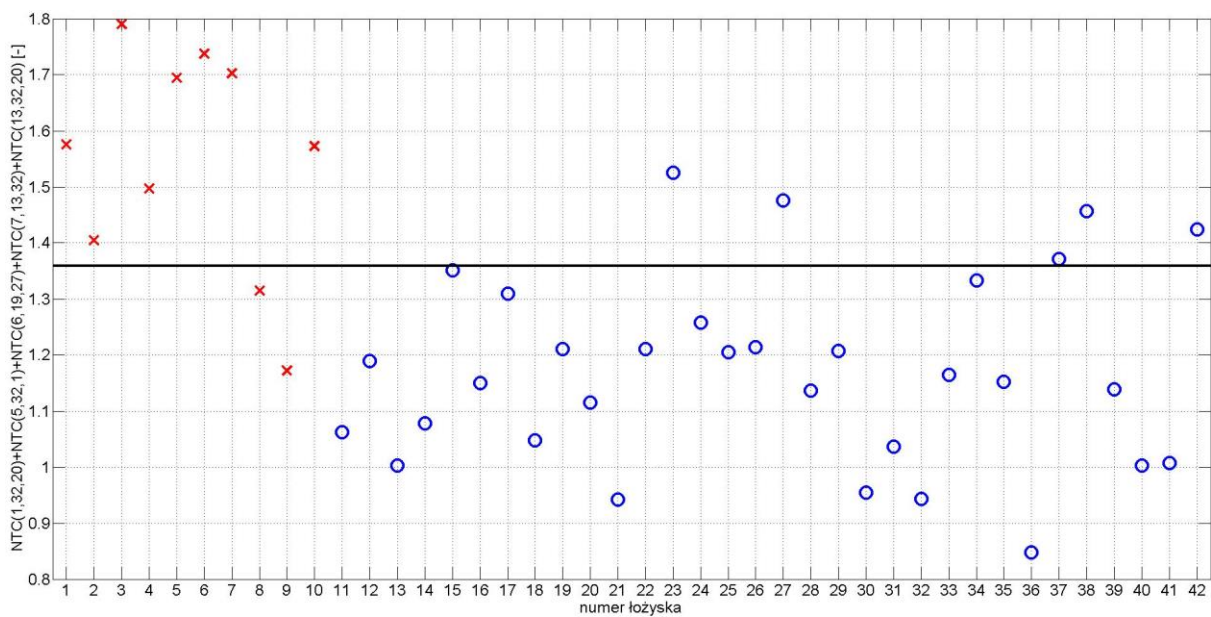
Rys. A. 11. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 0,9 kW



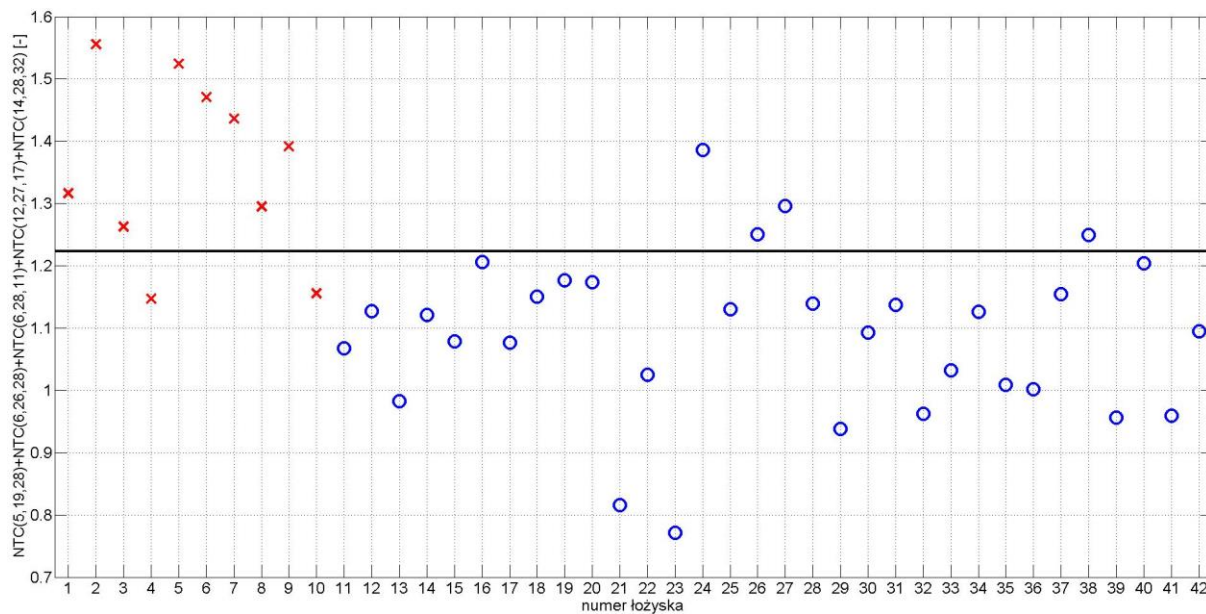
Rys. A. 12. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 0,9 kW



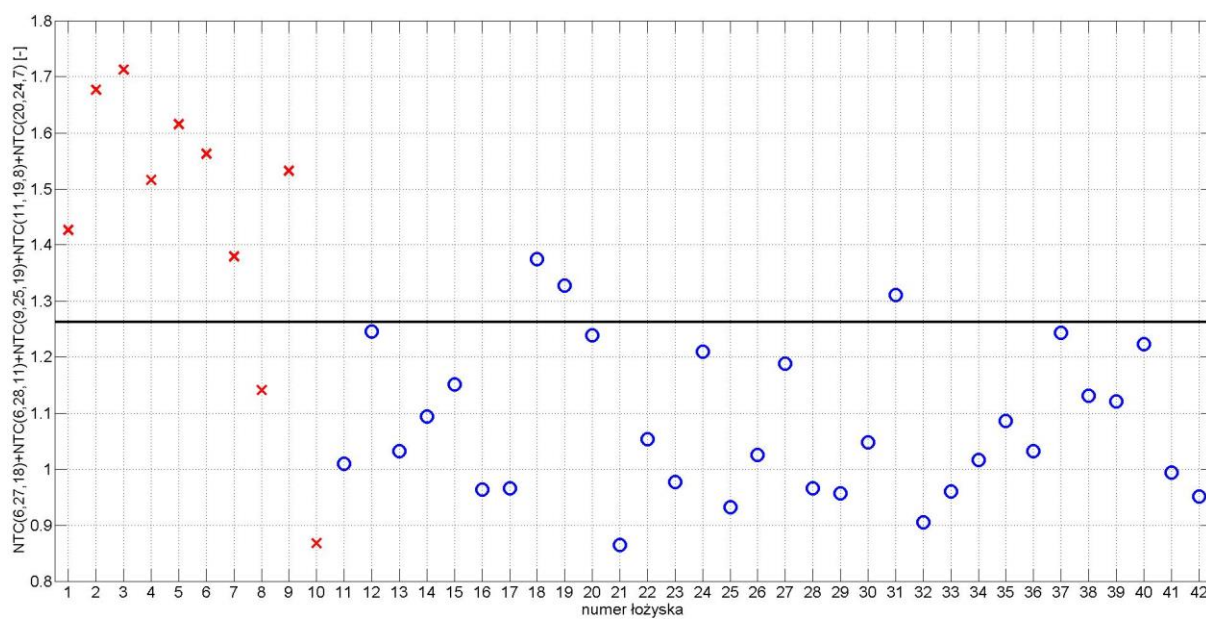
Rys. A. 13. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 0,9 kW



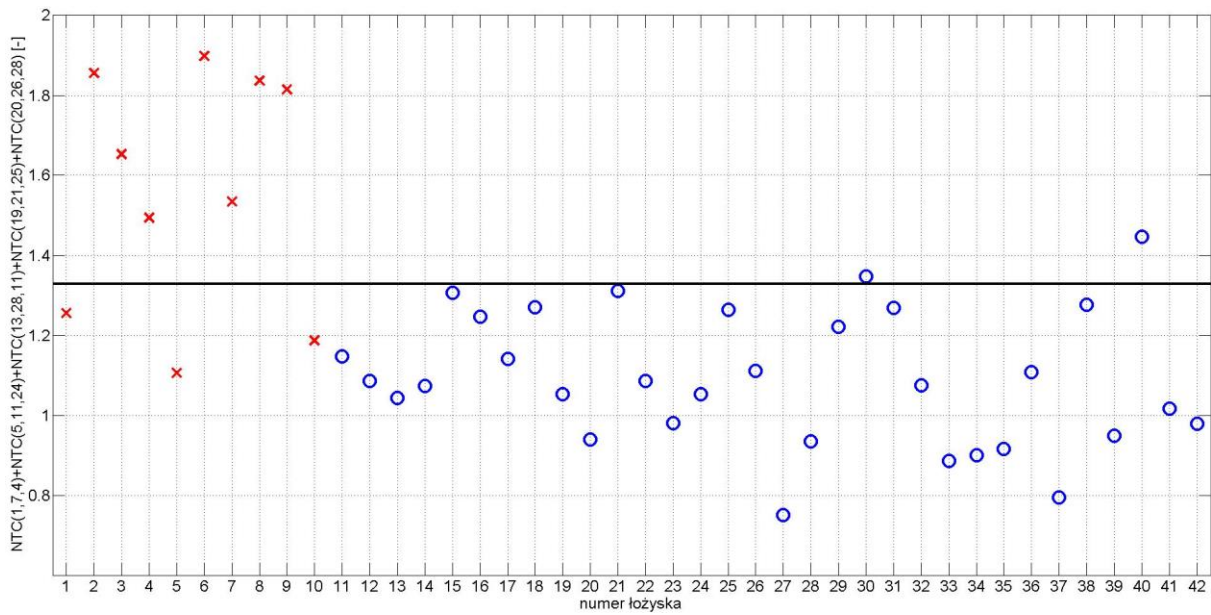
Rys. A. 14. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 0,9 kW



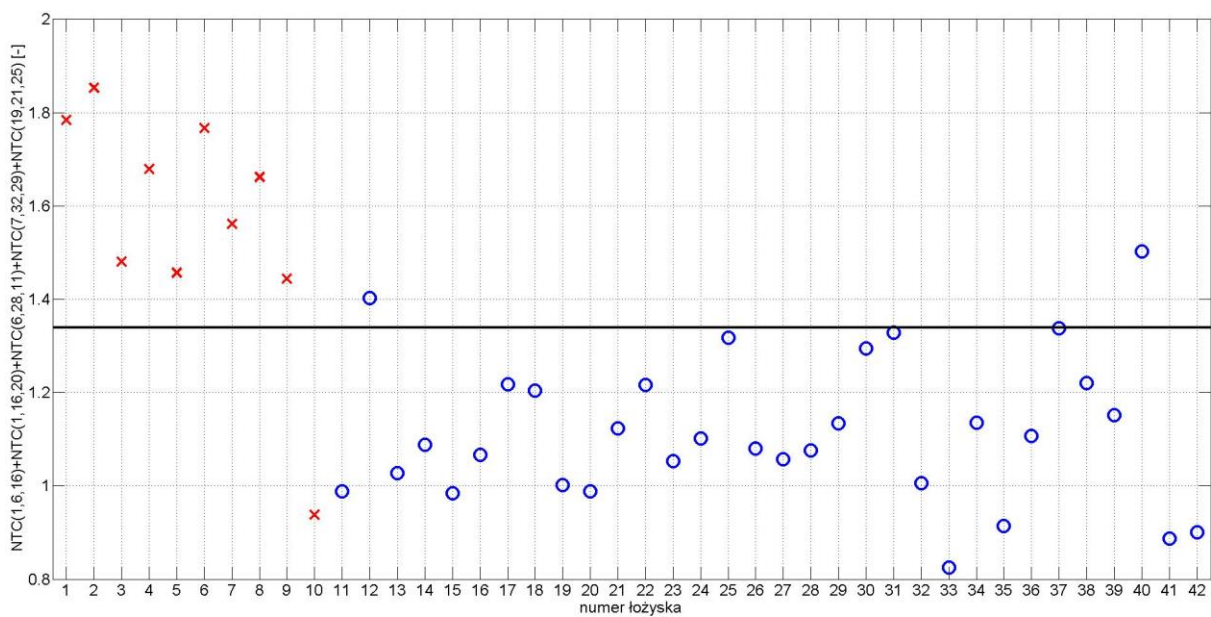
Rys. A. 15. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 0,8 kW



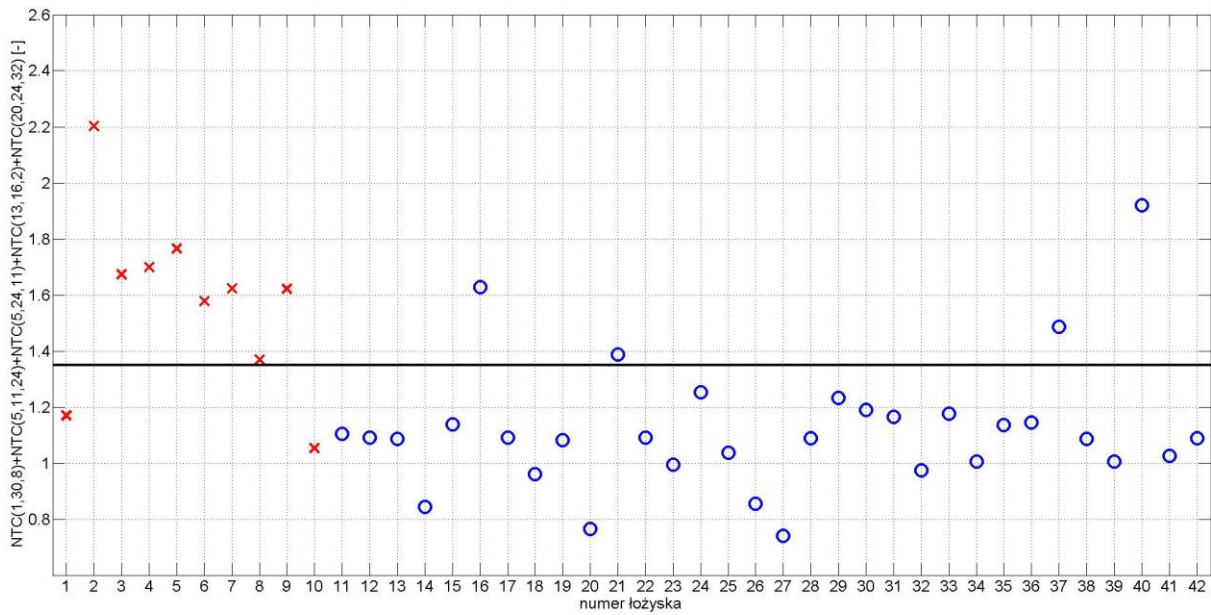
Rys. A. 16. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 0,8 kW



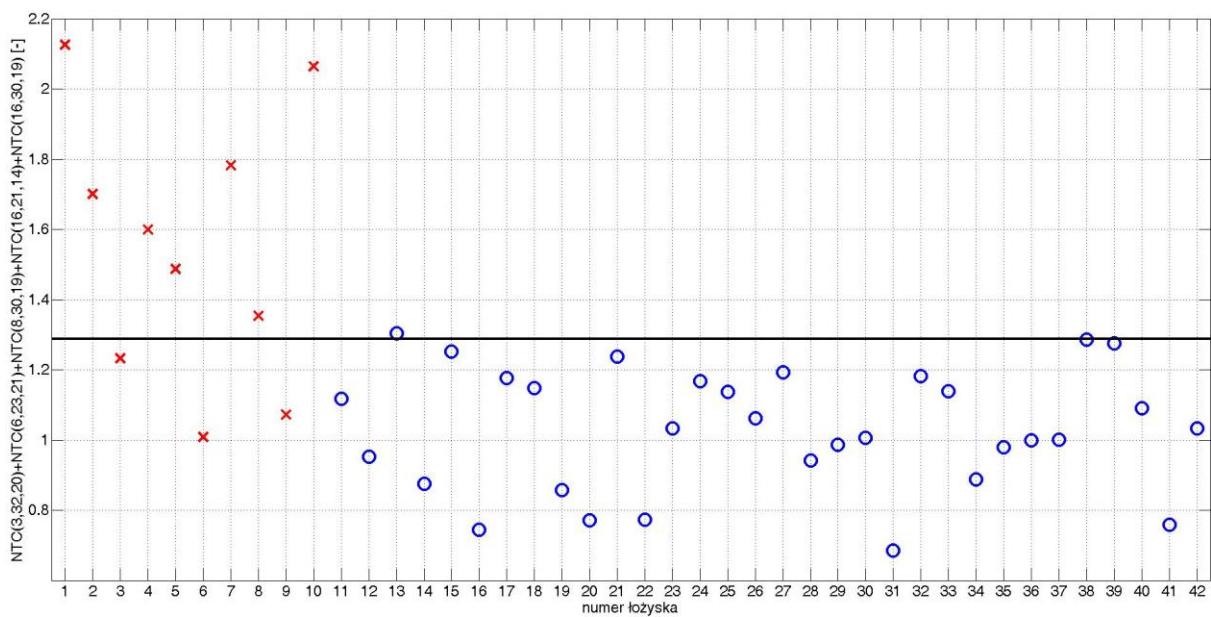
Rys. A. 17. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 0,8 kW



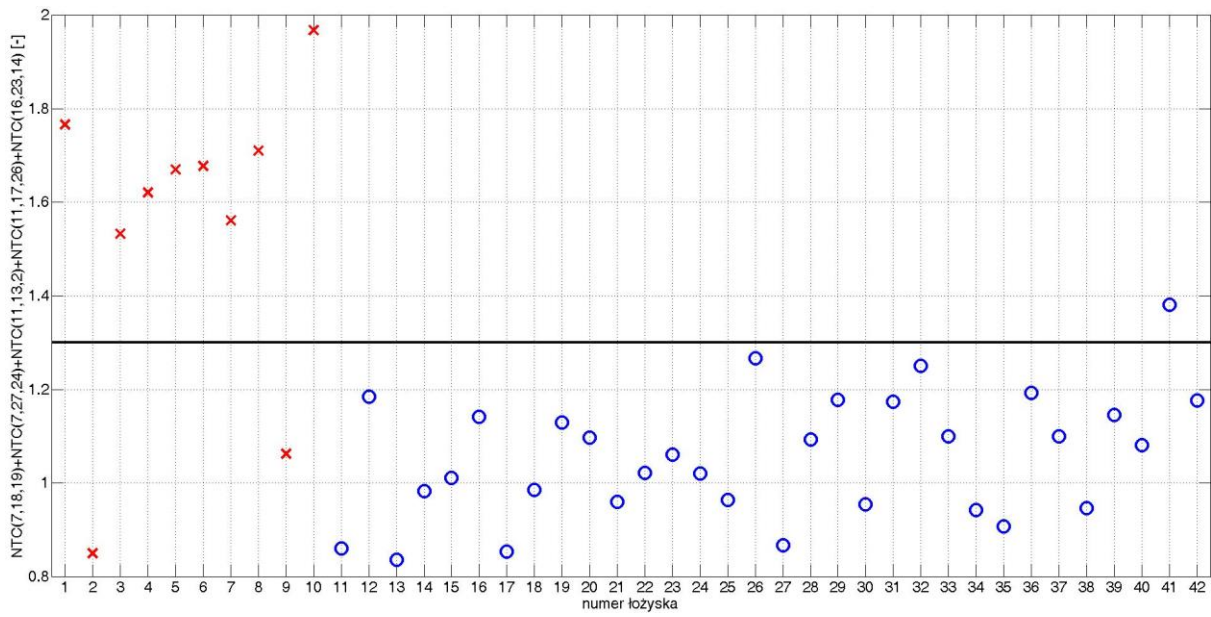
Rys. A. 18. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 0,8 kW



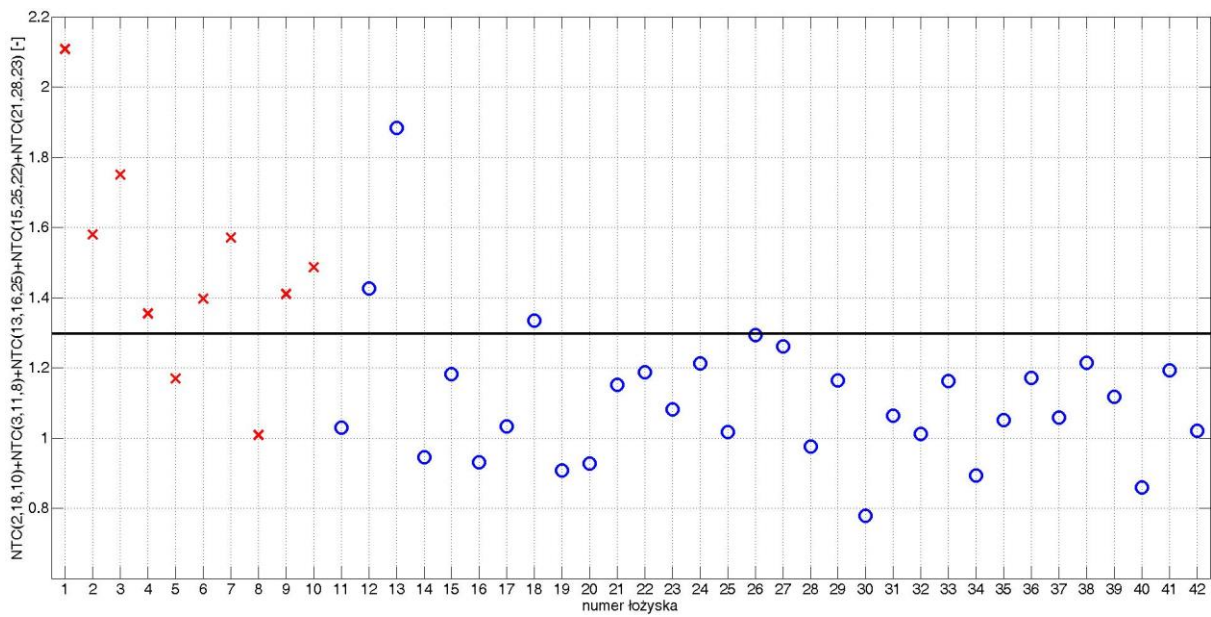
Rys. A. 19. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 0,8 kW



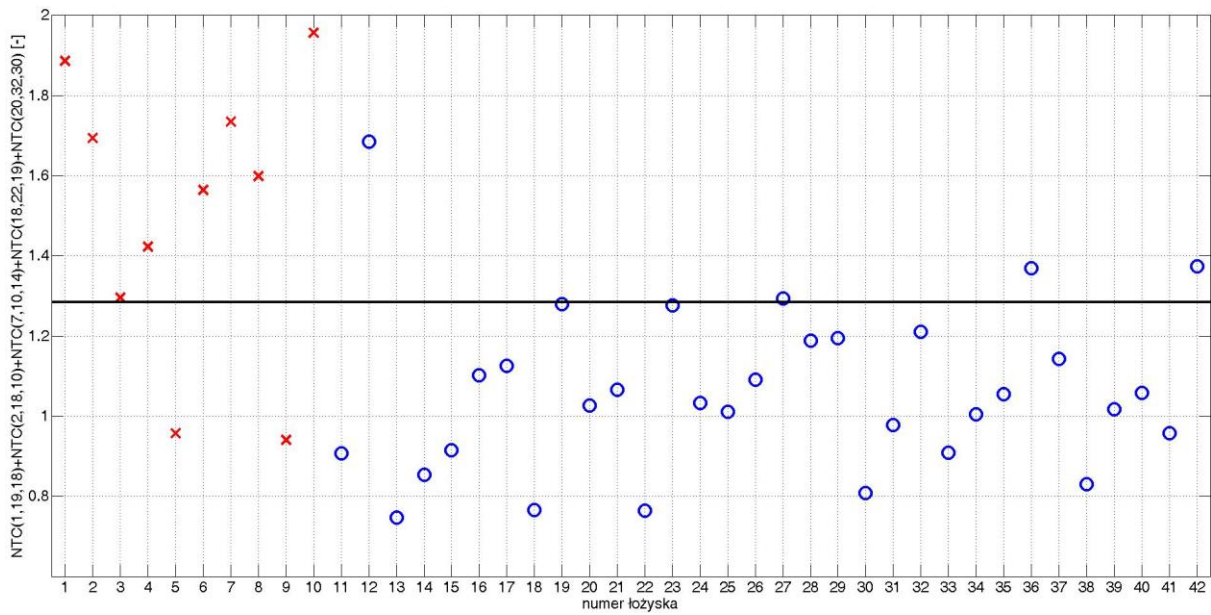
Rys. A. 20. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 0,7 kW



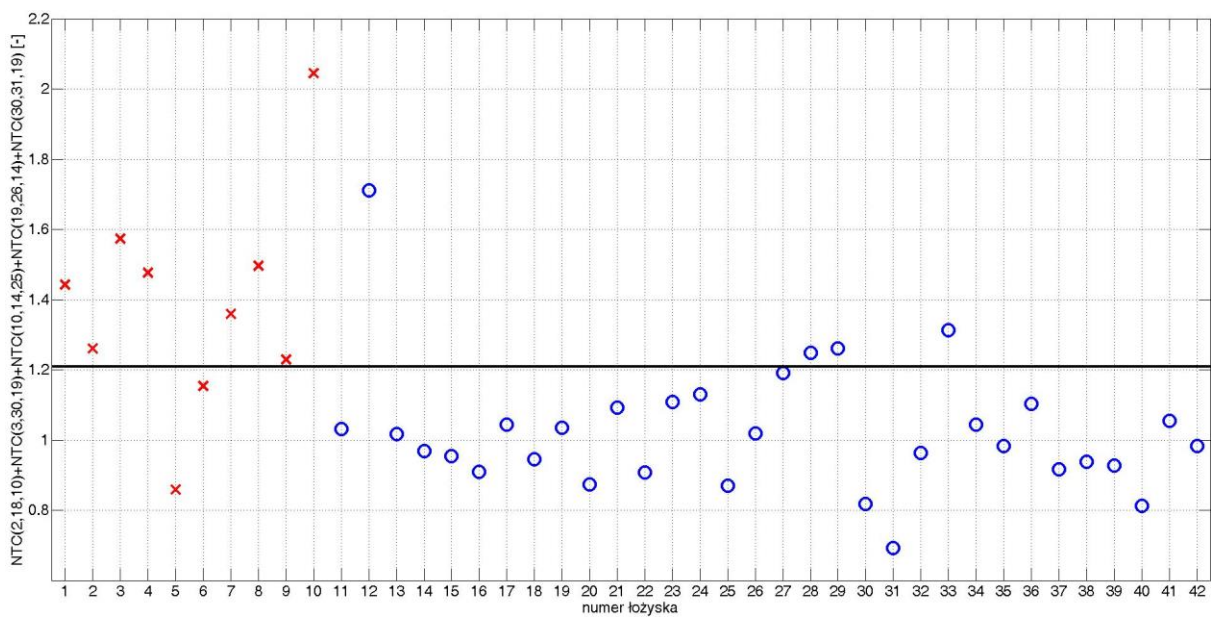
Rys. A. 21. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 0,7 kW



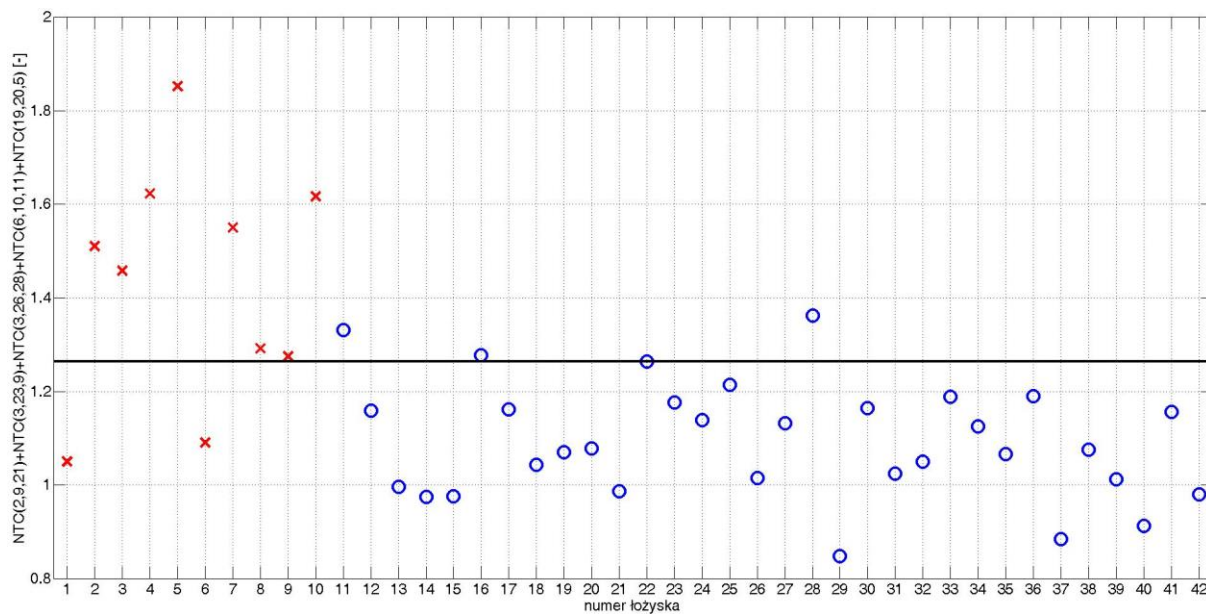
Rys. A. 22. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 0,7 kW



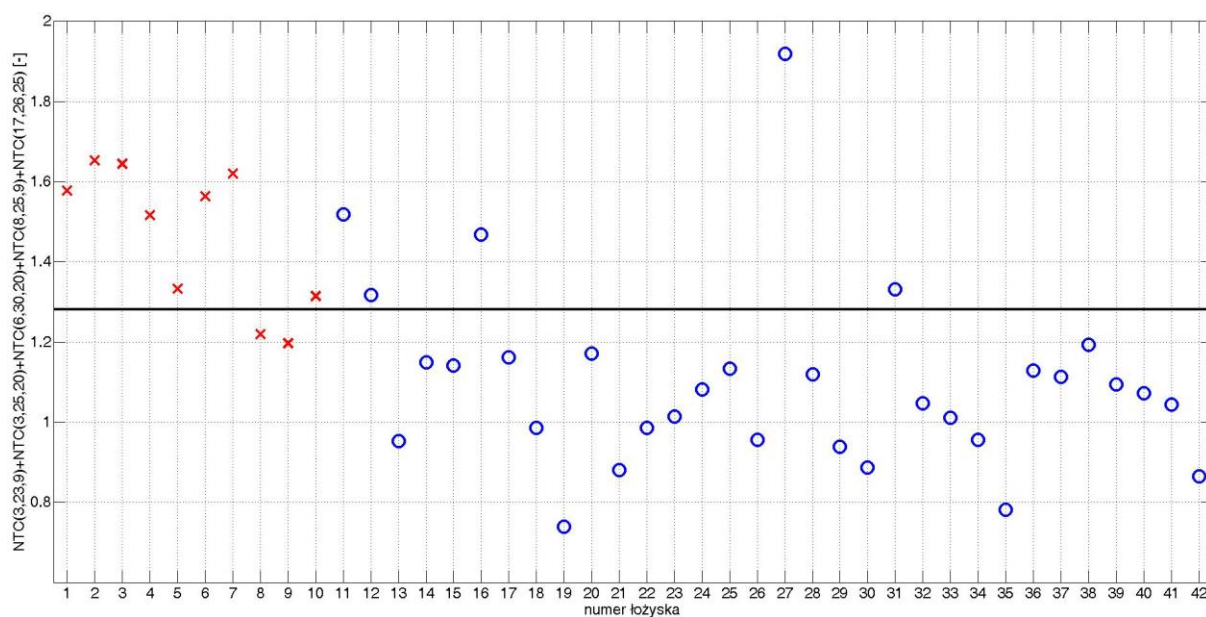
Rys. A. 23. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 0,7 kW



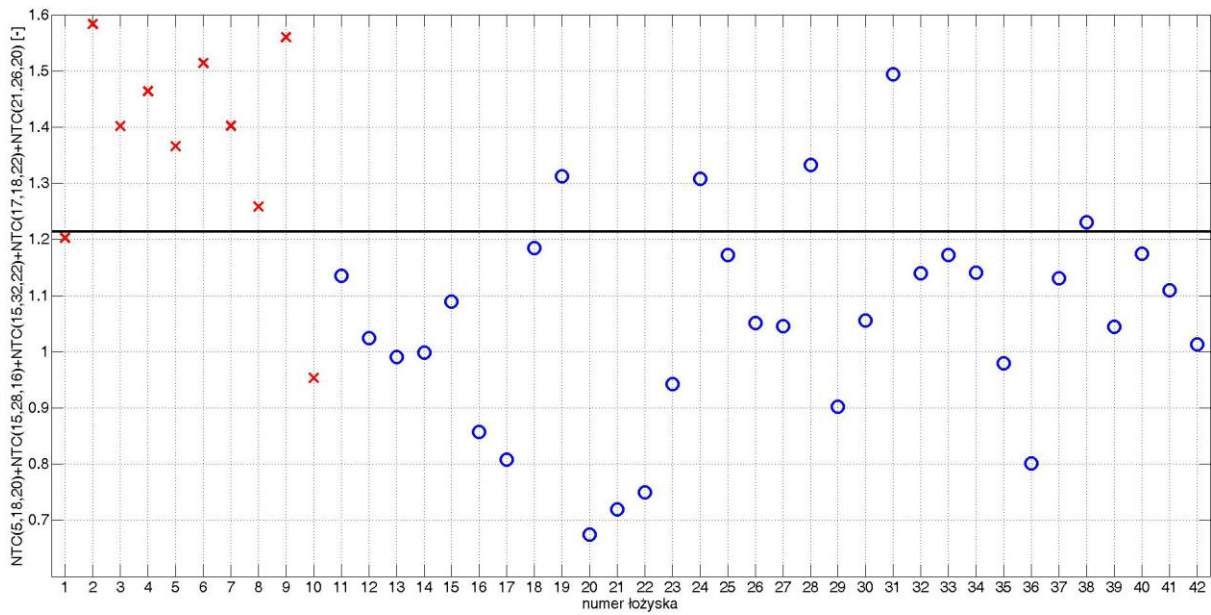
Rys. A. 24. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 0,7 kW



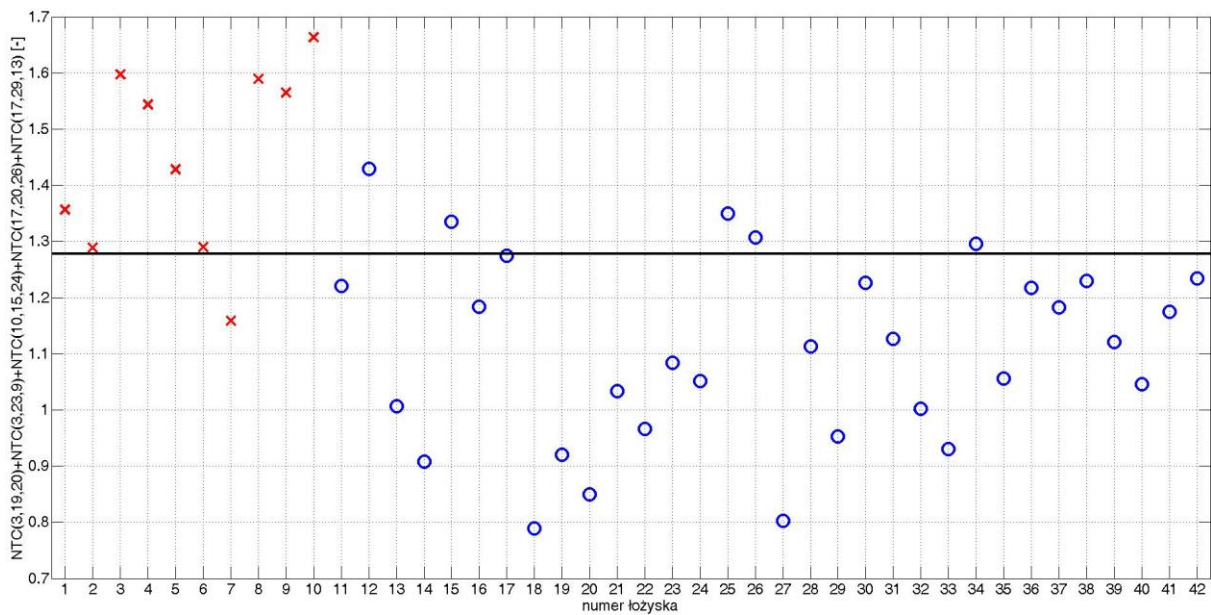
Rys. A. 25. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 0,6 kW



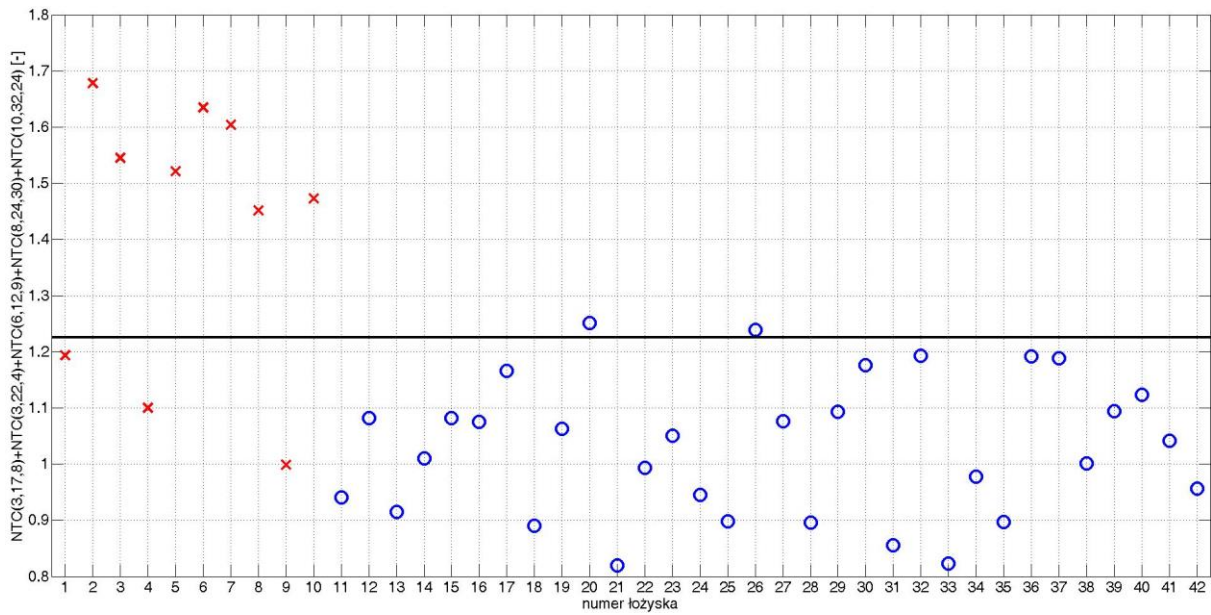
Rys. A. 26. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 0,6 kW



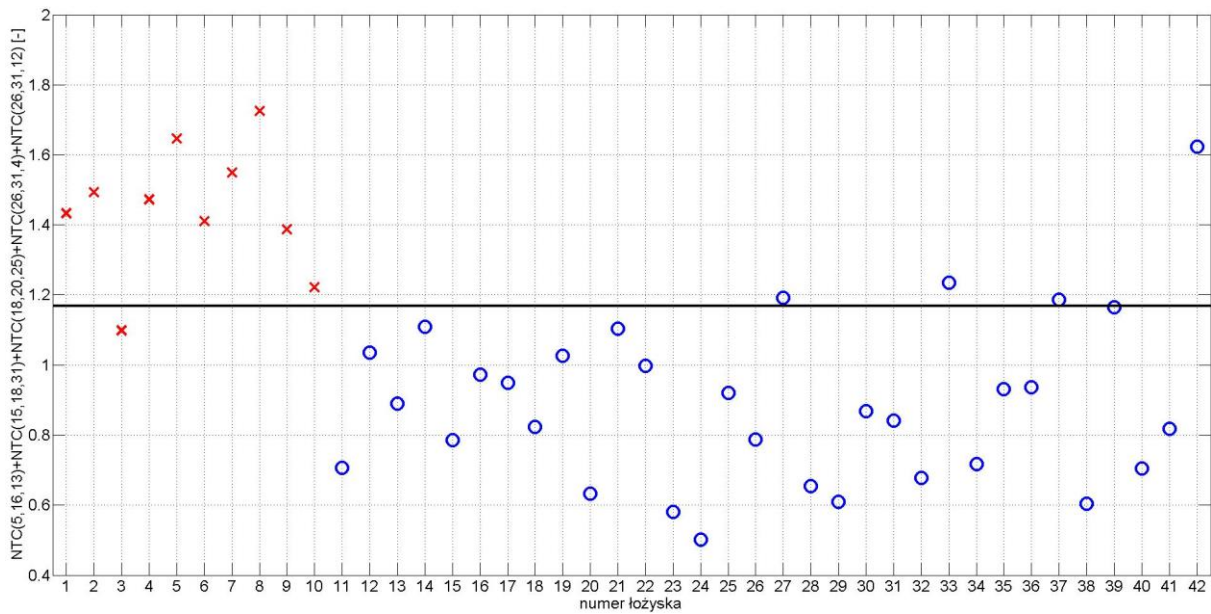
Rys. A. 27. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 0,6 kW



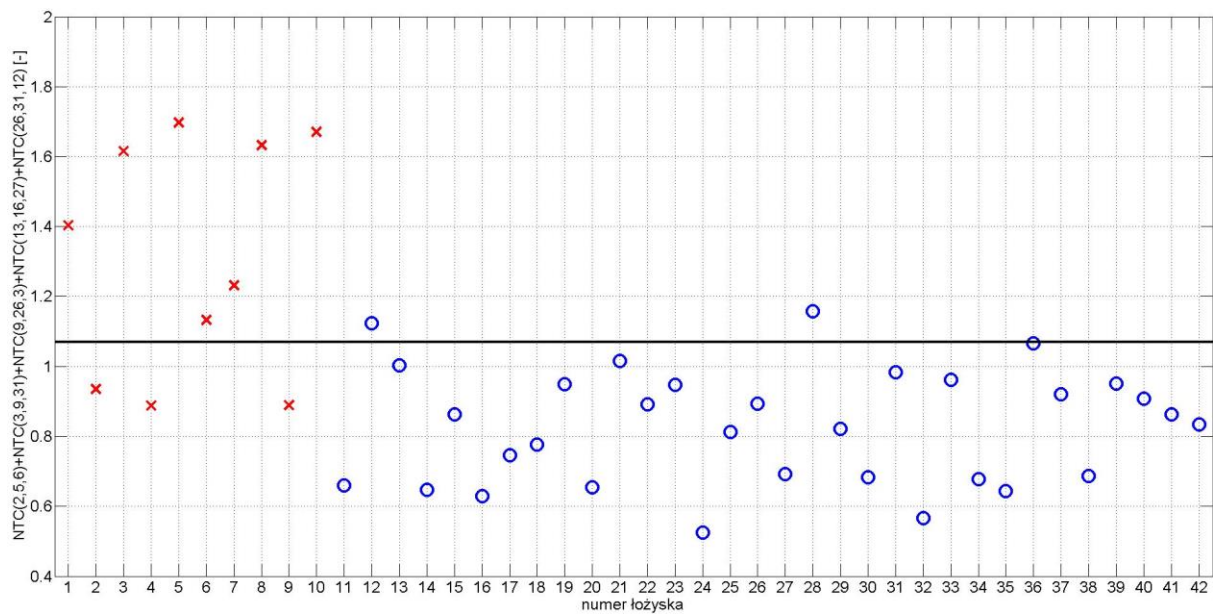
Rys. A. 28. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 0,6 kW



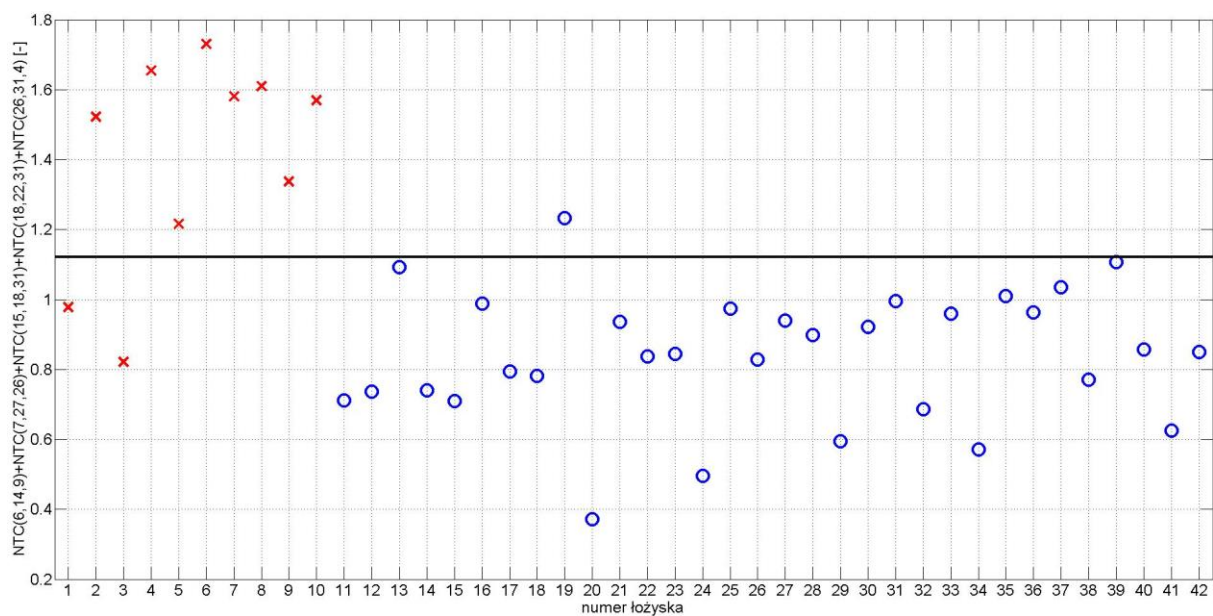
Rys. A. 29. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 0,6 kW



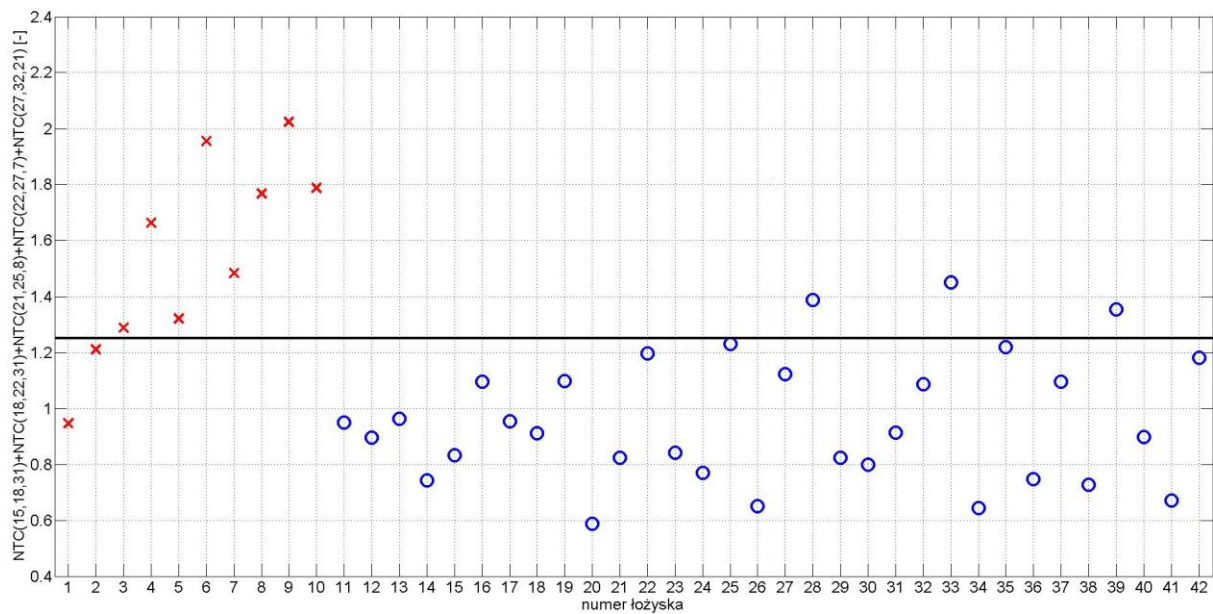
Rys. A. 30. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 0,5 kW



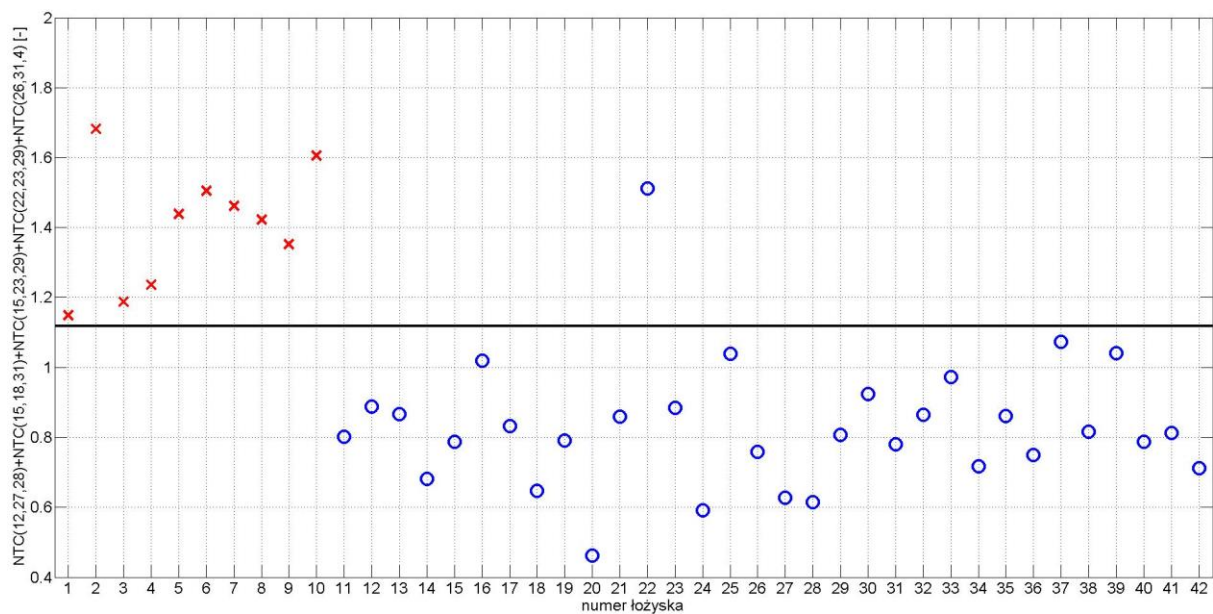
Rys. A. 31. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 0,5 kW



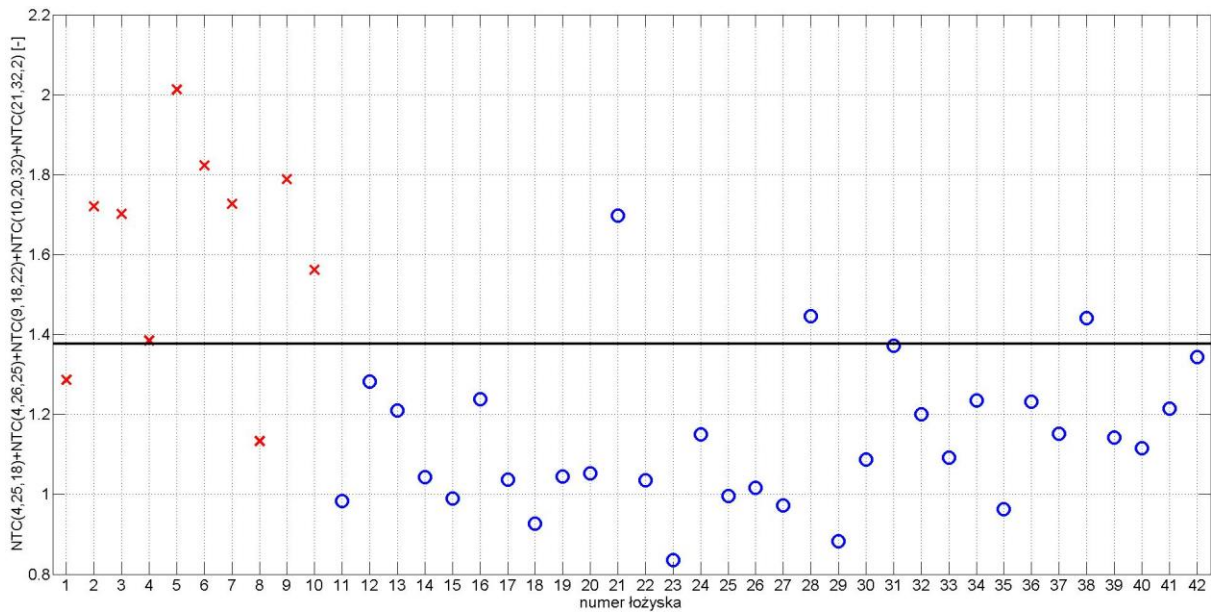
Rys. A. 32. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 0,5 kW



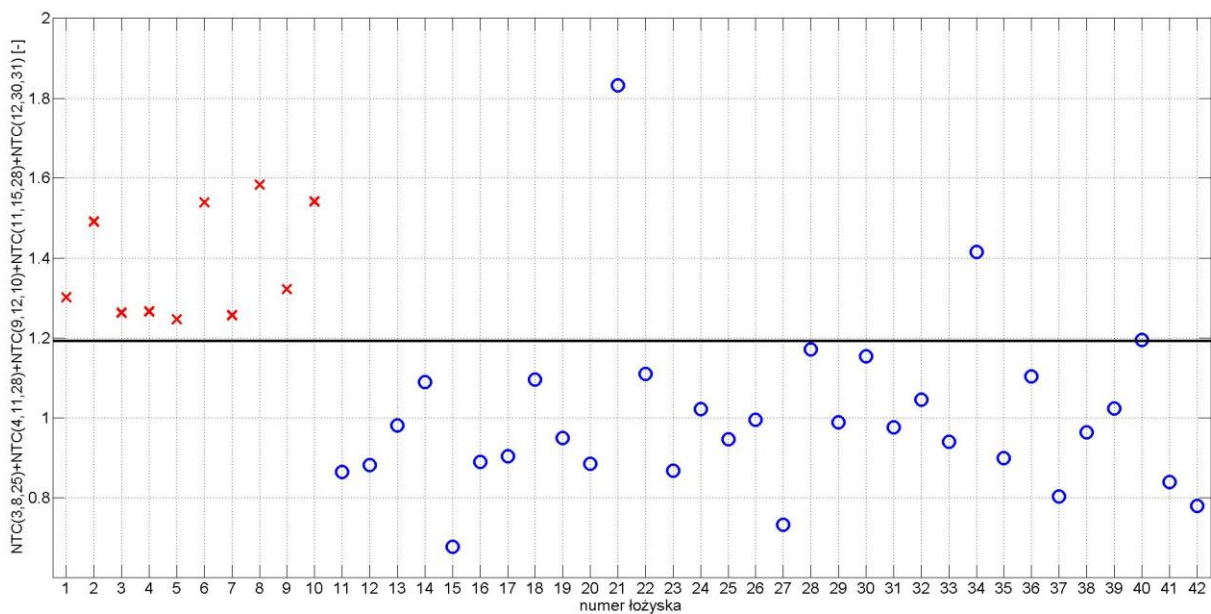
Rys. A. 33. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łóżysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 0,5 kW



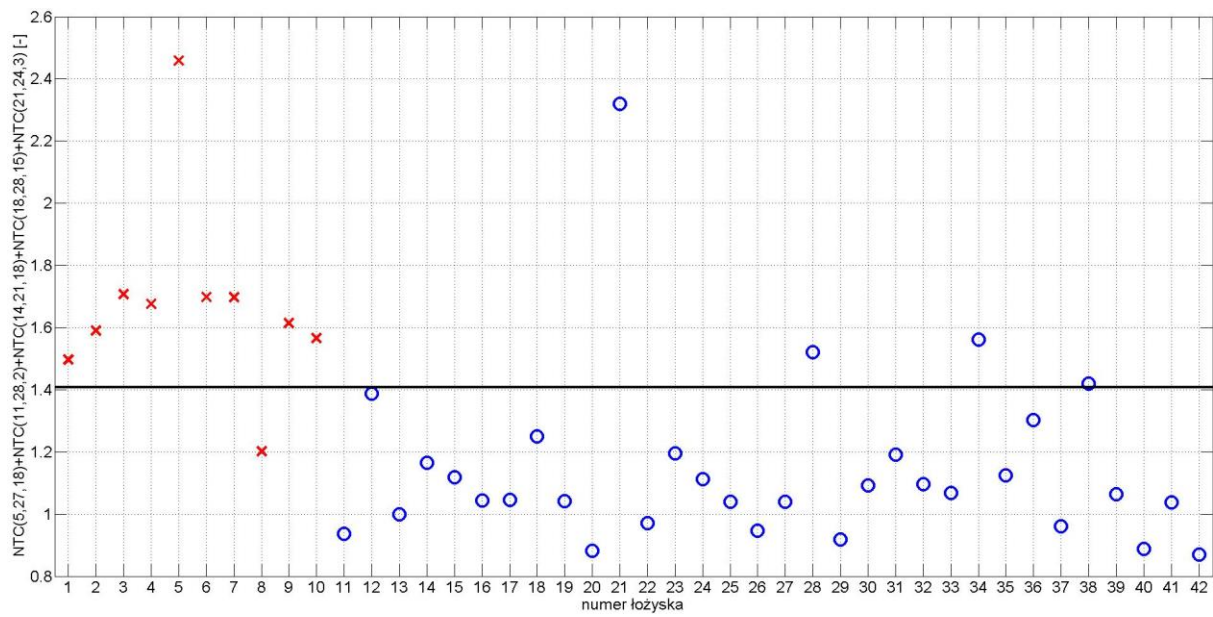
Rys. A. 34. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łóżysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 0,5 kW



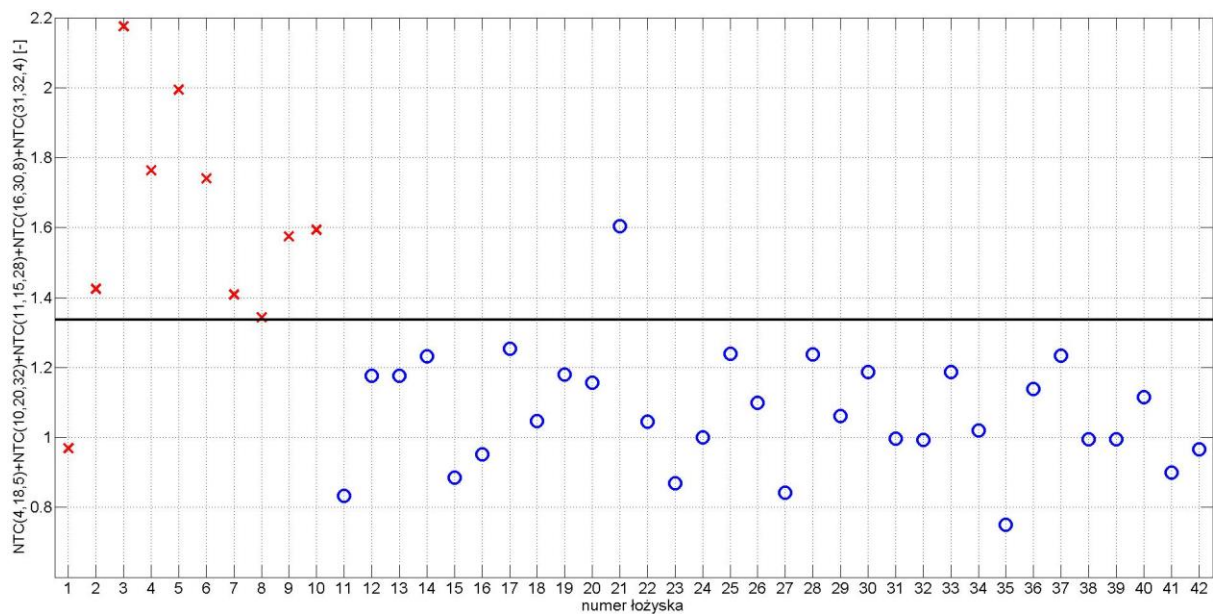
Rys. A. 35. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łóżysk dla zestawu 1 bez obciążenia



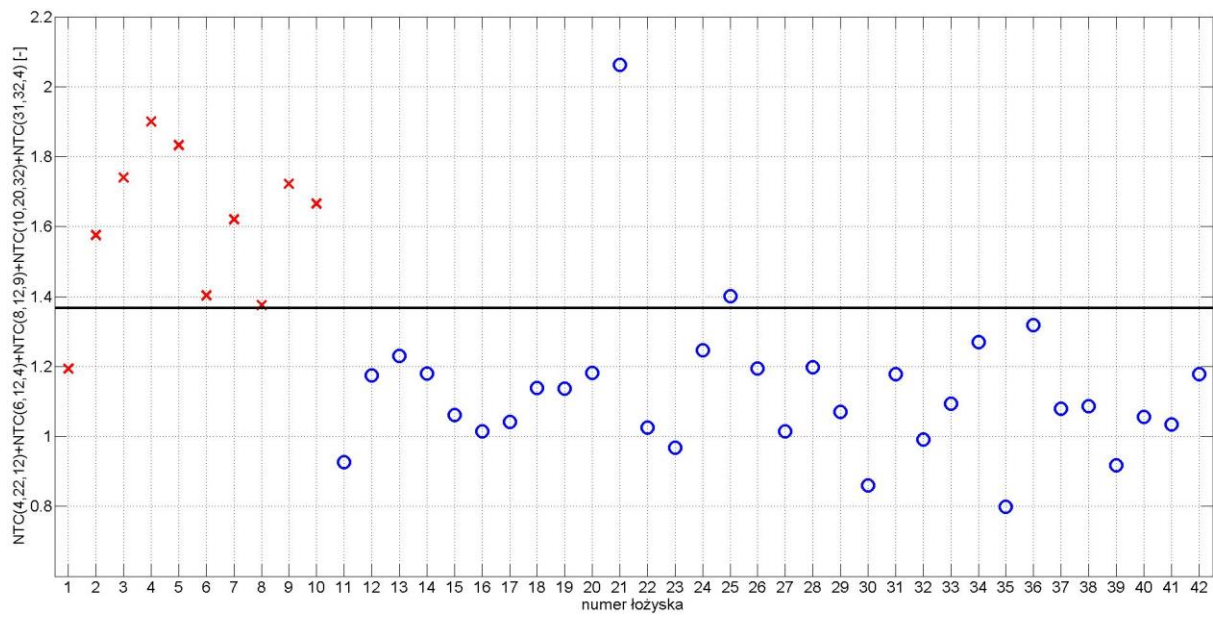
Rys. A. 36. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łóżysk dla zestawu 2 bez obciążenia



Rys. A. 37. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łóżysk dla zestawu 3 bez obciążenia



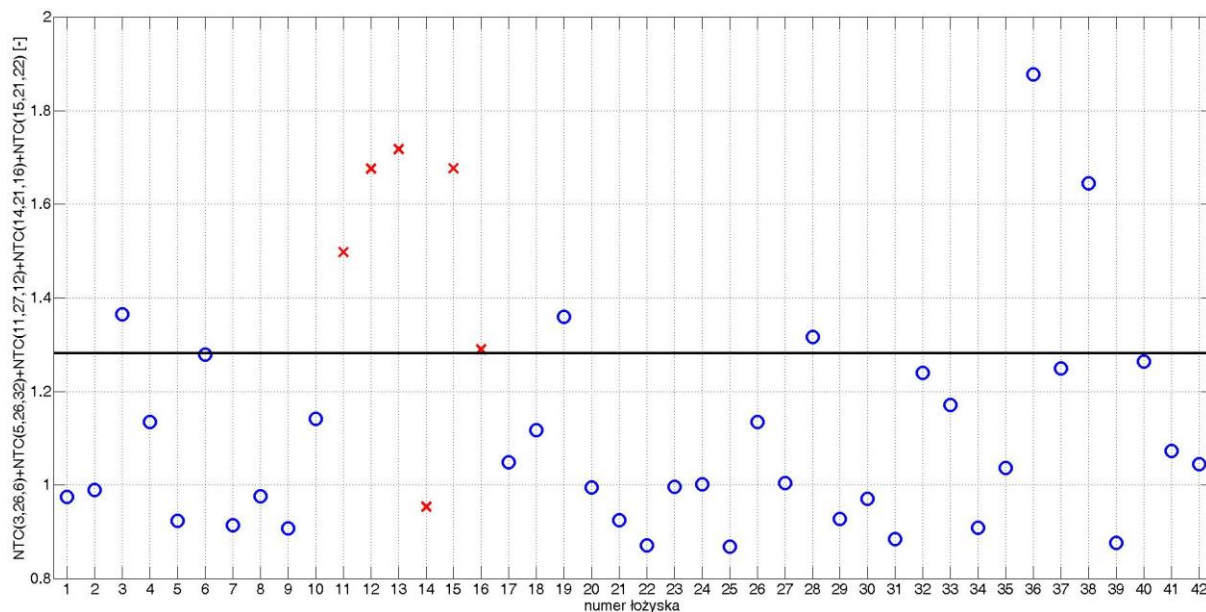
Rys. A. 38. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łóżysk dla zestawu 4 bez obciążenia



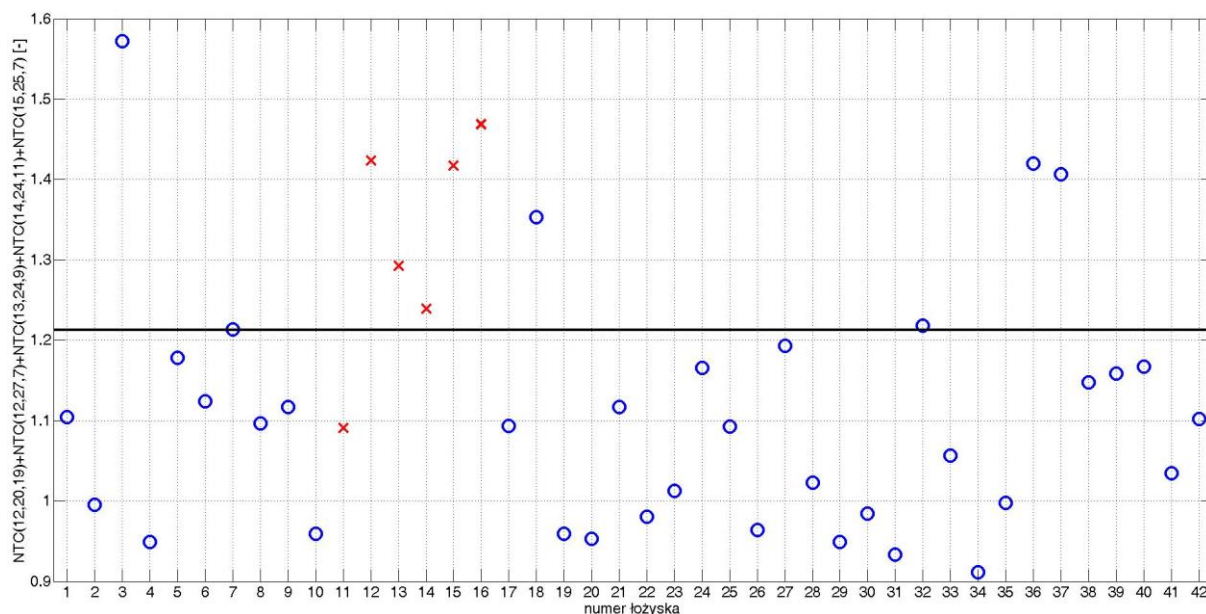
Rys. A. 39. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 bez obciążenia

ZAŁĄCZNIK B

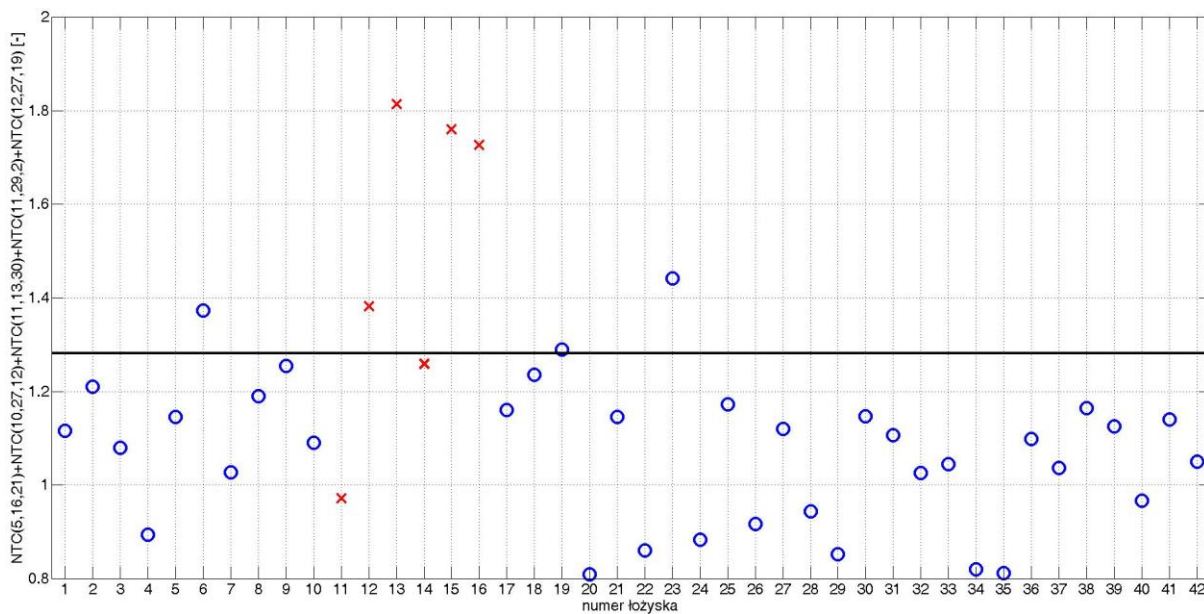
W załączniku B umieszczono wykresy wartości wskaźników diagnostycznych dla uszkodzeń bieżni wewnętrznej.



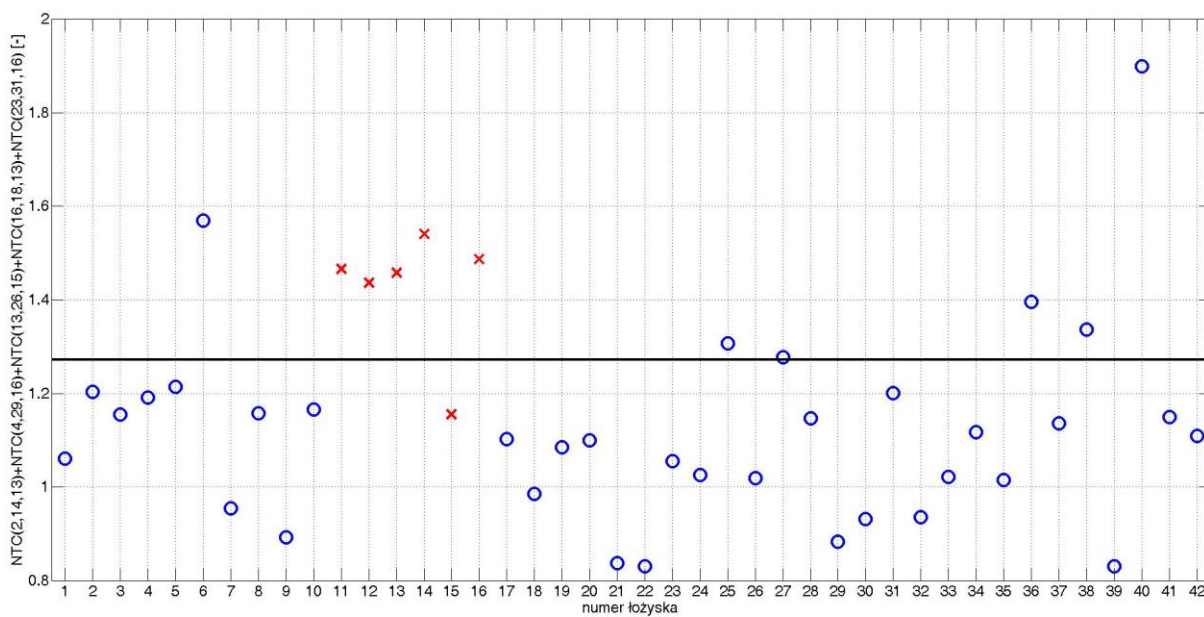
Rys. B. 1. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 1,1 kW



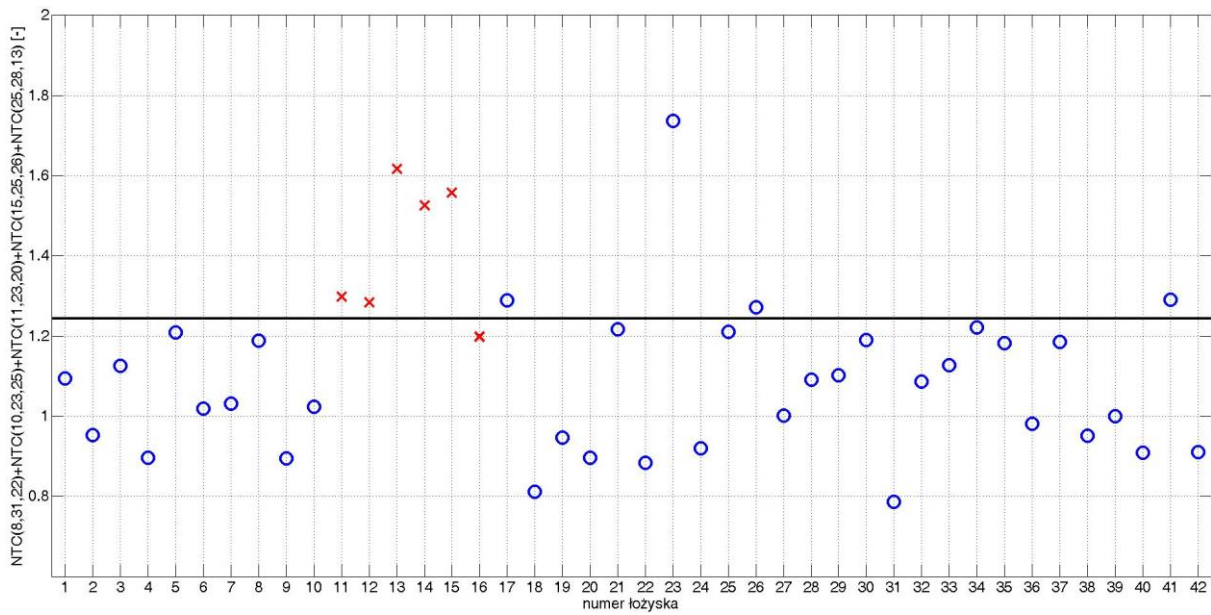
Rys. B. 2. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 1,1 kW



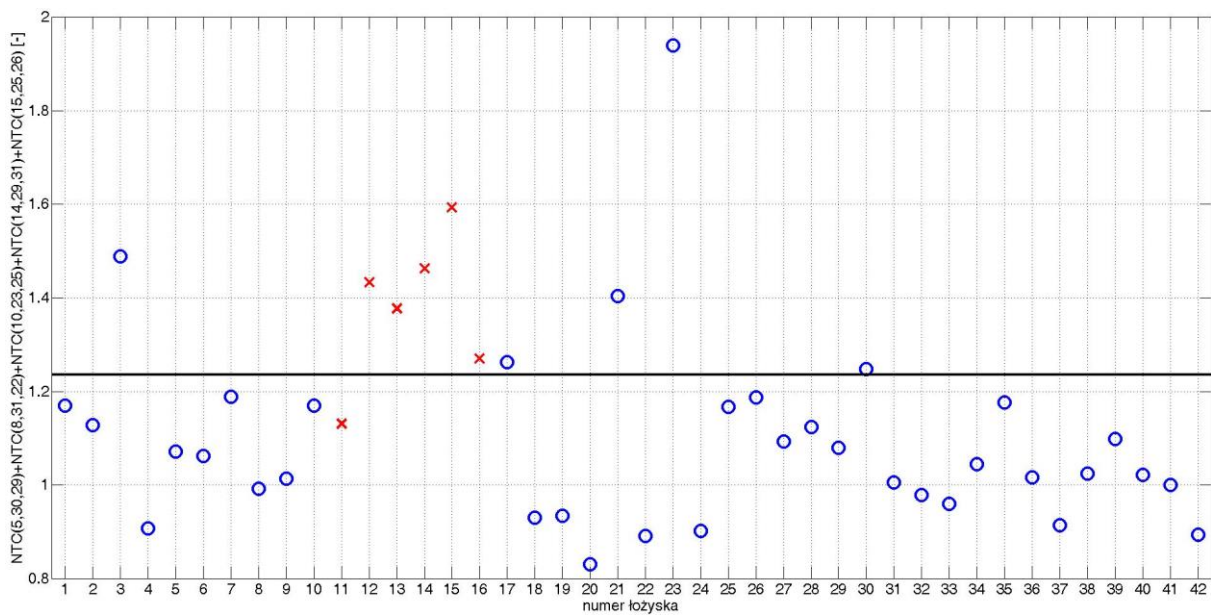
Rys. B. 3. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 1,1 kW



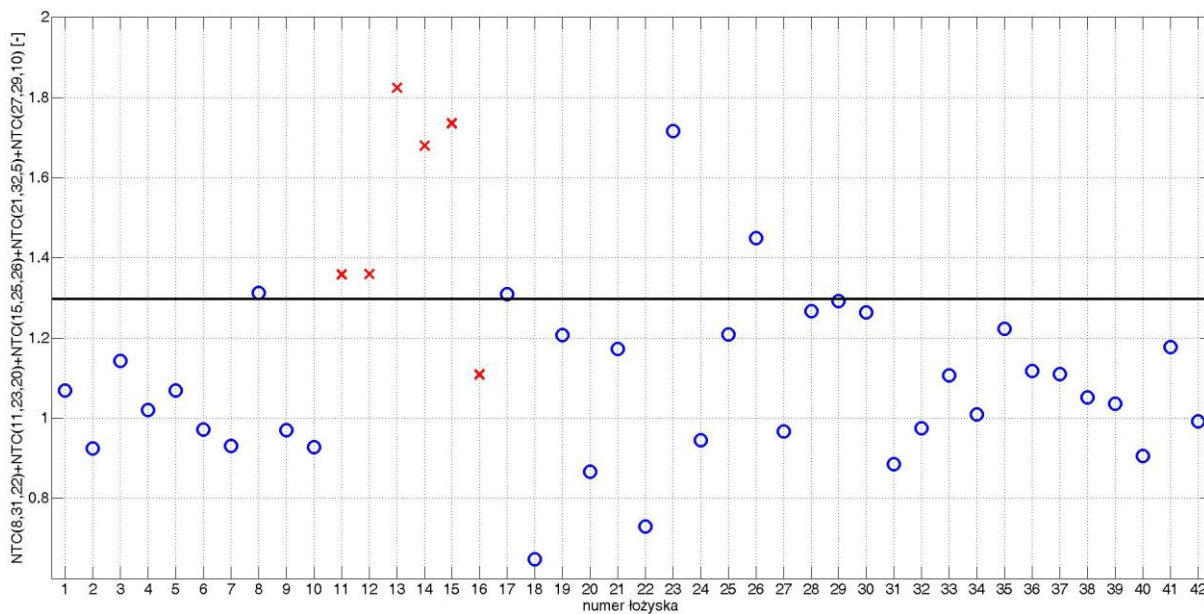
Rys. B. 4. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 1,1 kW



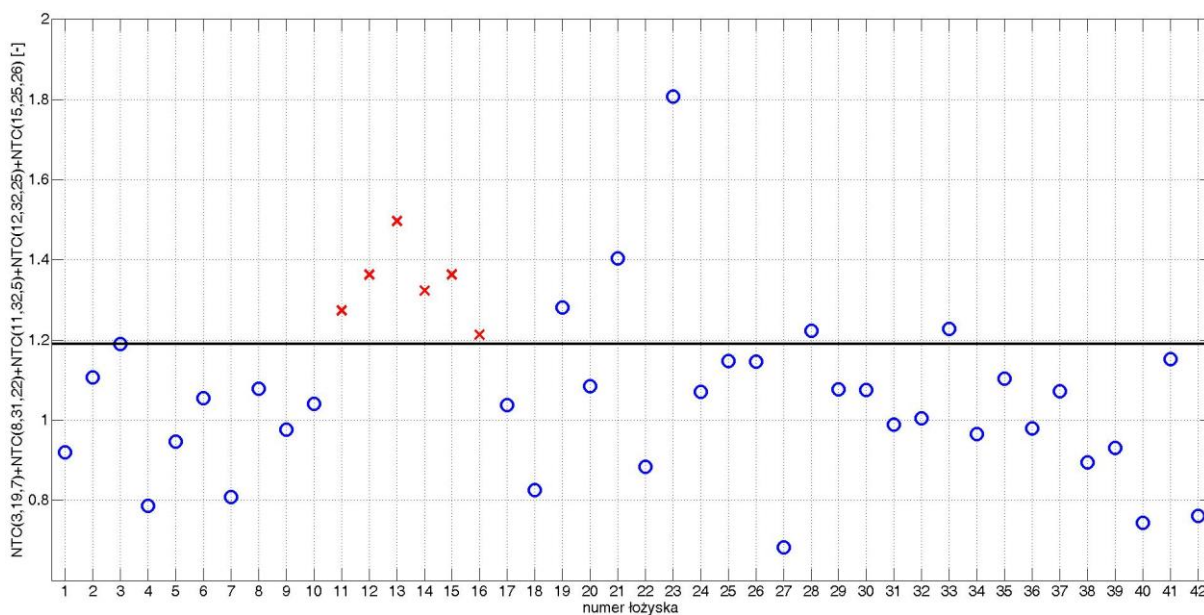
Rys. B. 5. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 1,0 kW



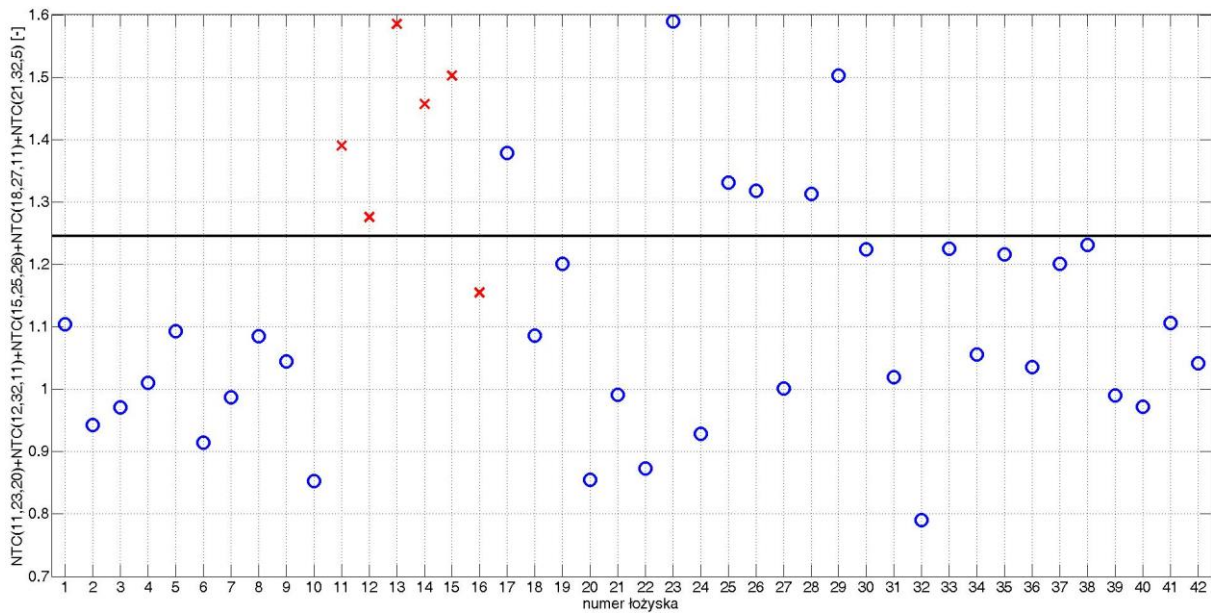
Rys. B. 6. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 1,0 kW



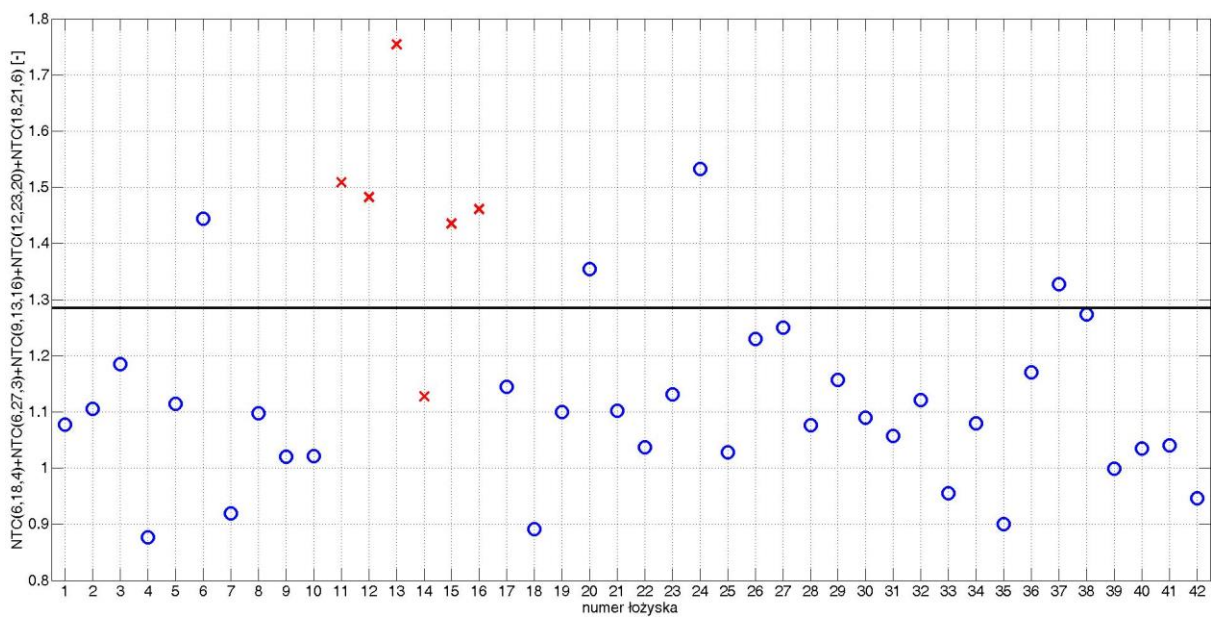
Rys. B. 7. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 1,0 kW



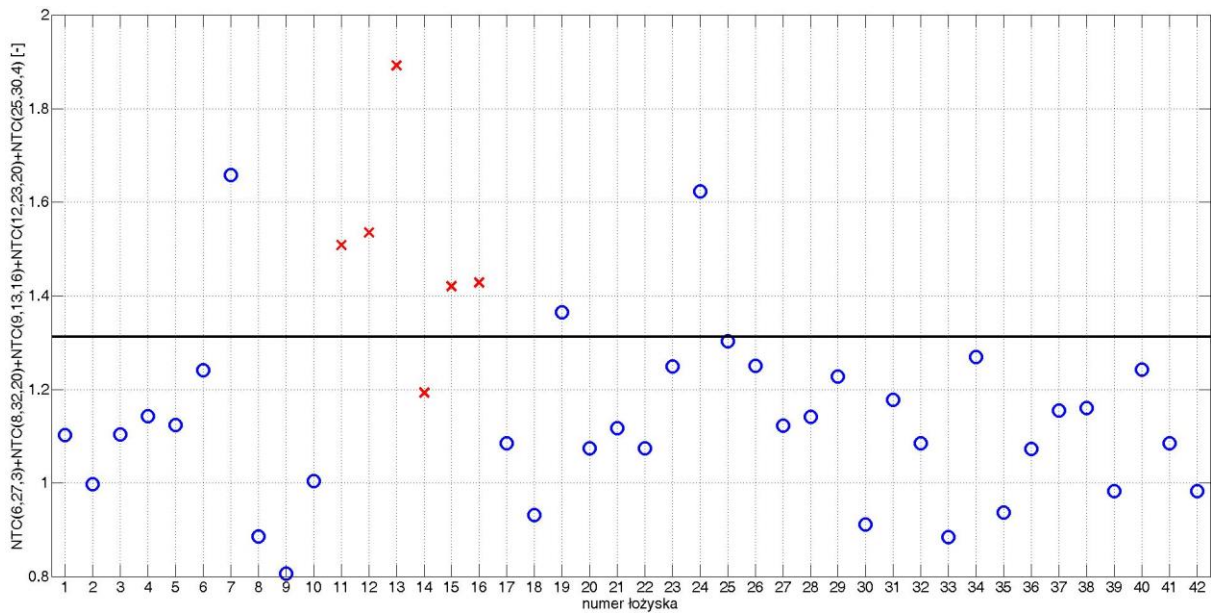
Rys. B. 8. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 1,0 kW



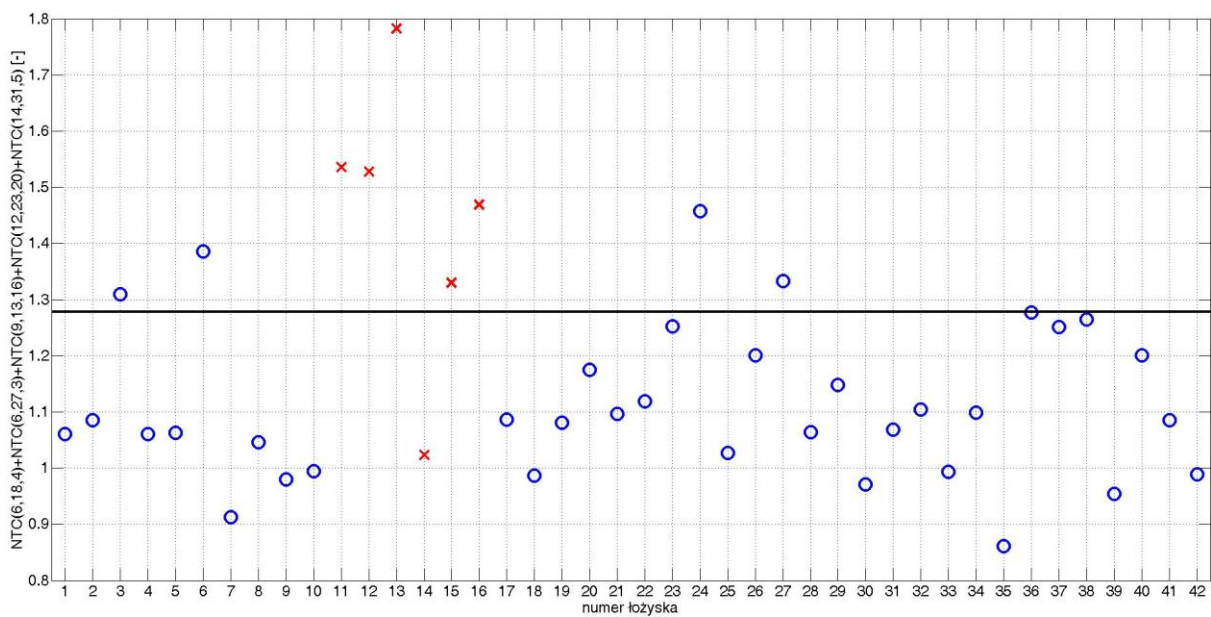
Rys. B. 9. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 1,0 kW



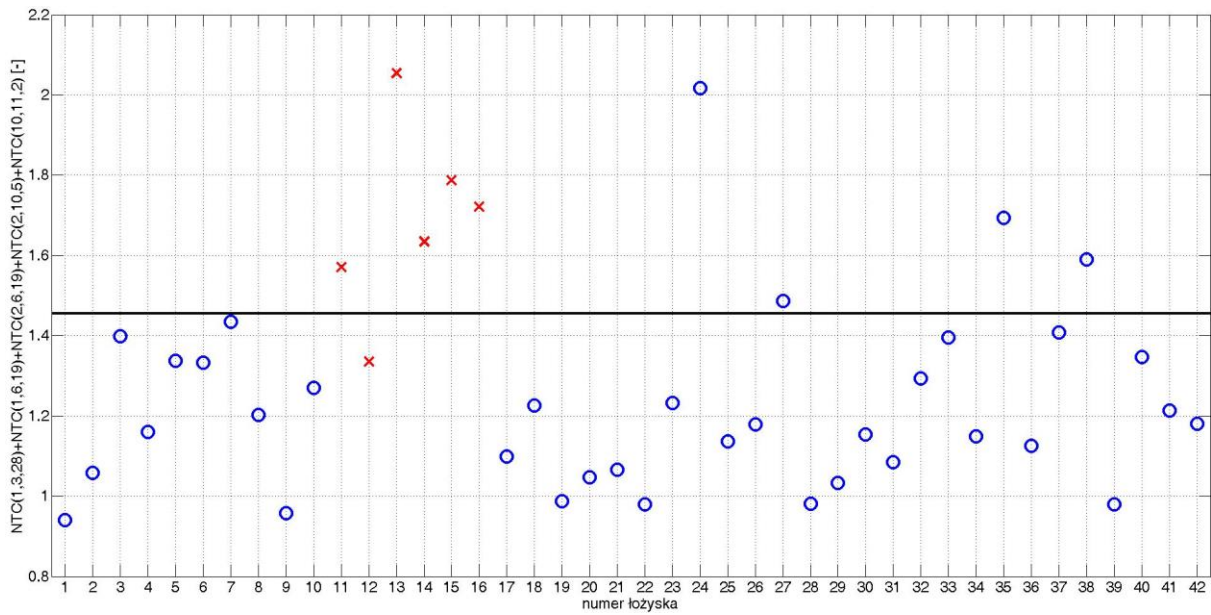
Rys. B. 10. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 0,9 kW



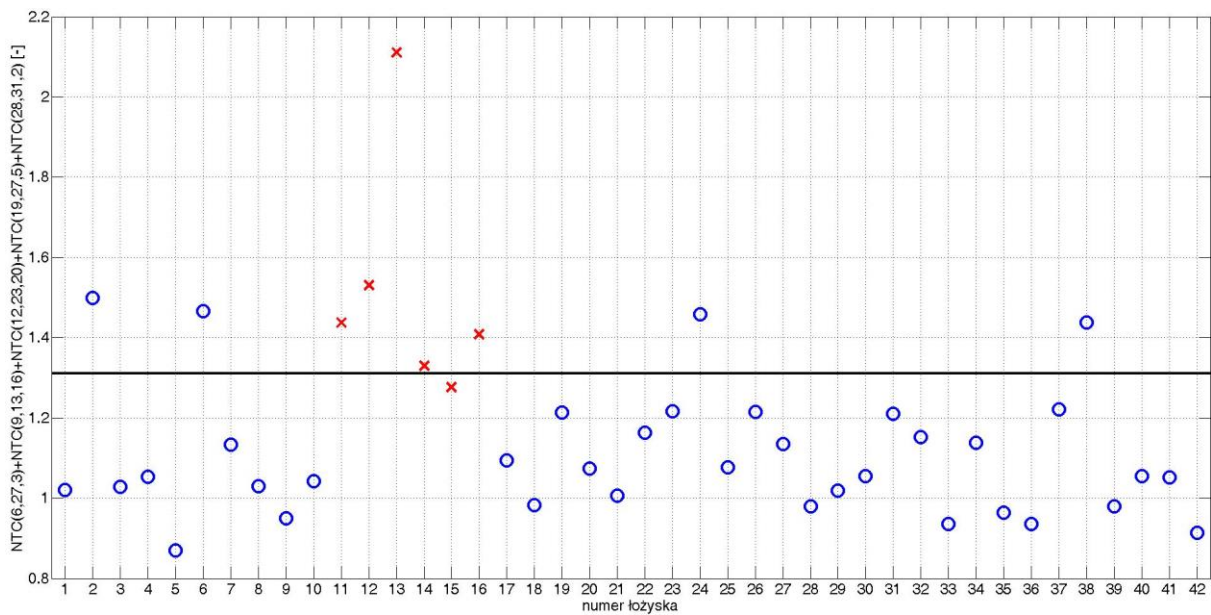
Rys. B. 11. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 0,9 kW



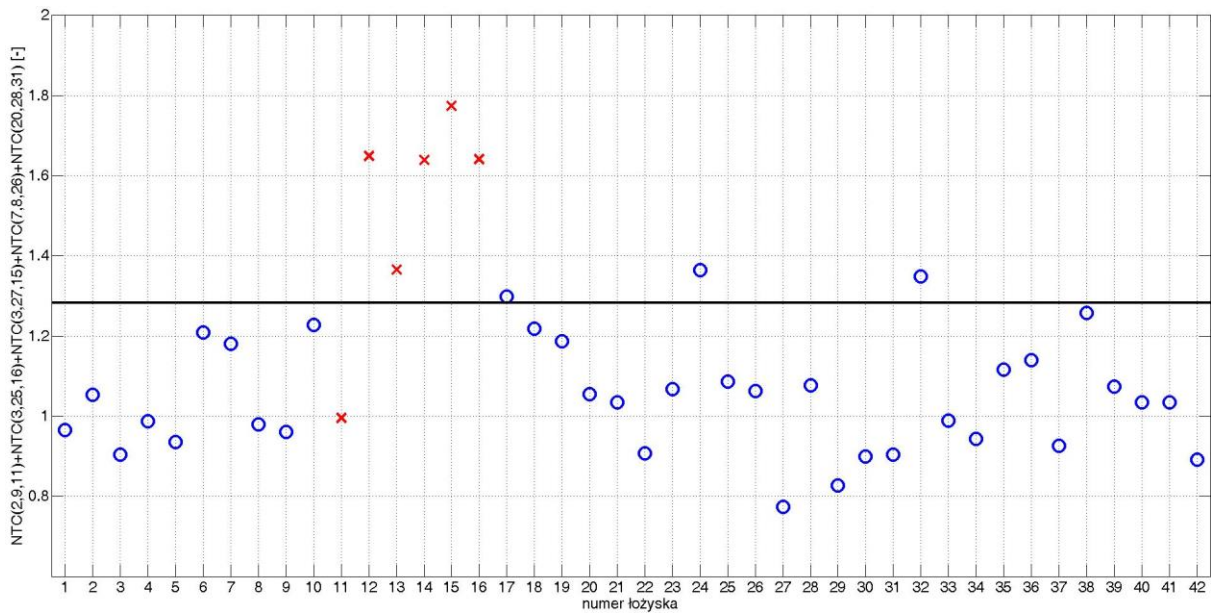
Rys. B. 12. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 0,9 kW



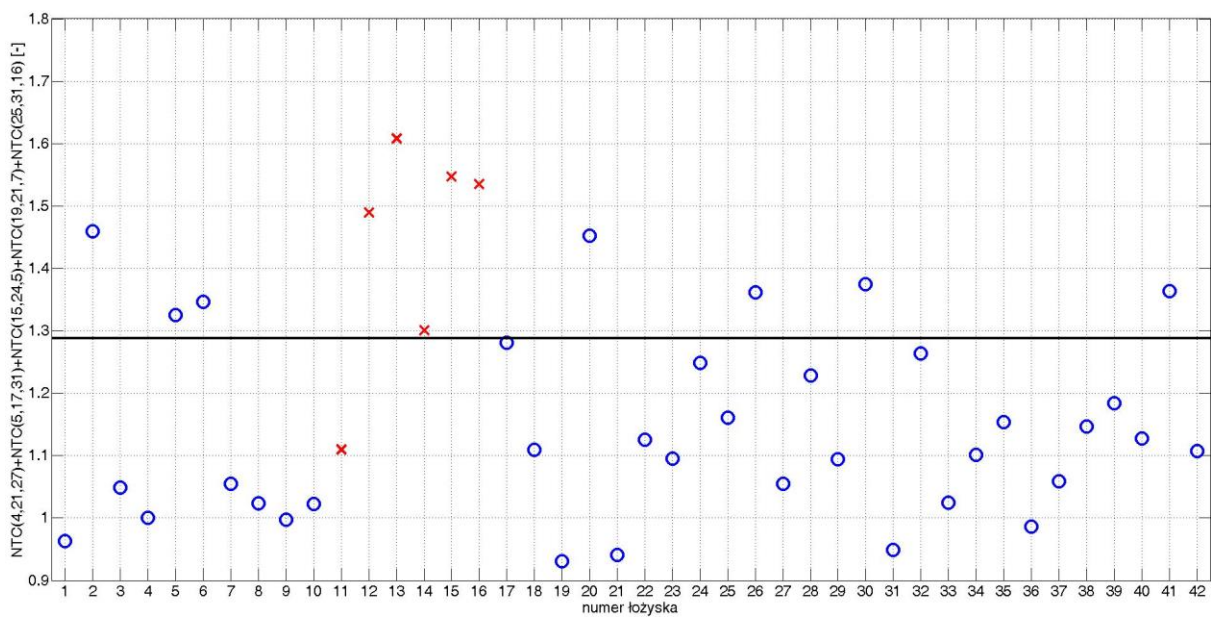
Rys. B. 13. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 0,9 kW



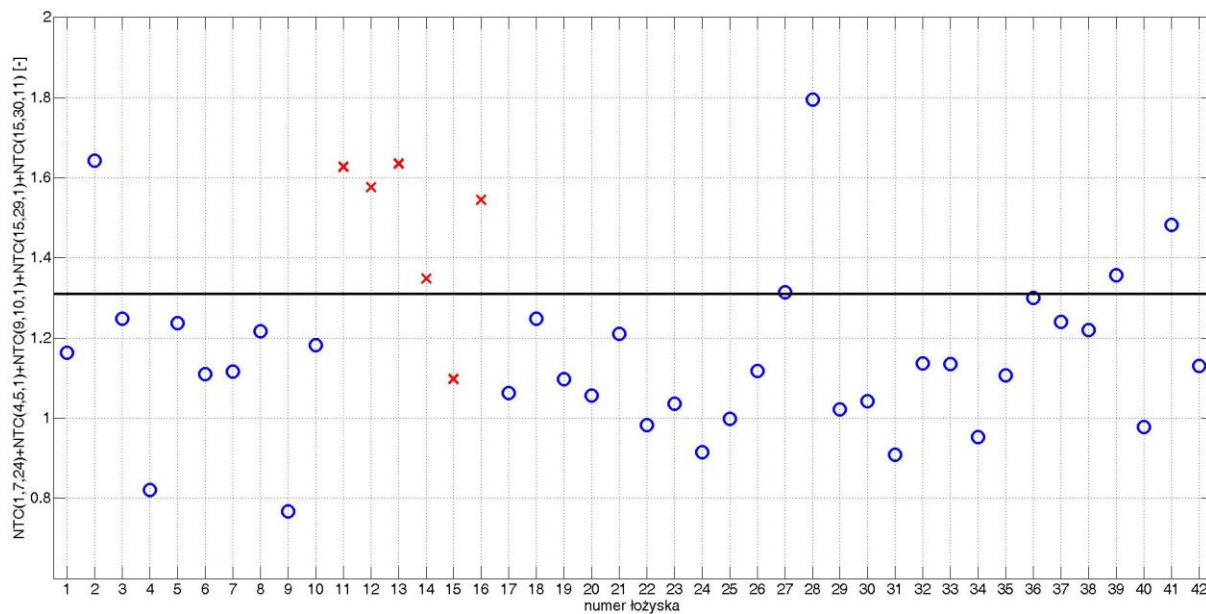
Rys. B. 14. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 0,9 kW



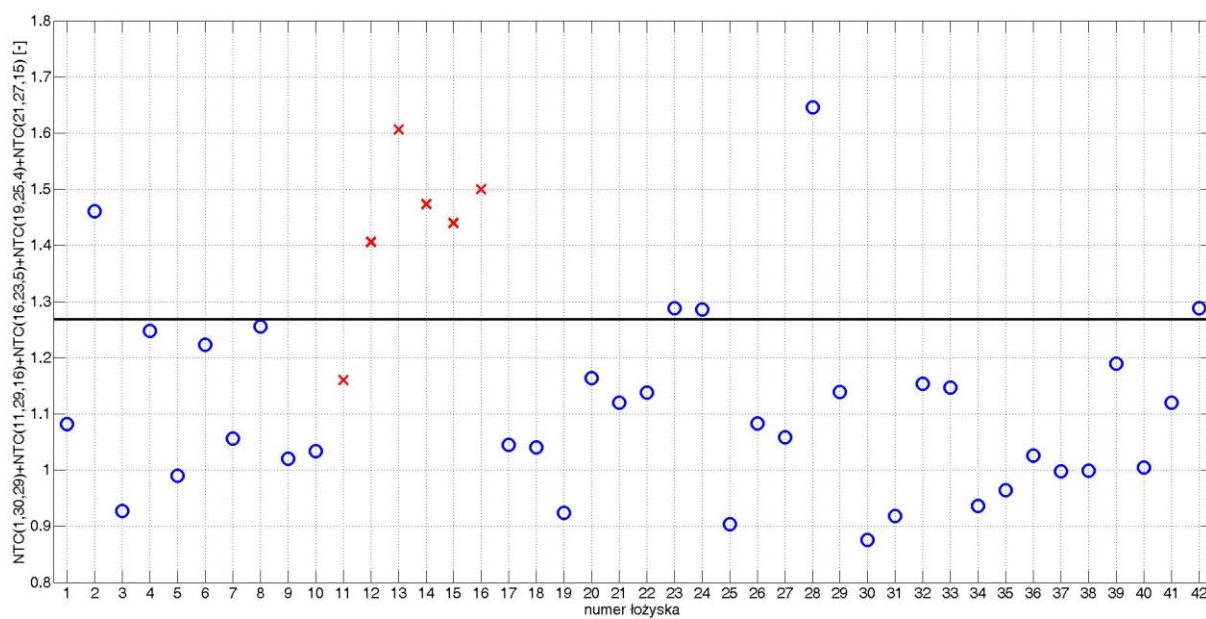
Rys. B. 15. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 0,8 kW



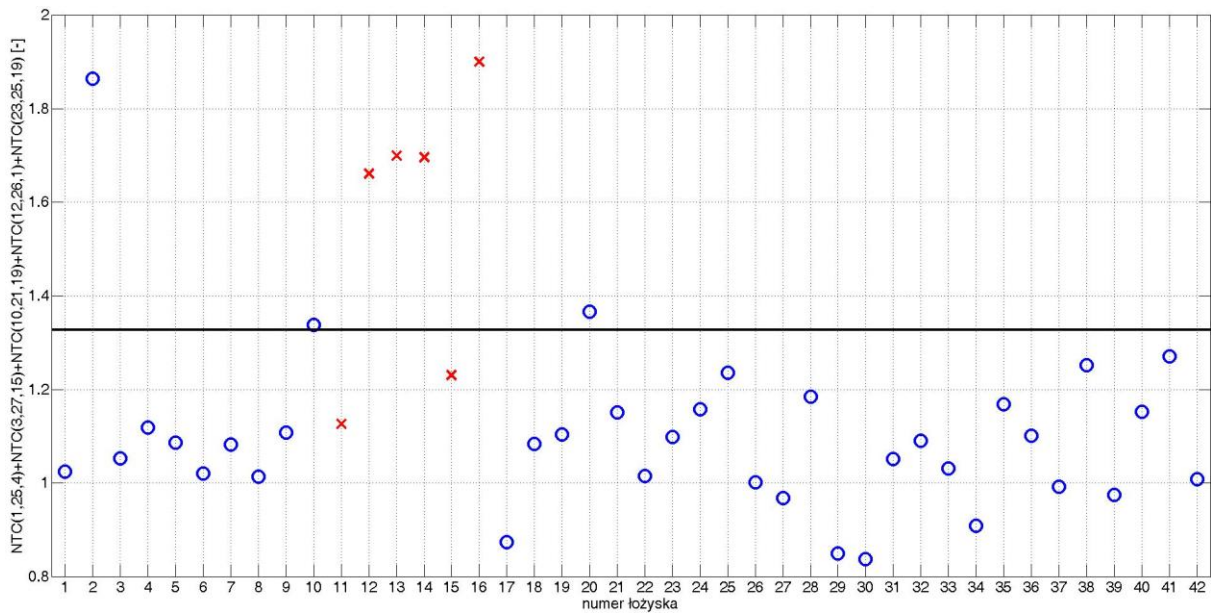
Rys. B. 16. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 0,8 kW



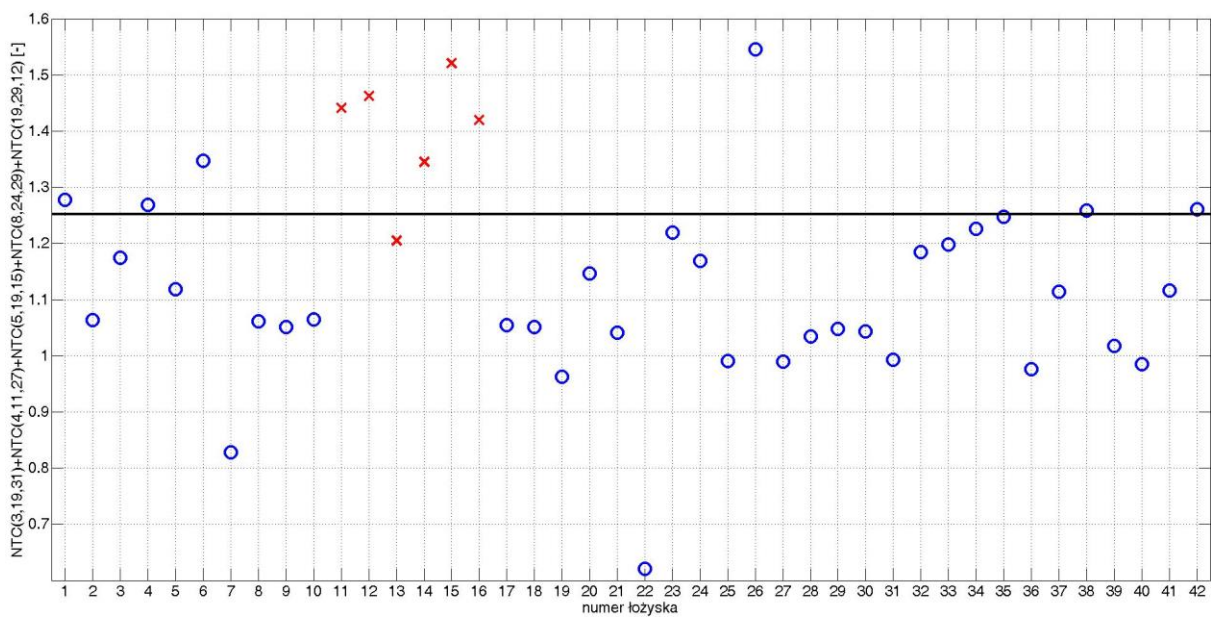
Rys. B. 17. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 0,8 kW



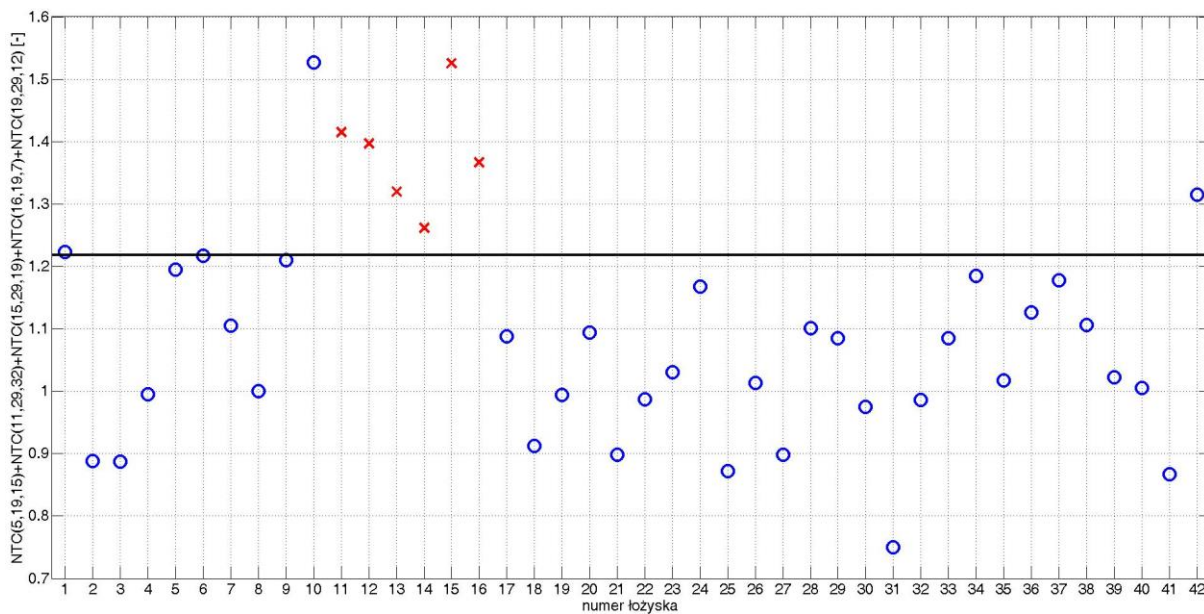
Rys. B. 18. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 0,8 kW



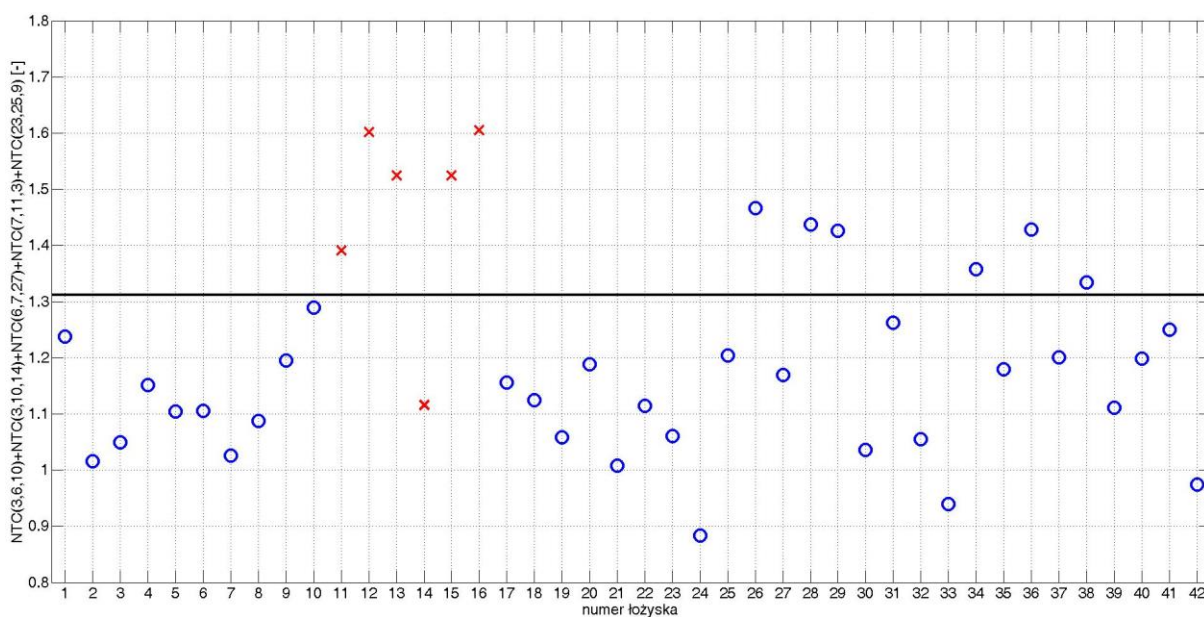
Rys. B. 19. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 0,8 kW



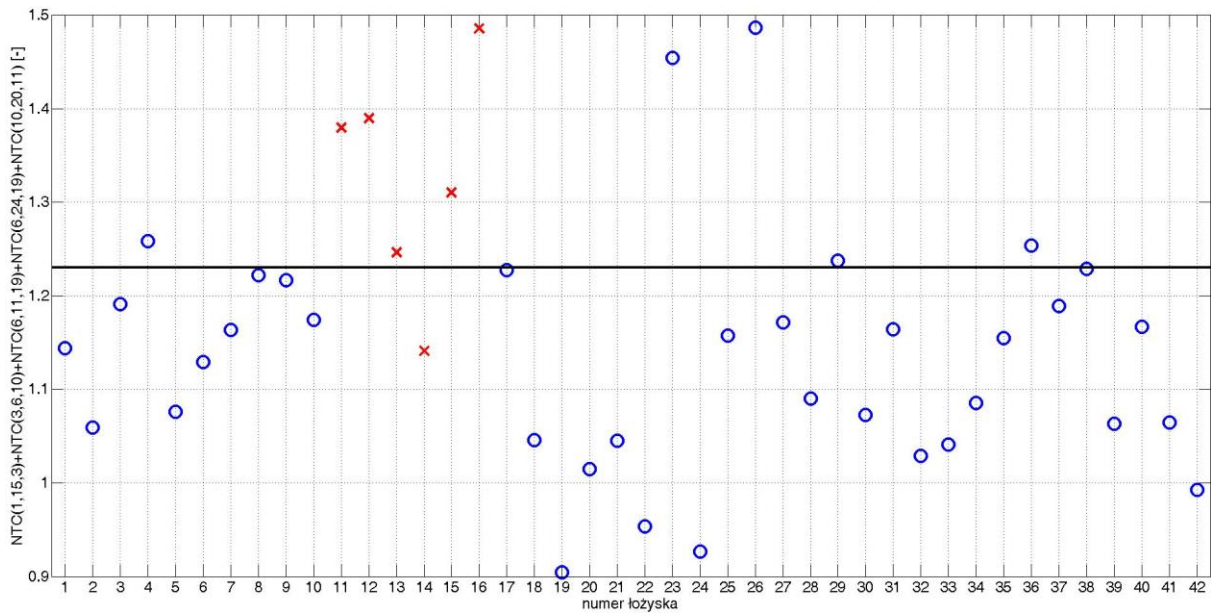
Rys. B. 20. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 0,7 kW



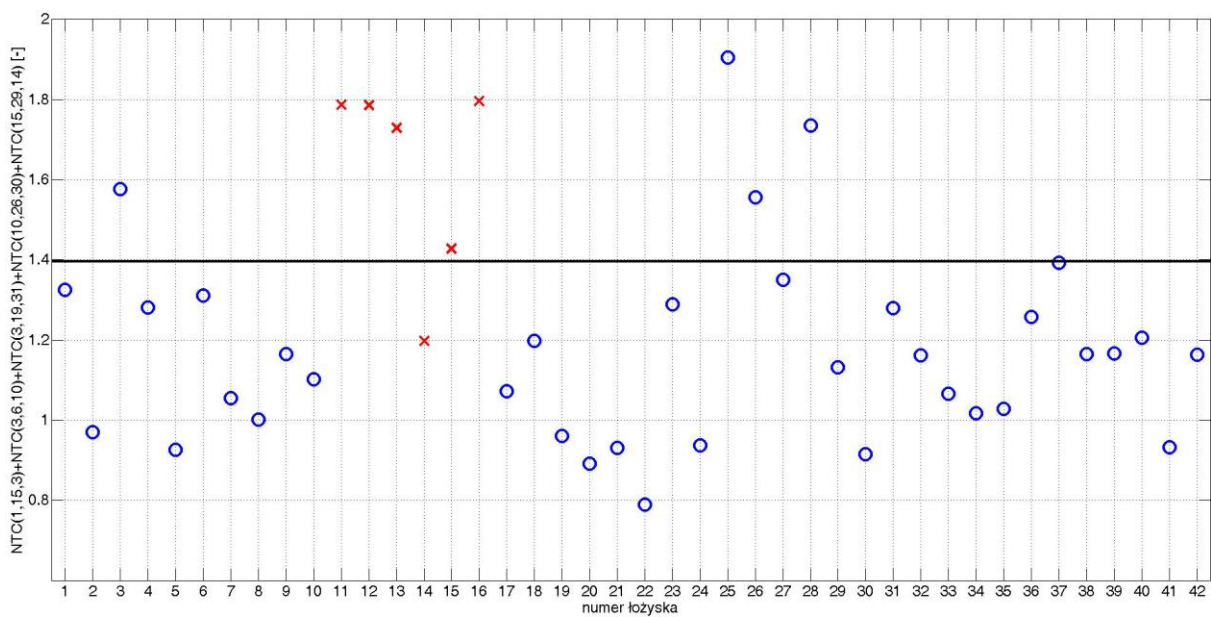
Rys. B. 21. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 0,7 kW



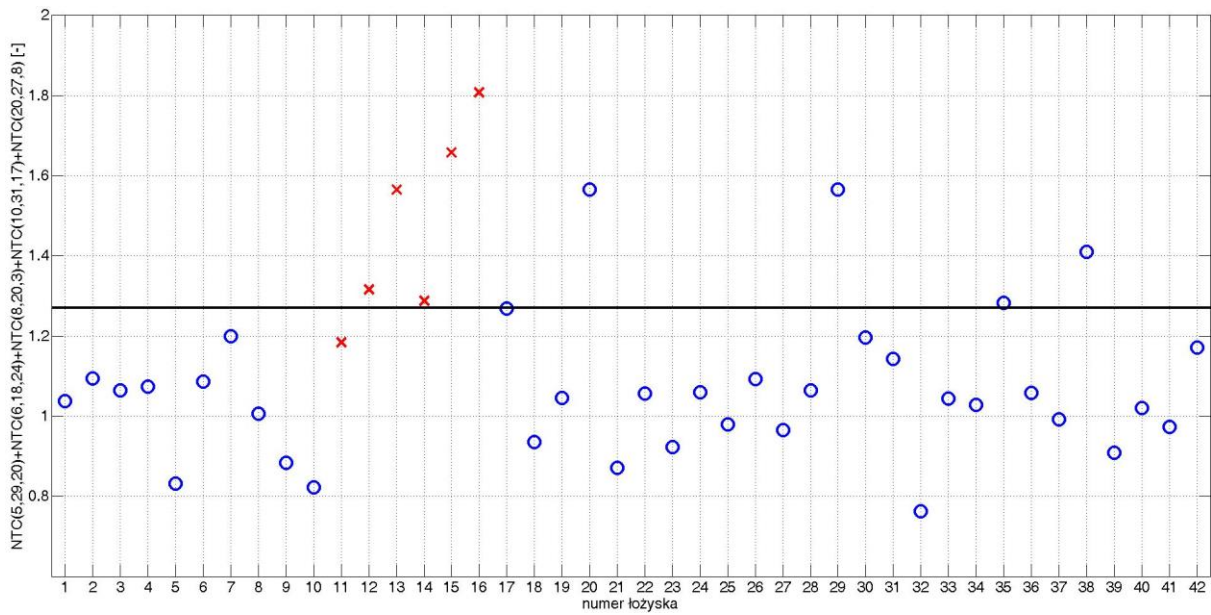
Rys. B. 22. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 0,7 kW



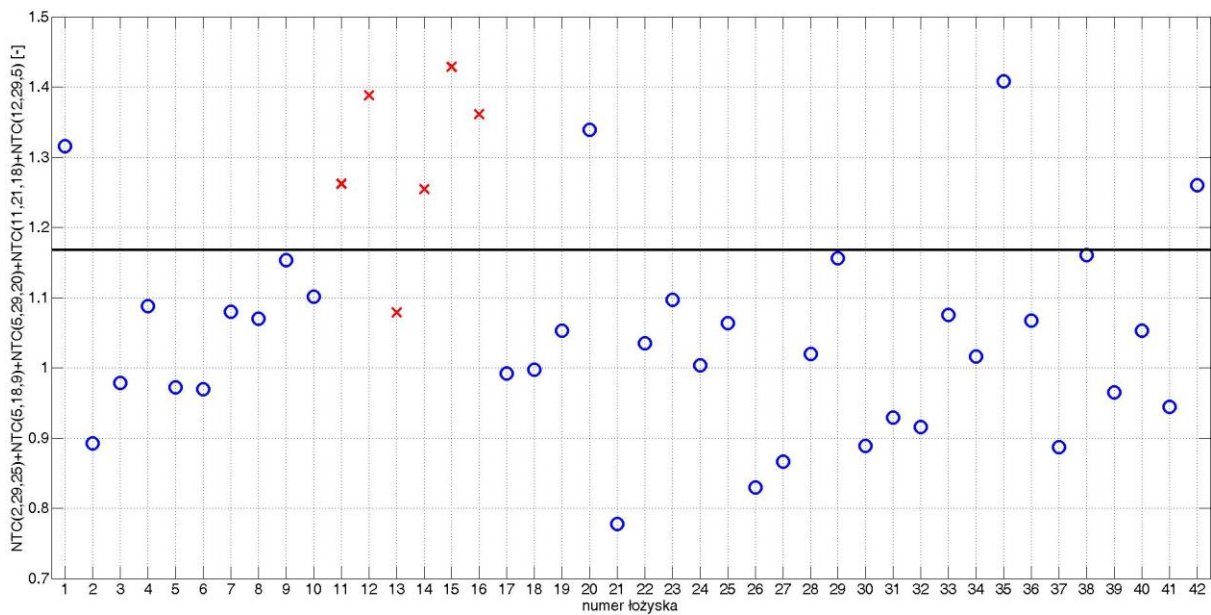
Rys. B. 23. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 0,7 kW



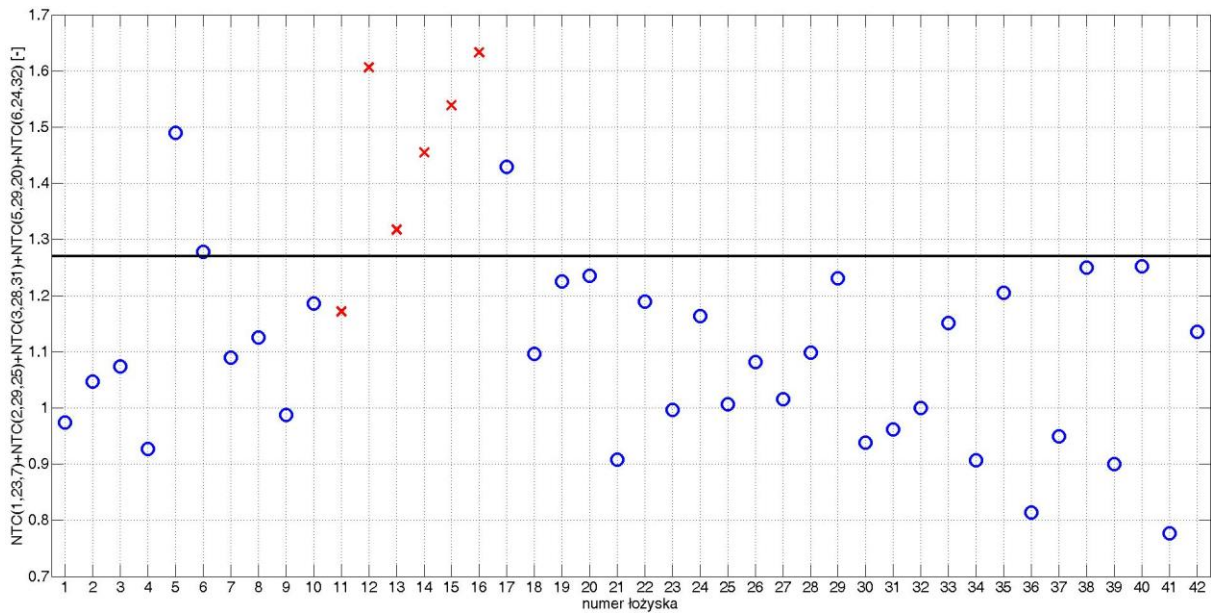
Rys. B. 24. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 0,7 kW



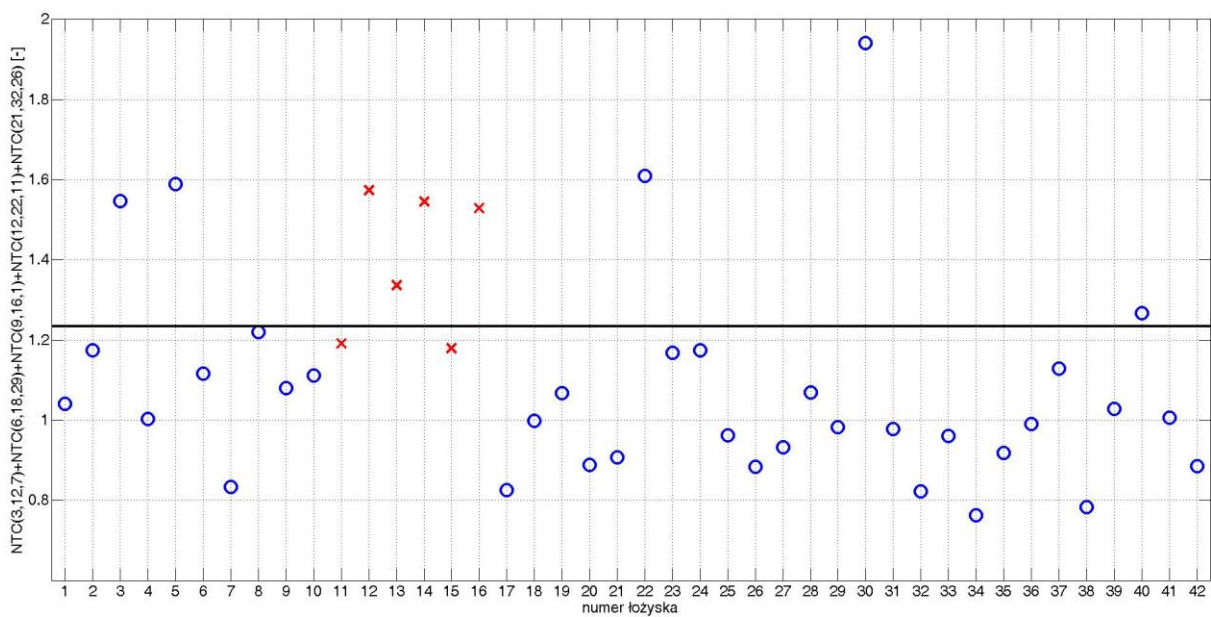
Rys. B. 25. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 0,6 kW



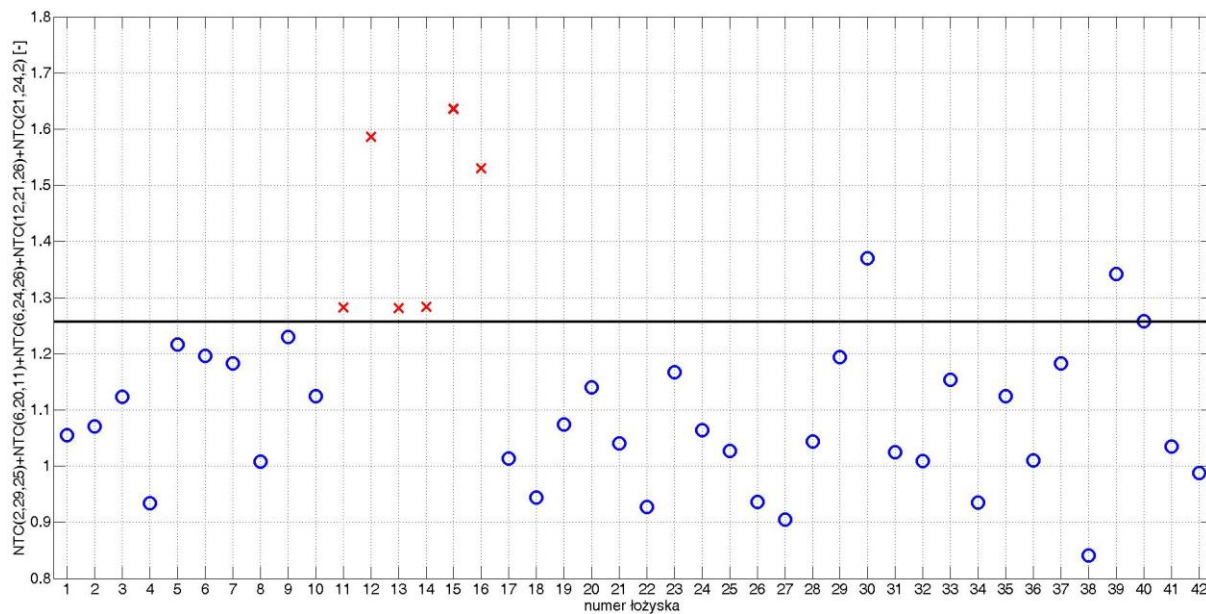
Rys. B. 26. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 0,6 kW



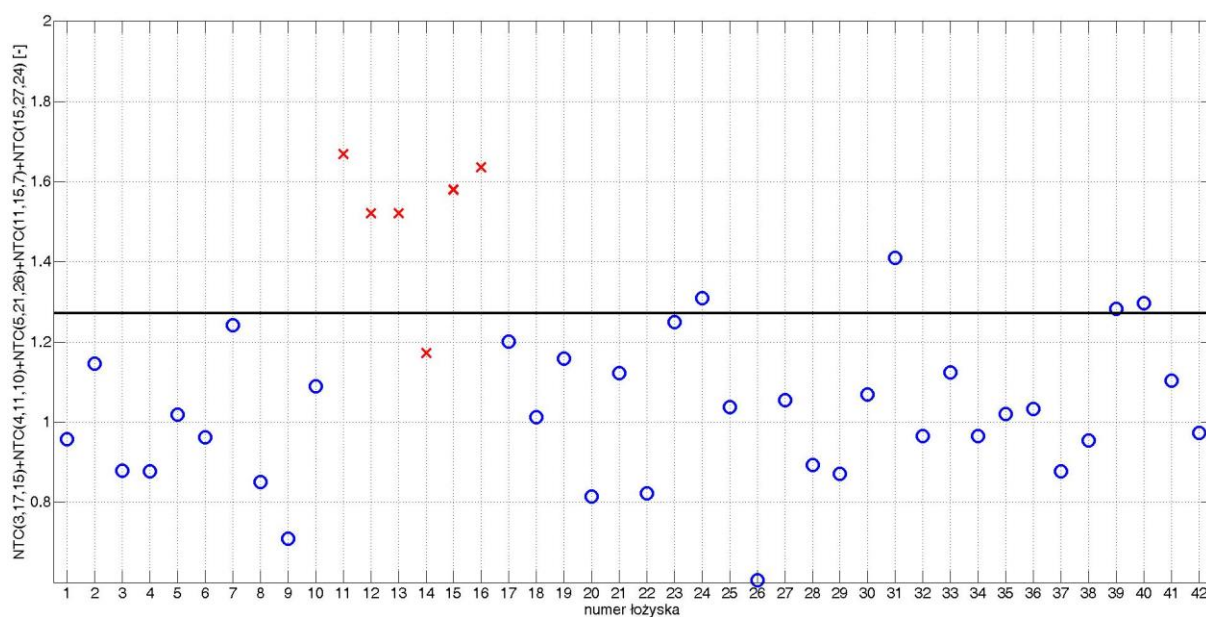
Rys. B. 27. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 0,6 kW



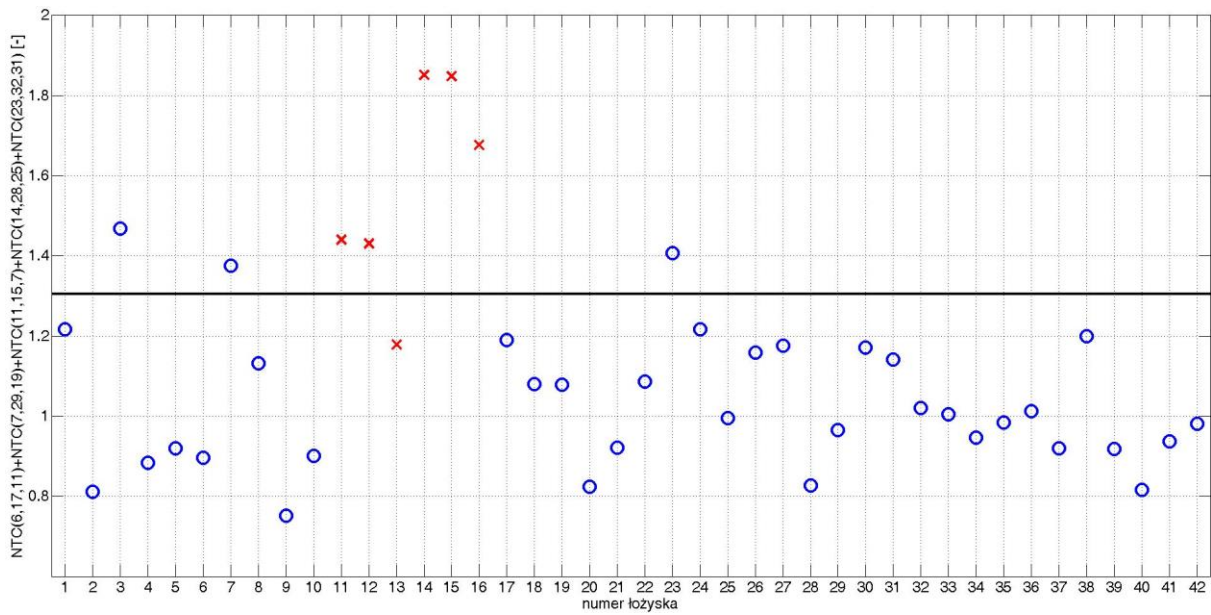
Rys. B. 28. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 0,6 kW



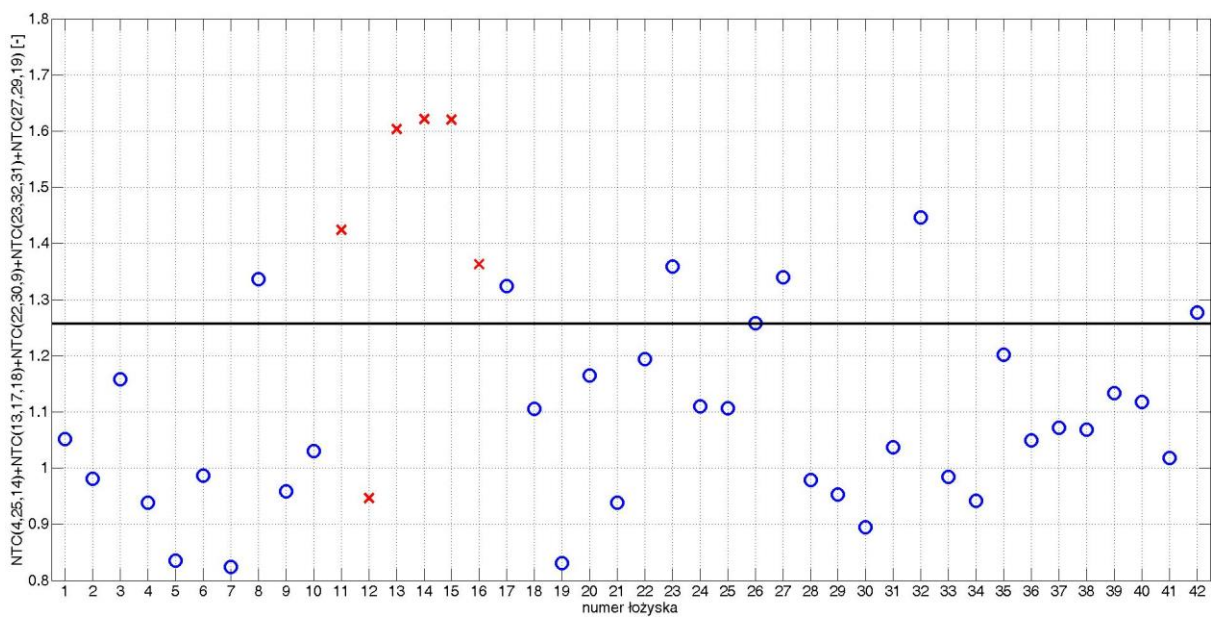
Rys. B. 29. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 0,6 kW



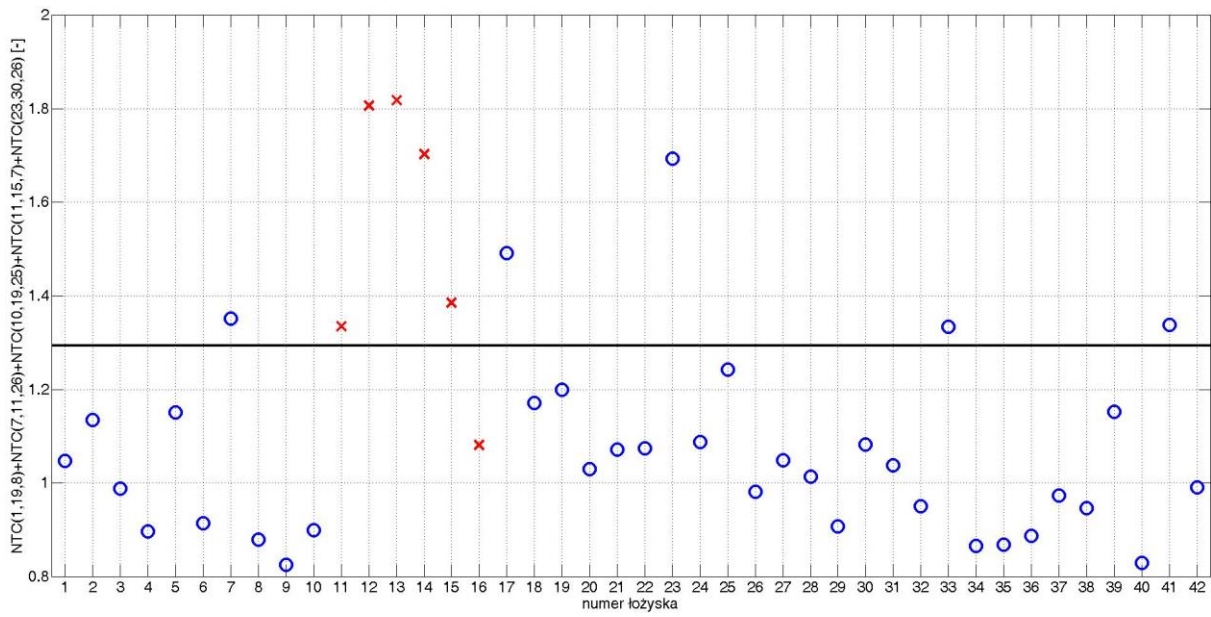
Rys. B. 30. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 0,5 kW



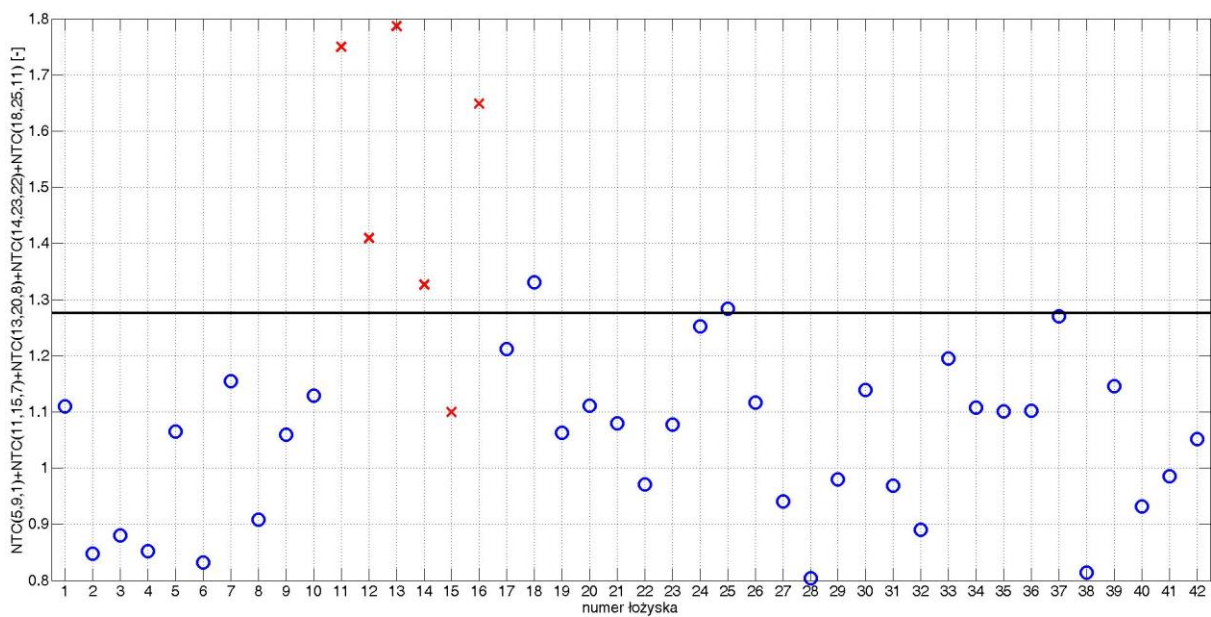
Rys. B. 31. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 0,5 kW



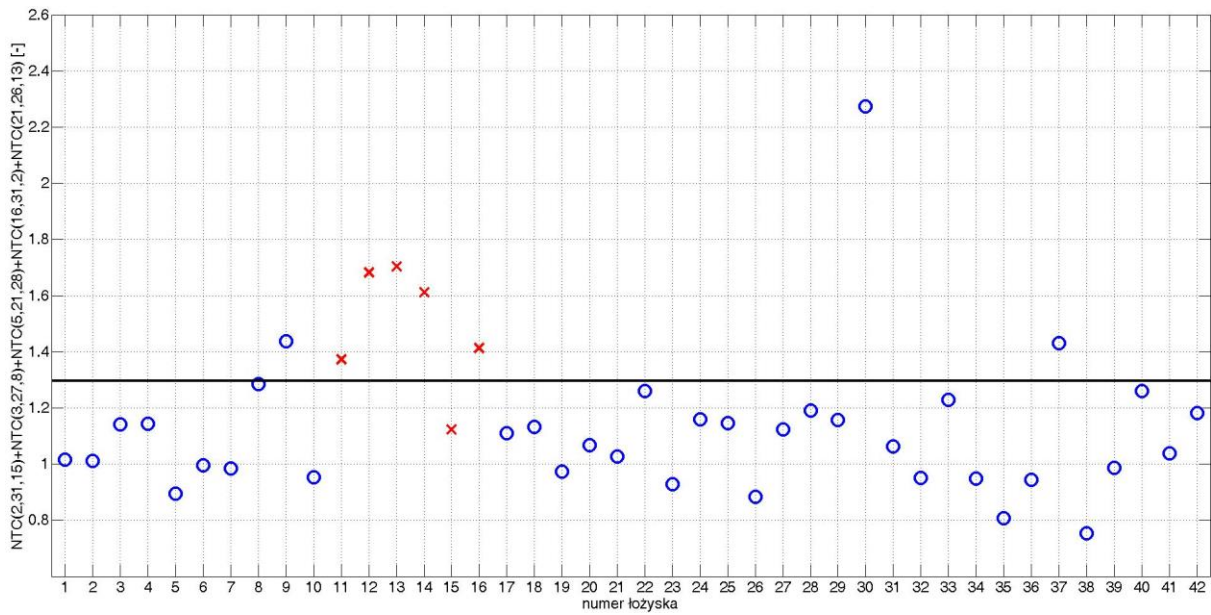
Rys. B. 32. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 0,5 kW



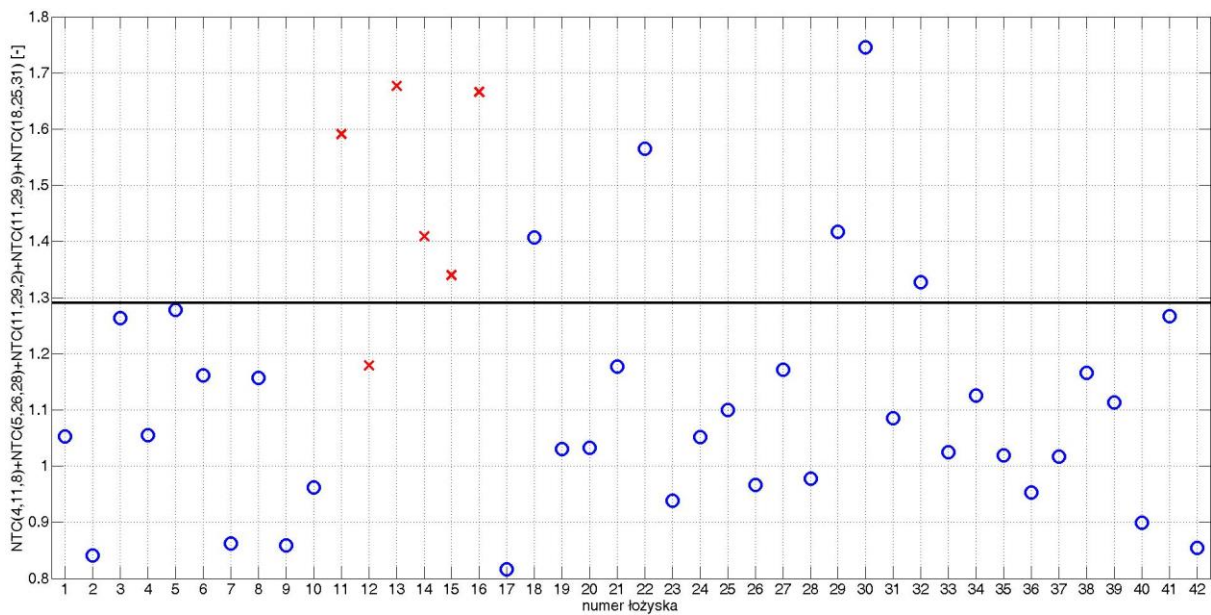
Rys. B. 33. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 0,5 kW



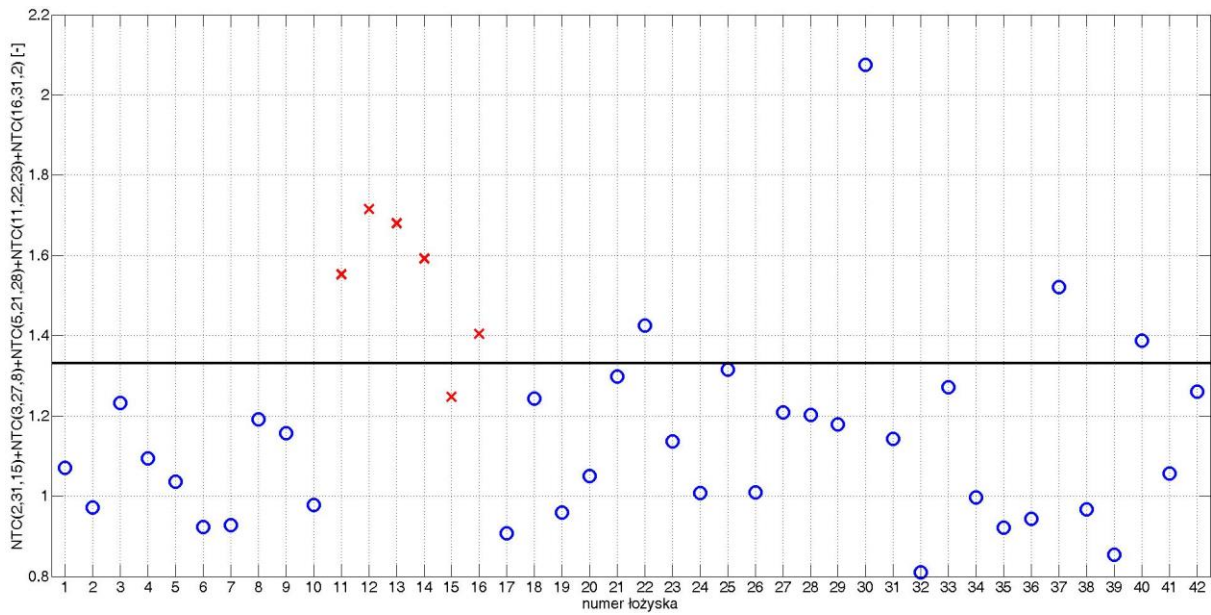
Rys. B. 34. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 0,5 kW



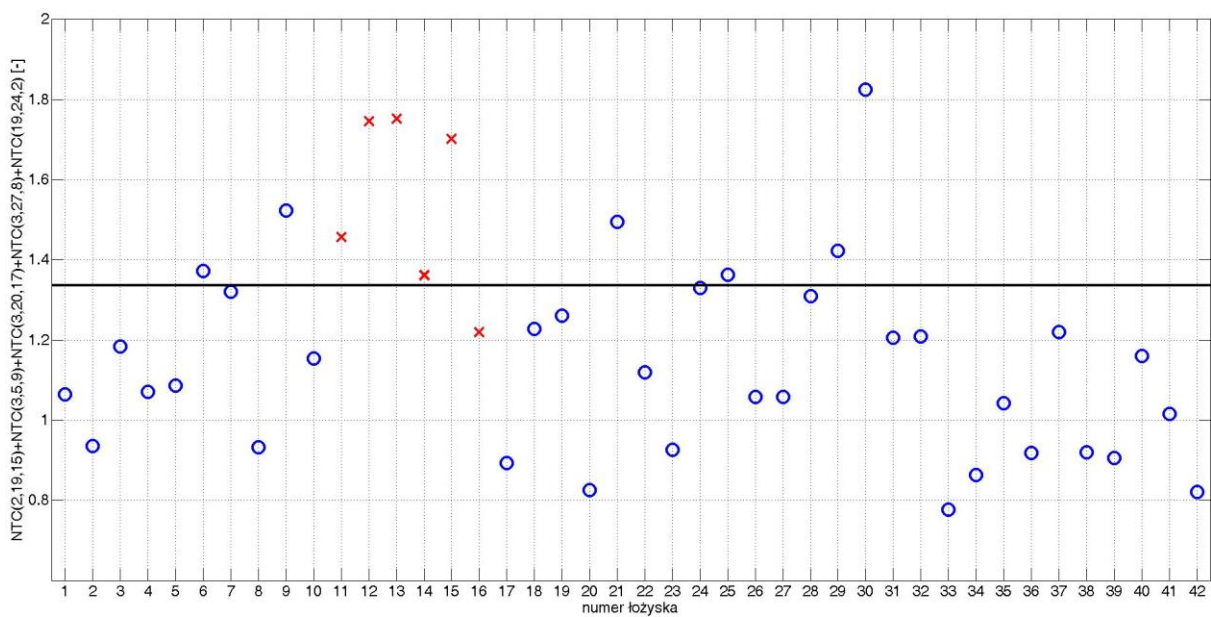
Rys. B. 35. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 bez obciążenia



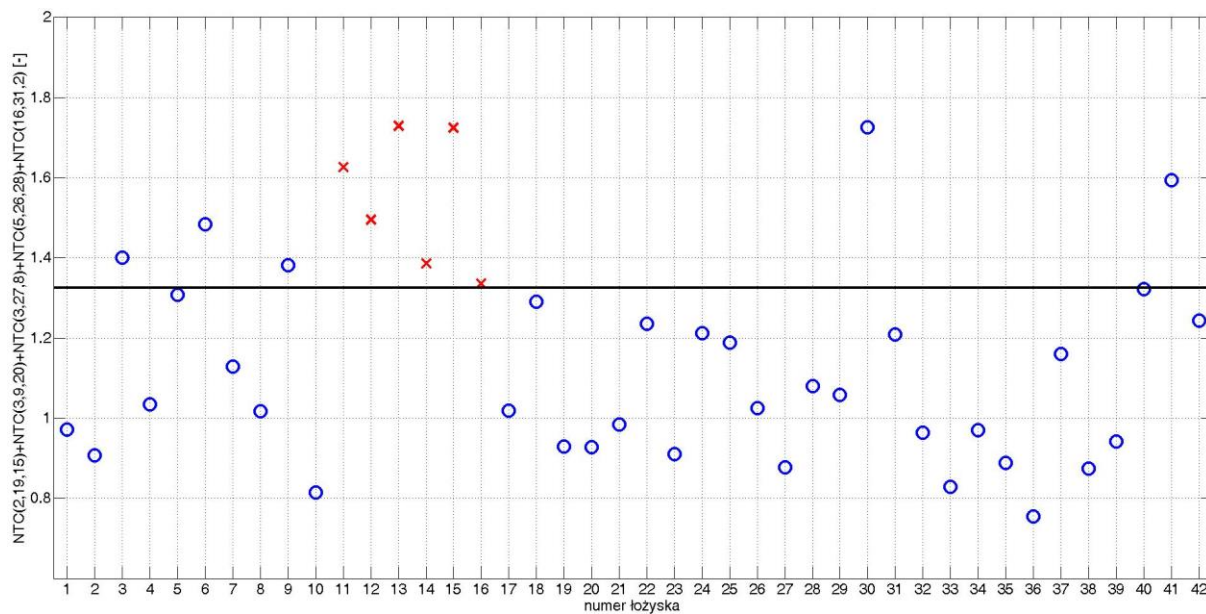
Rys. B. 36. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 bez obciążenia



Rys. B. 37. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 bez obciążenia



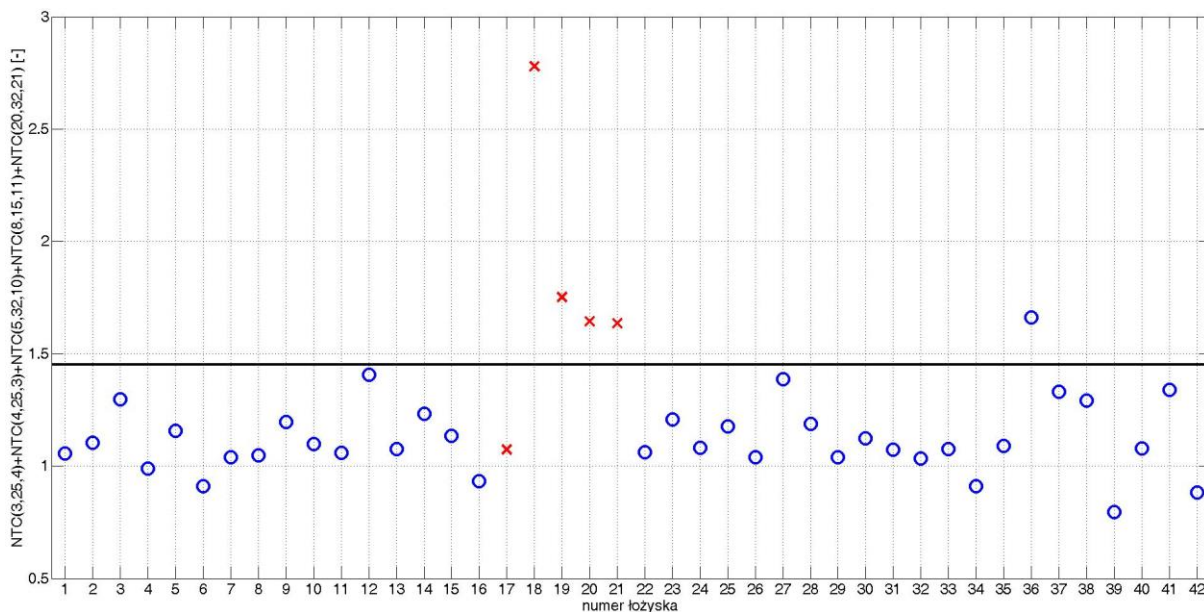
Rys. B. 38. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 bez obciążenia



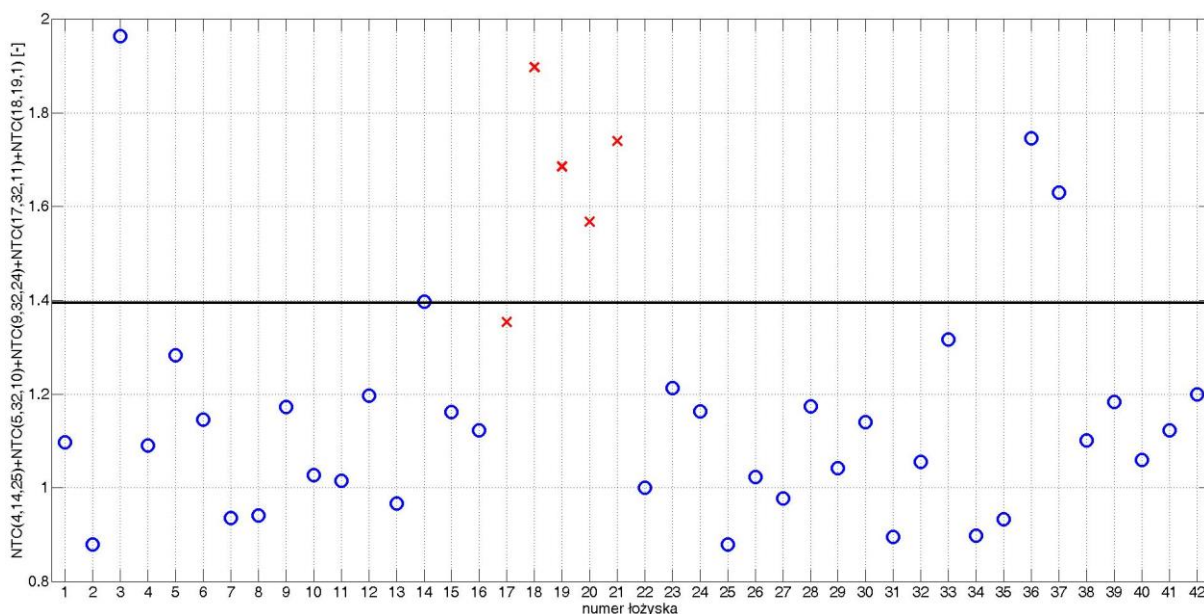
Rys. B. 39. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 bez obciążenia

ZAŁĄCZNIK C

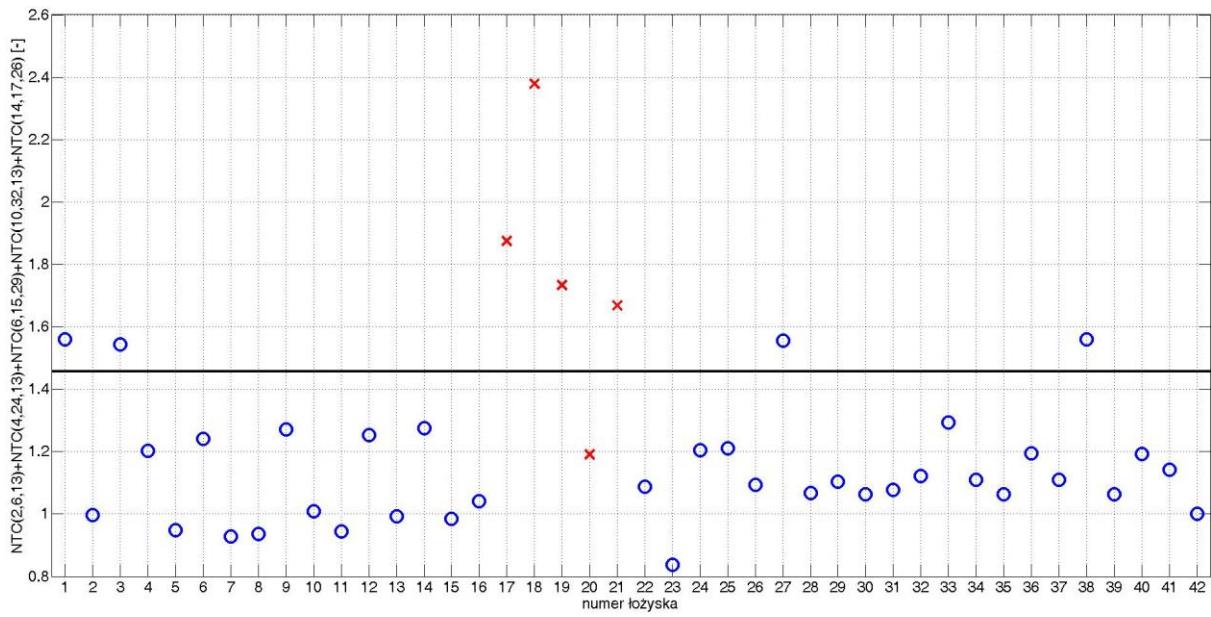
W załączniku C umieszczono wykresy wartości wskaźników diagnostycznych dla uszkodzeń elementów tocznych łożysk.



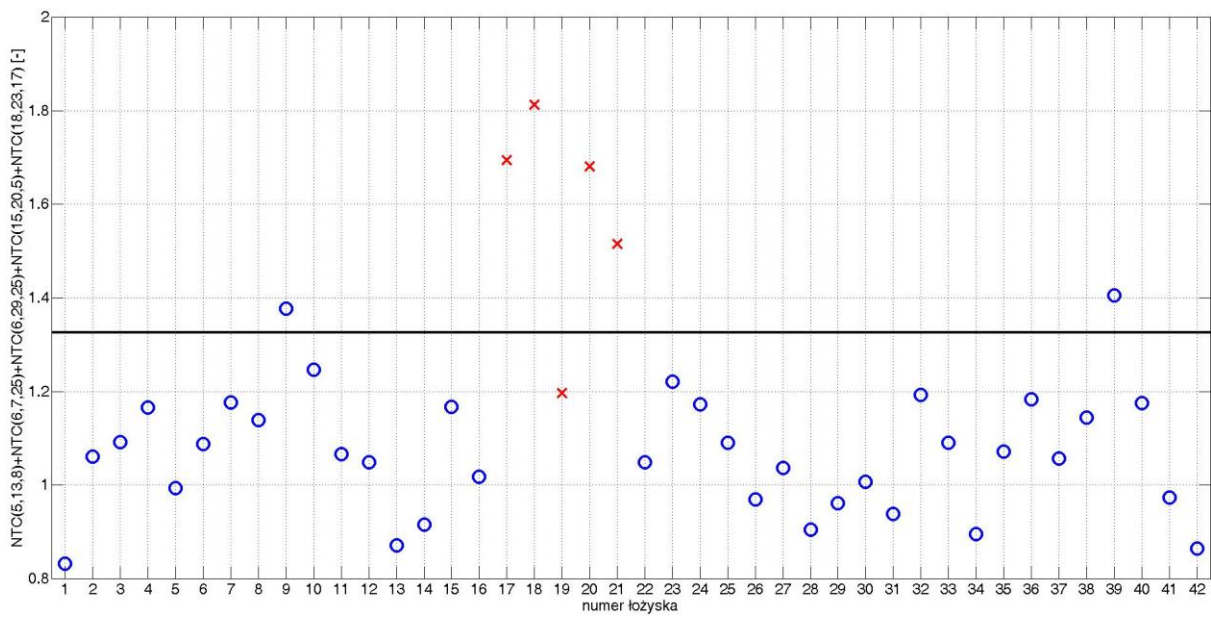
Rys. C. 1. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 1,1 kW



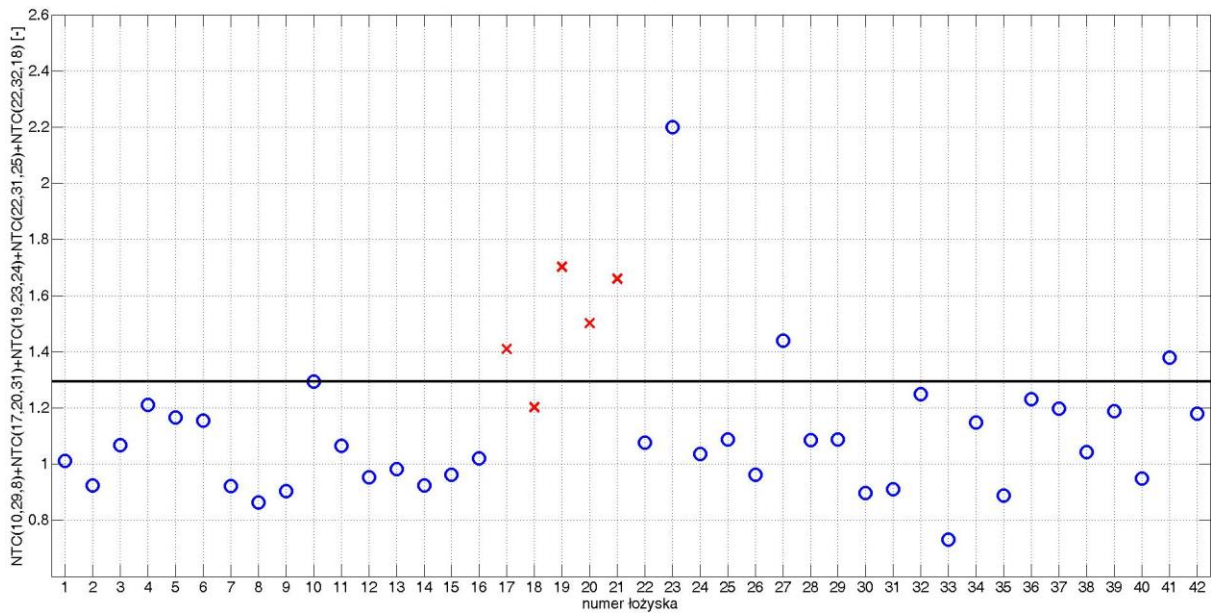
Rys. C. 2. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 1,1 kW



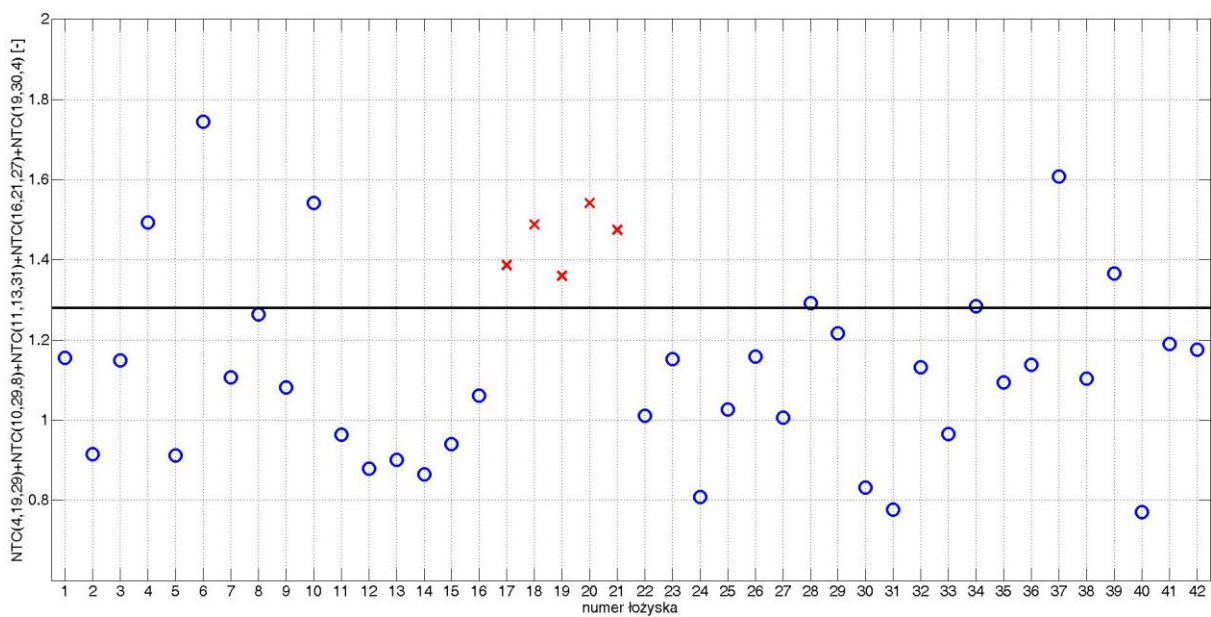
Rys. C. 3. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 1,1 kW



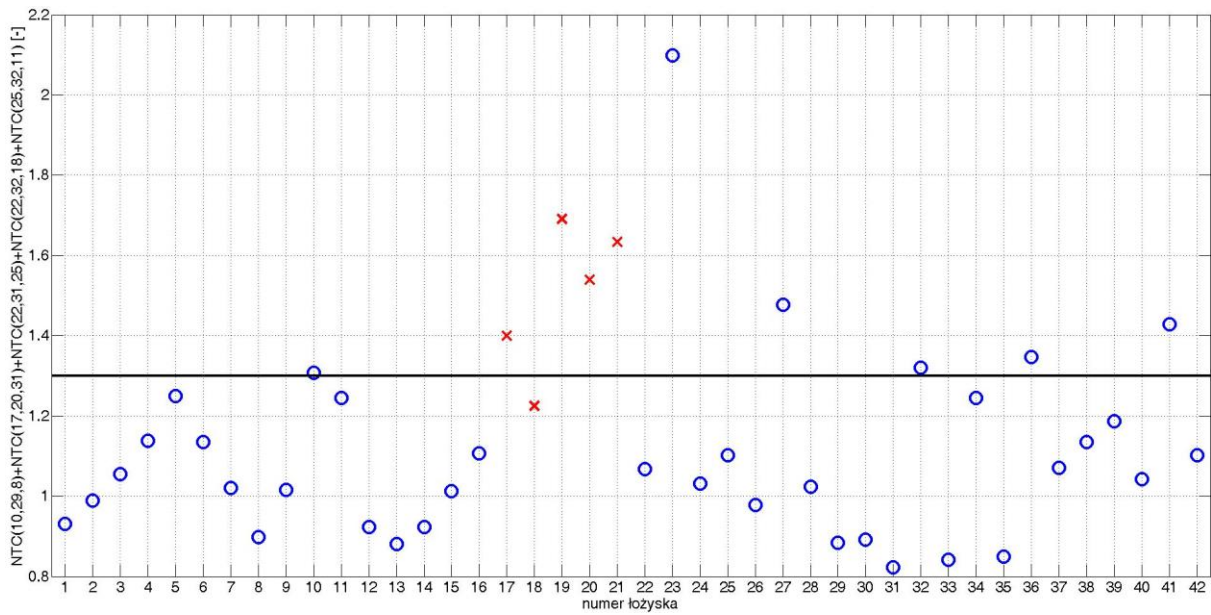
Rys. C. 4. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 1,1 kW



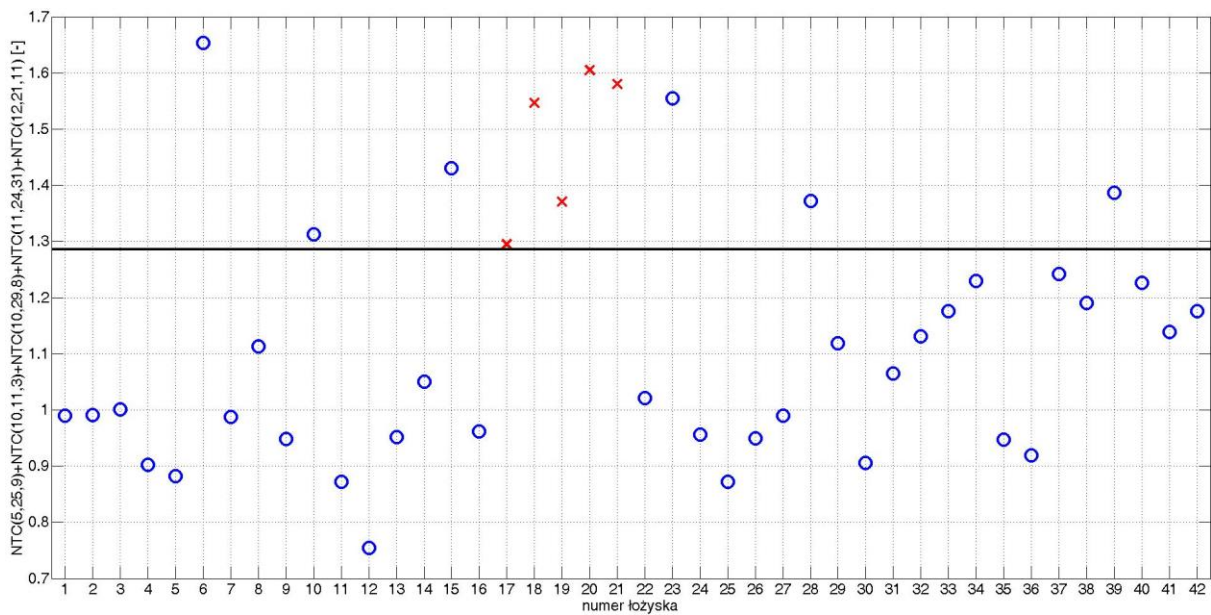
Rys. C. 5. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 1,0 kW



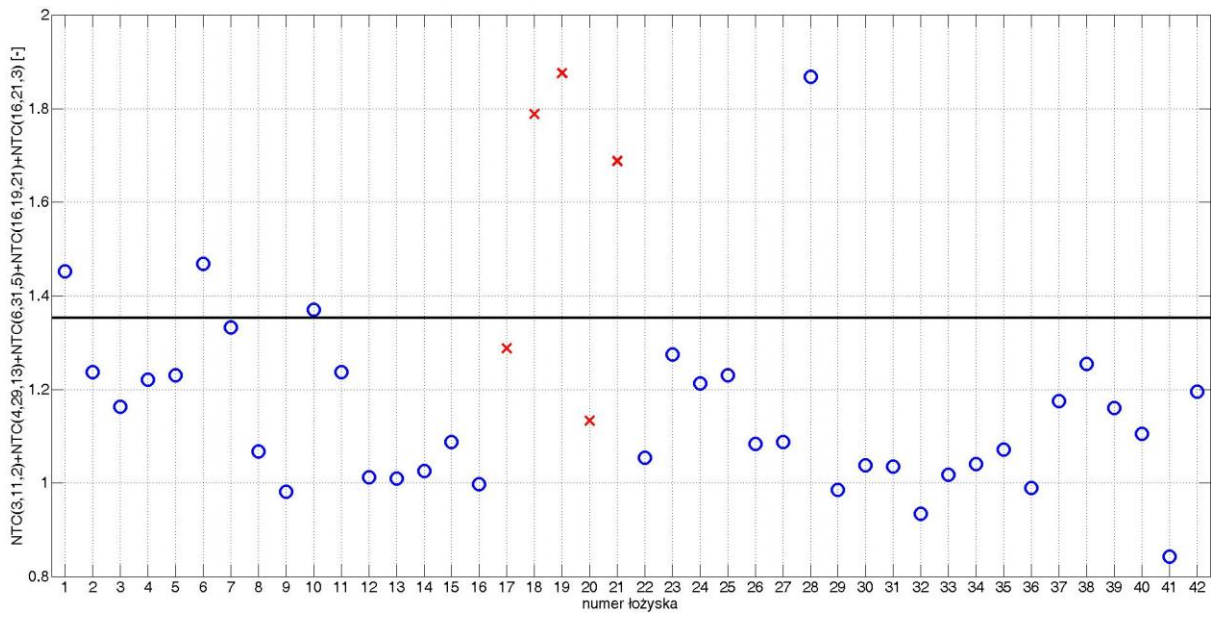
Rys. C. 6. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 1,0 kW



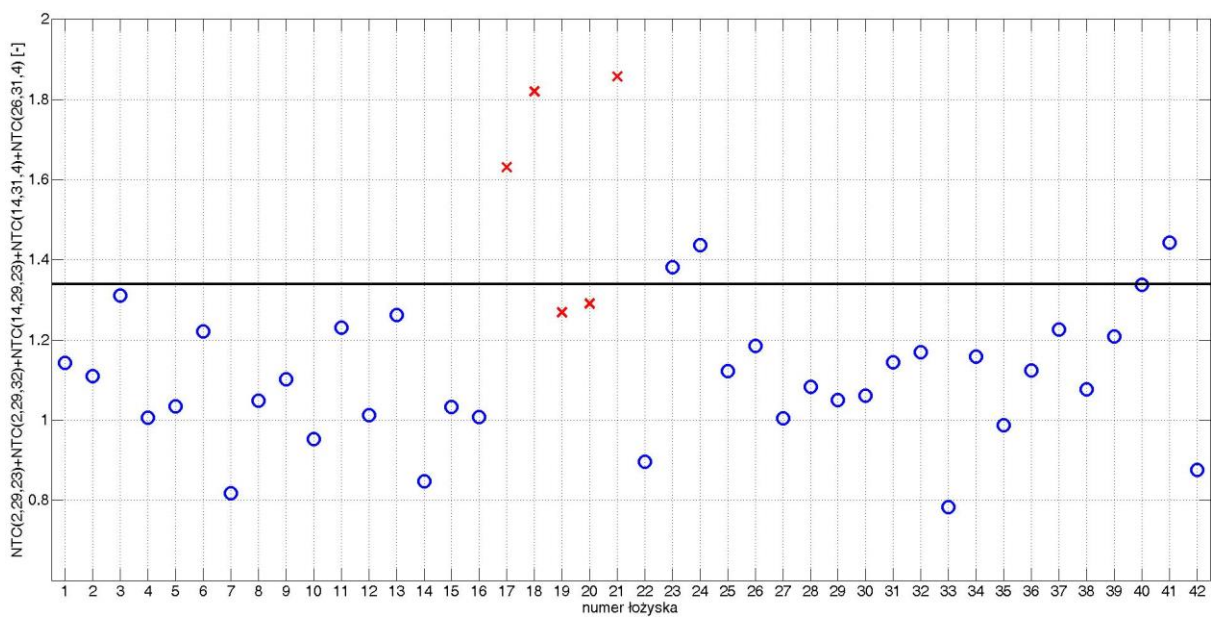
Rys. C. 7. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 1,0 kW



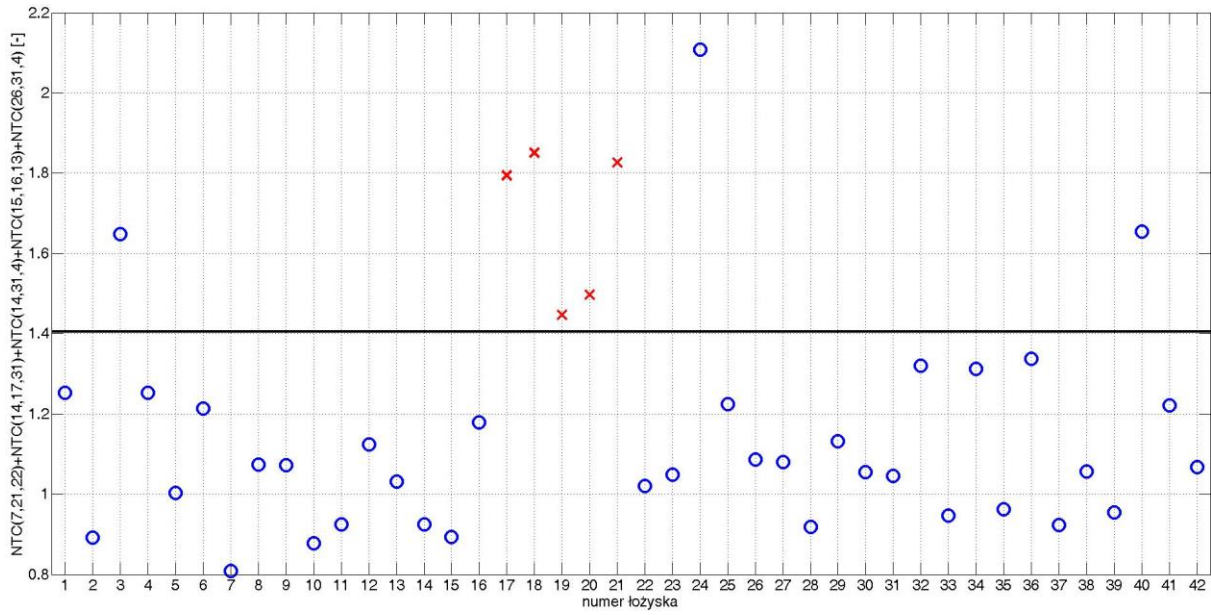
Rys. C. 8. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 1,0 kW



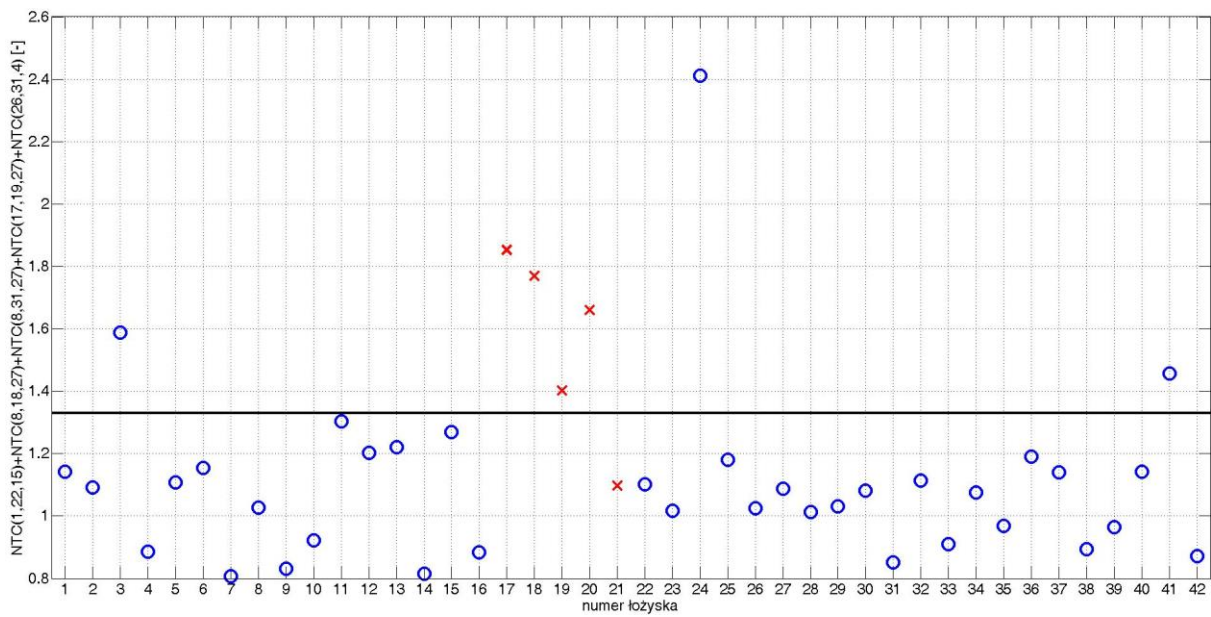
Rys. C. 9. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 1,0 kW



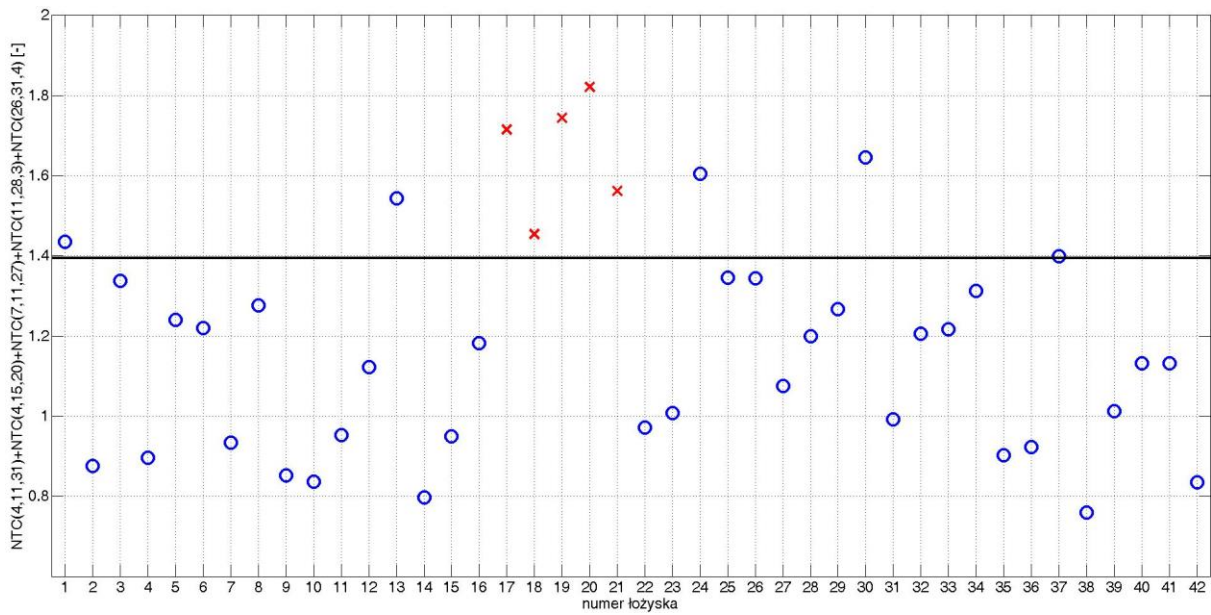
Rys. C. 10. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 0,9 kW



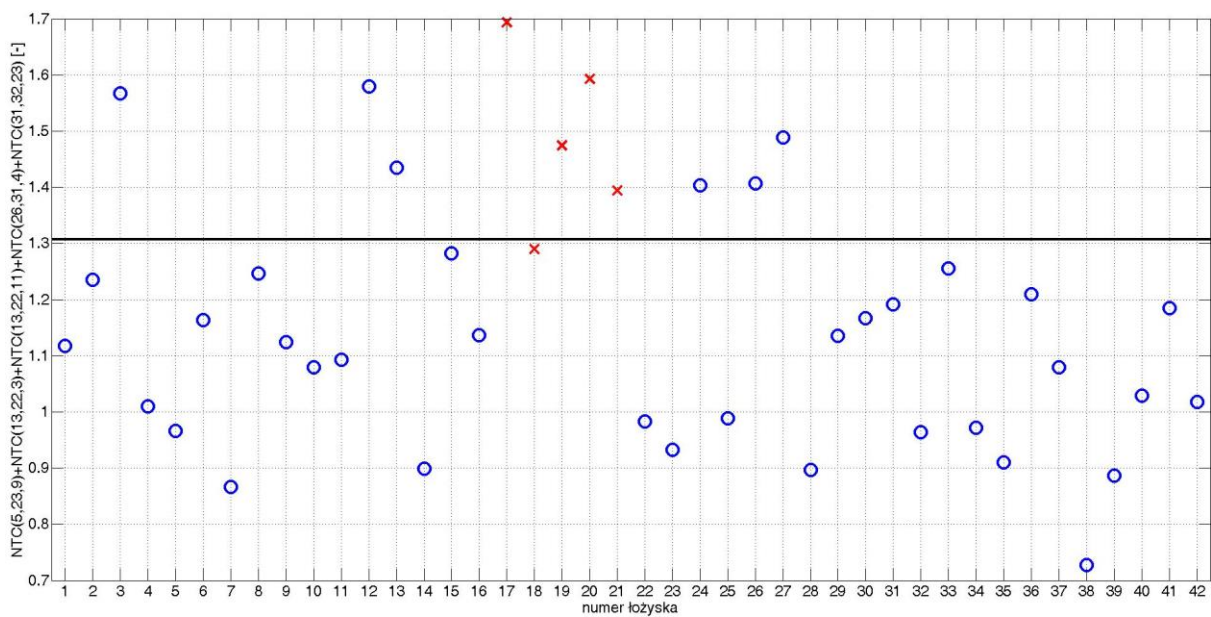
Rys. C. 11. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 0,9 kW



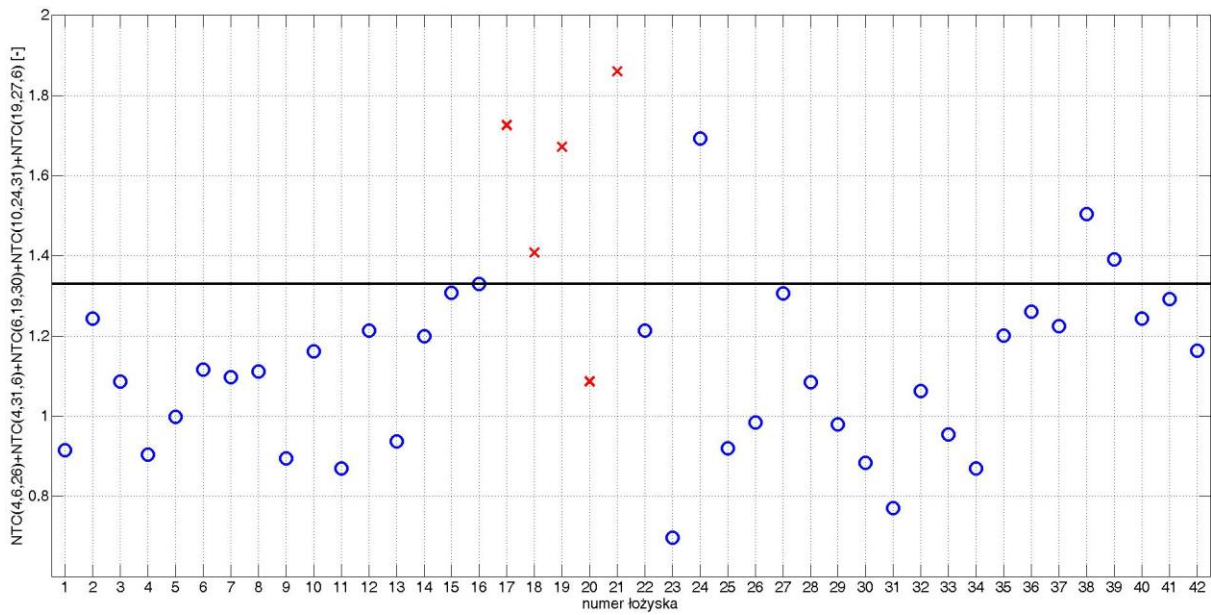
Rys. C. 12. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 0,9 kW



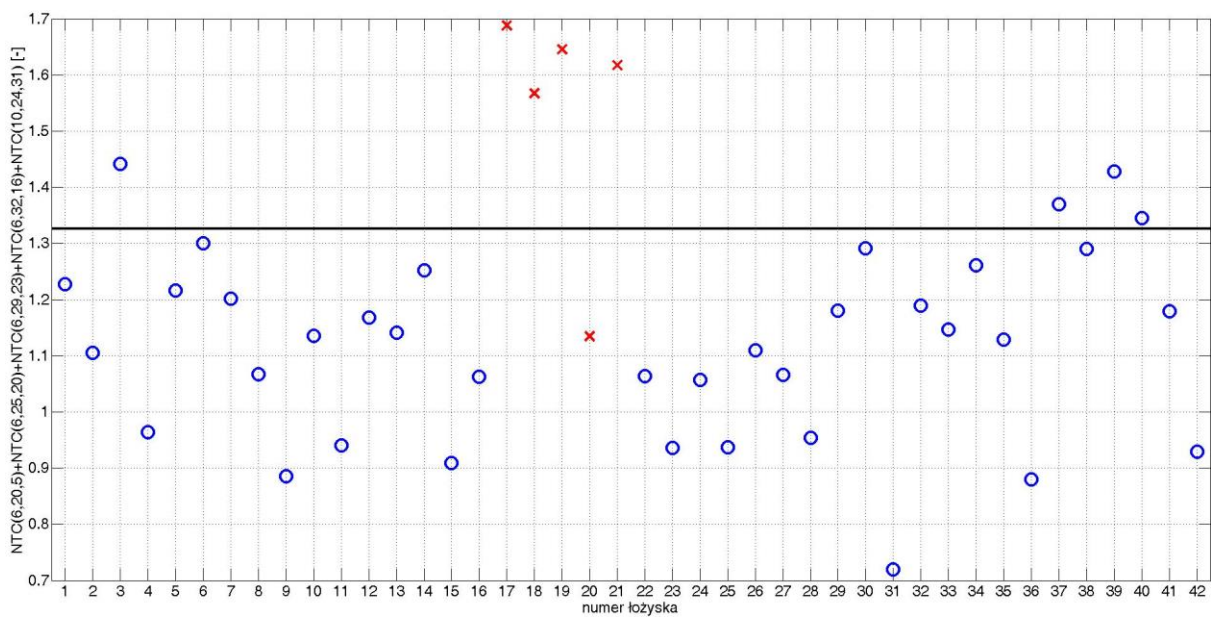
Rys. C. 13. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 0,9 kW



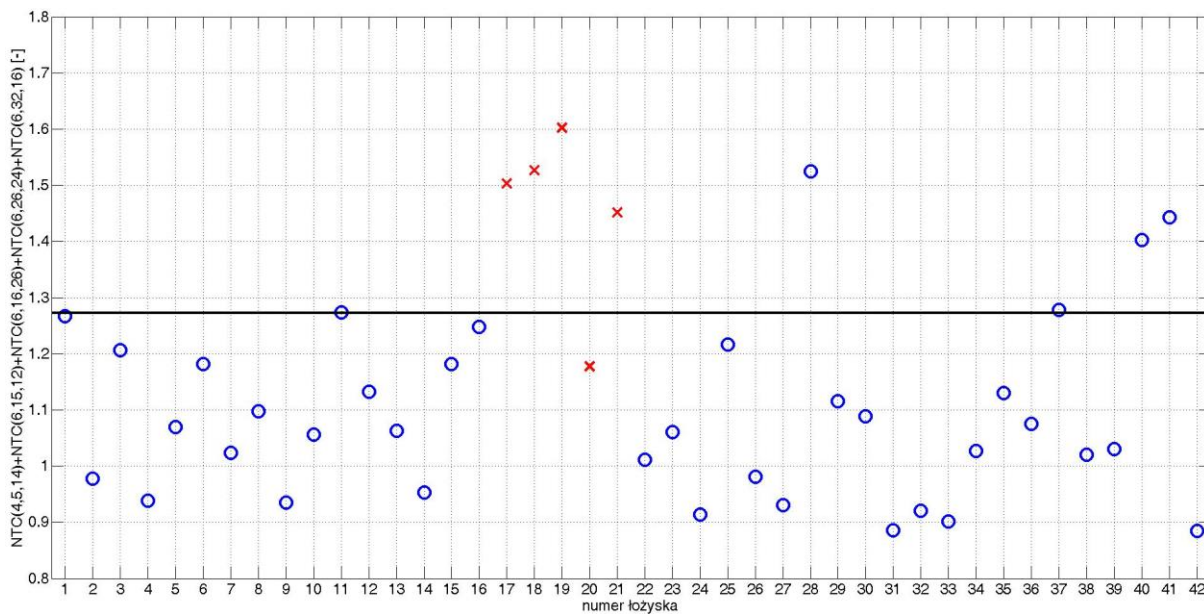
Rys. C. 14. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 0,9 kW



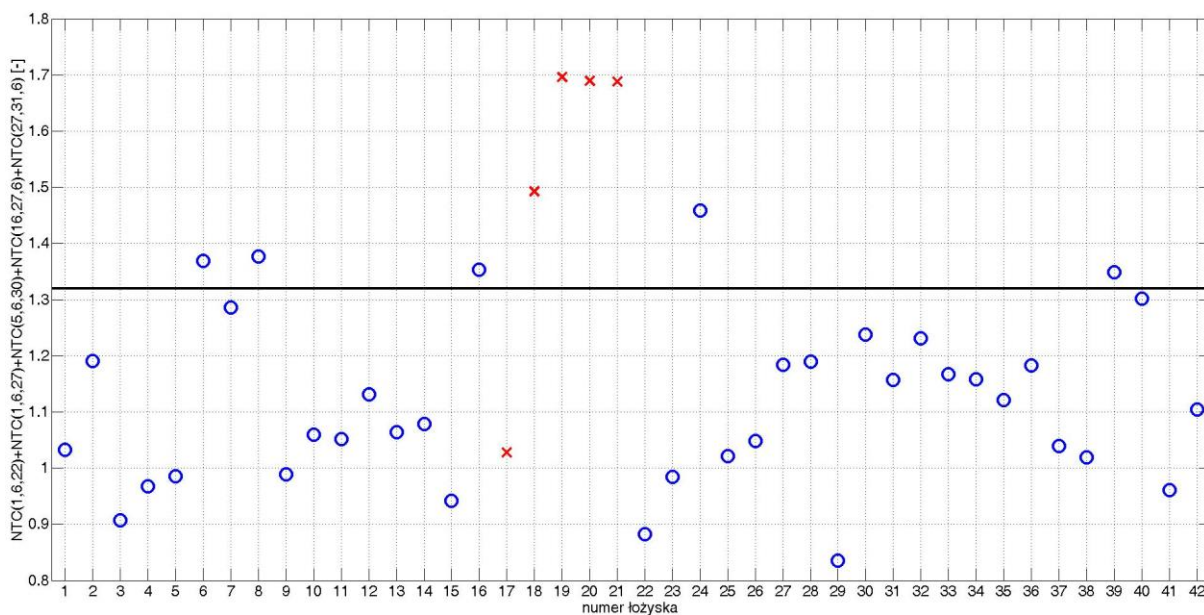
Rys. C. 15. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 0,8 kW



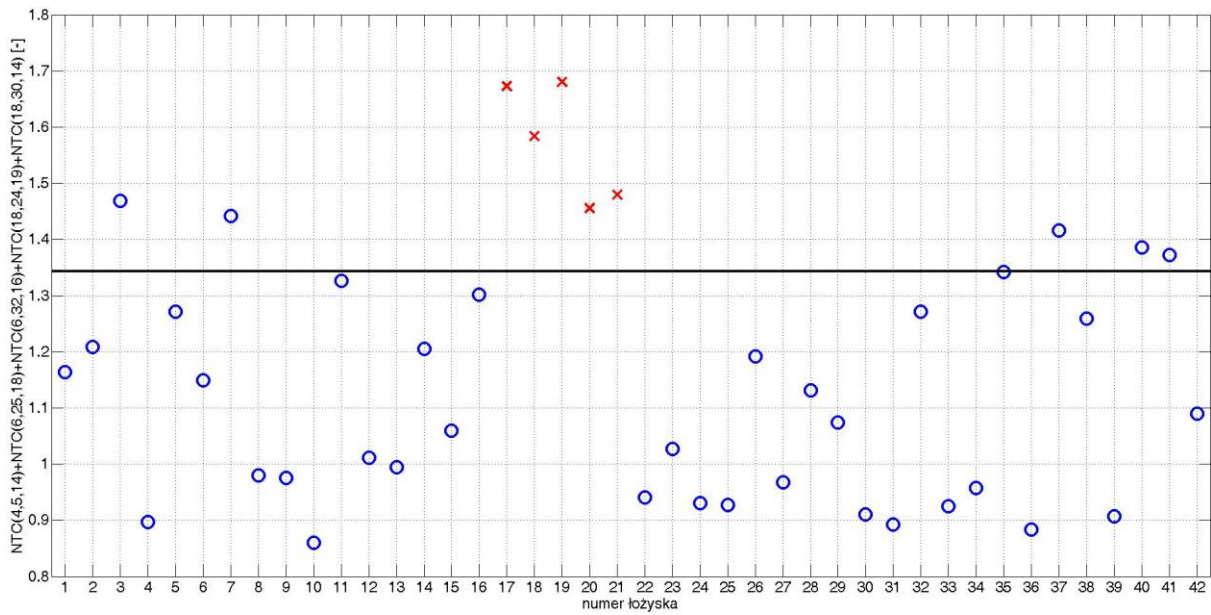
Rys. C. 16. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 0,8 kW



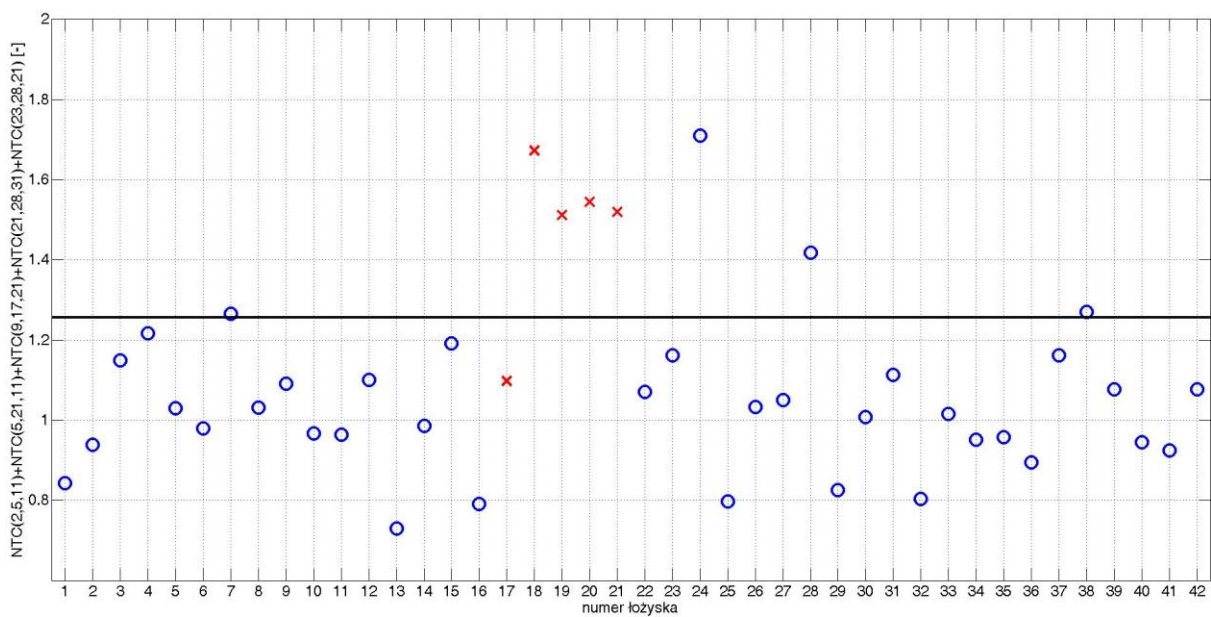
Rys. C. 17. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 0,8 kW



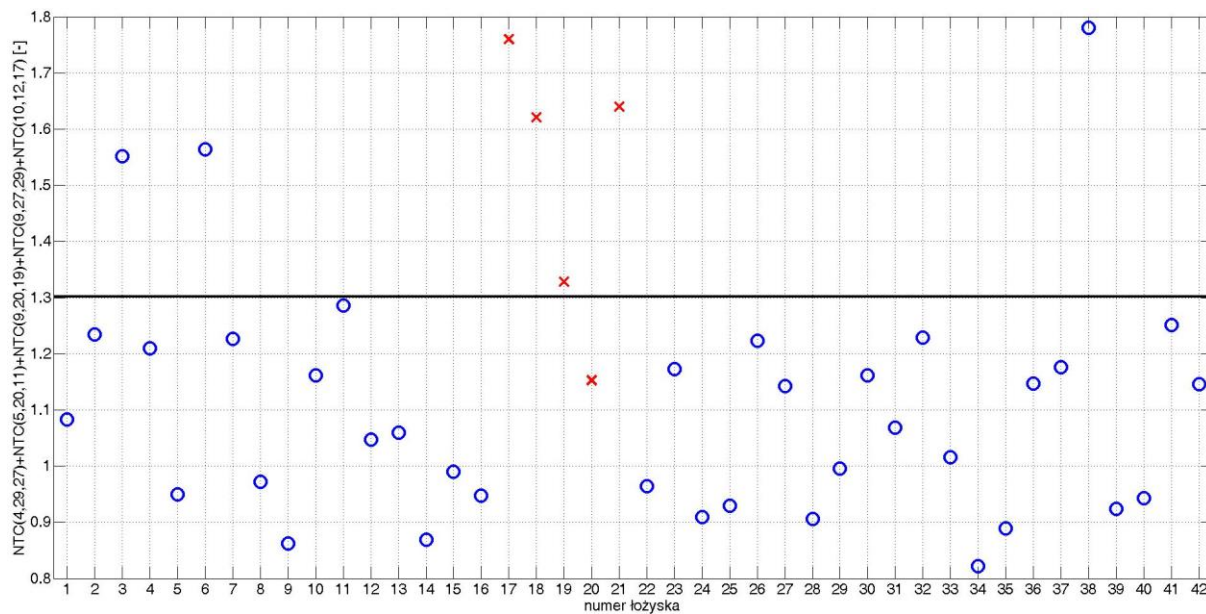
Rys. C. 18. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 0,8 kW



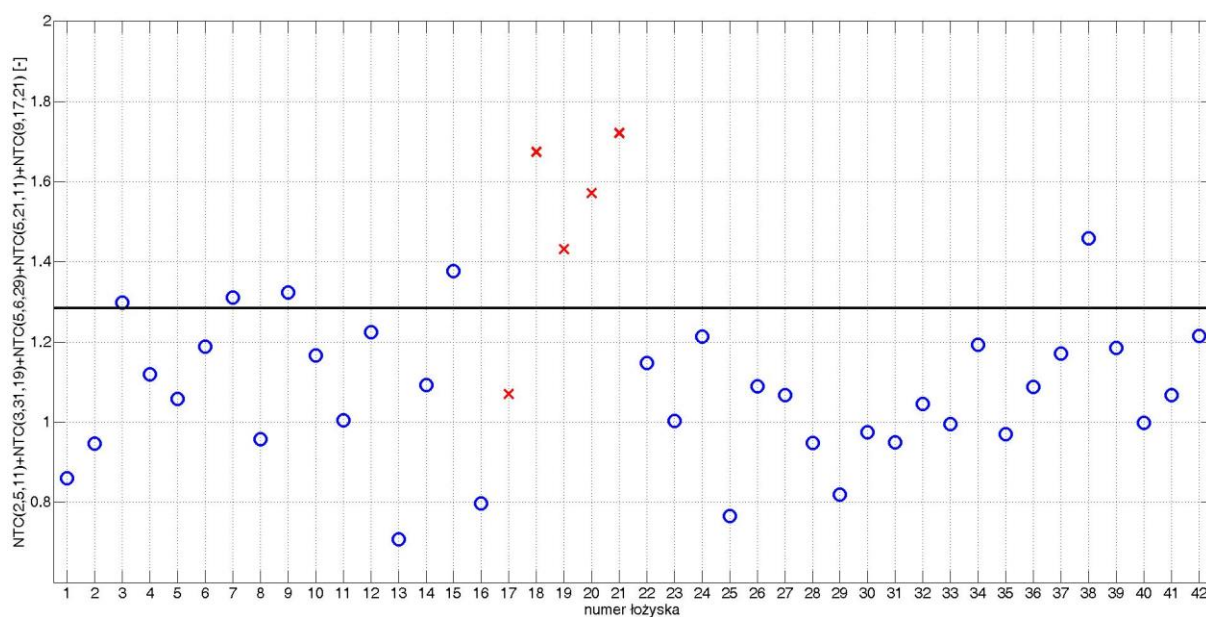
Rys. C. 19. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 0,8 kW



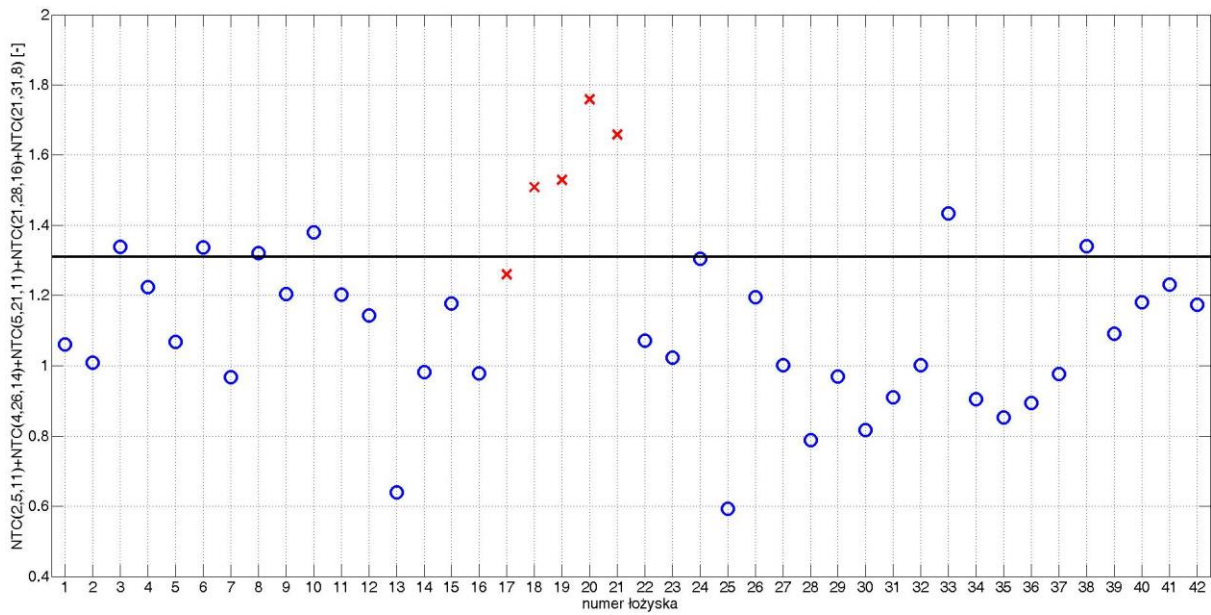
Rys. C. 20. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 0,7 kW



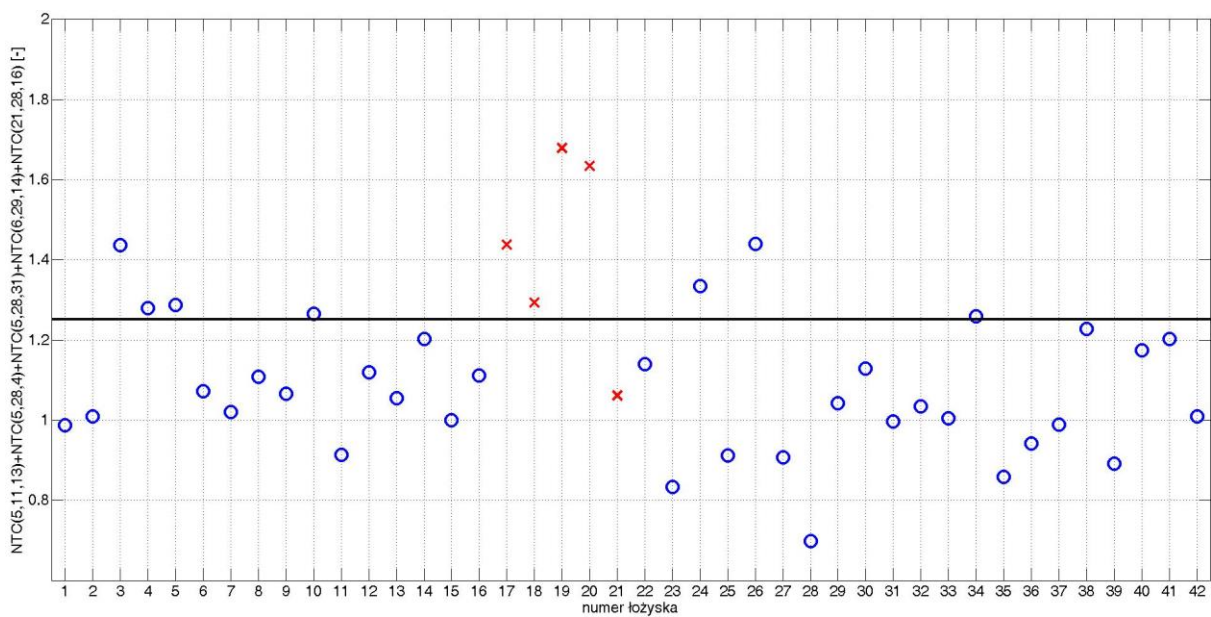
Rys. C. 21. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 0,7 kW



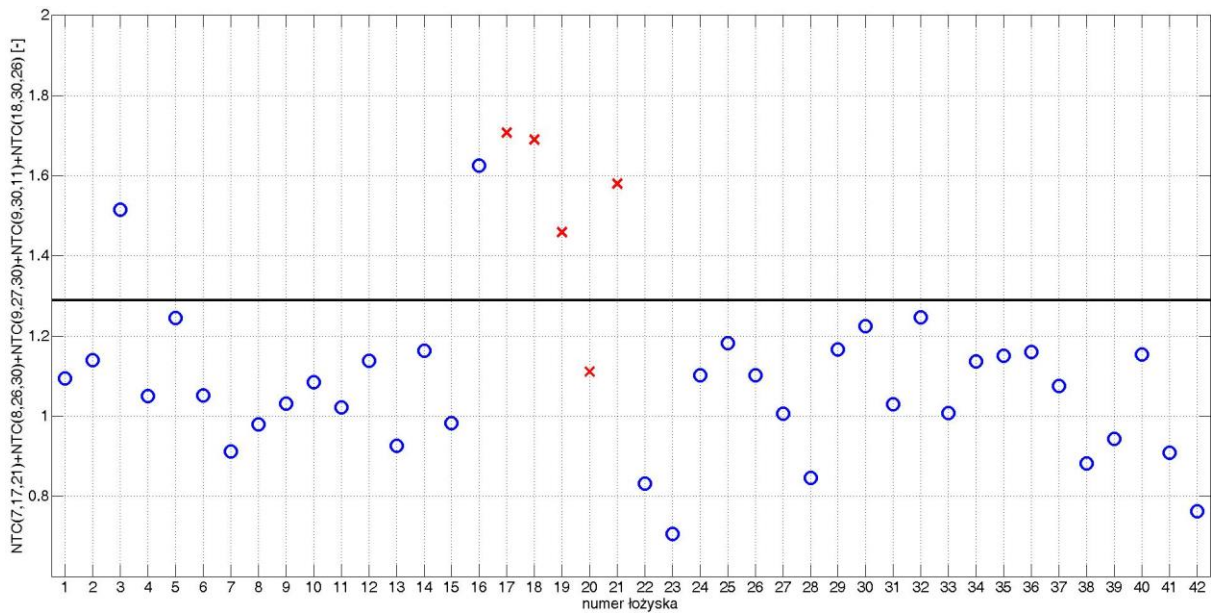
Rys. C. 22. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 0,7 kW



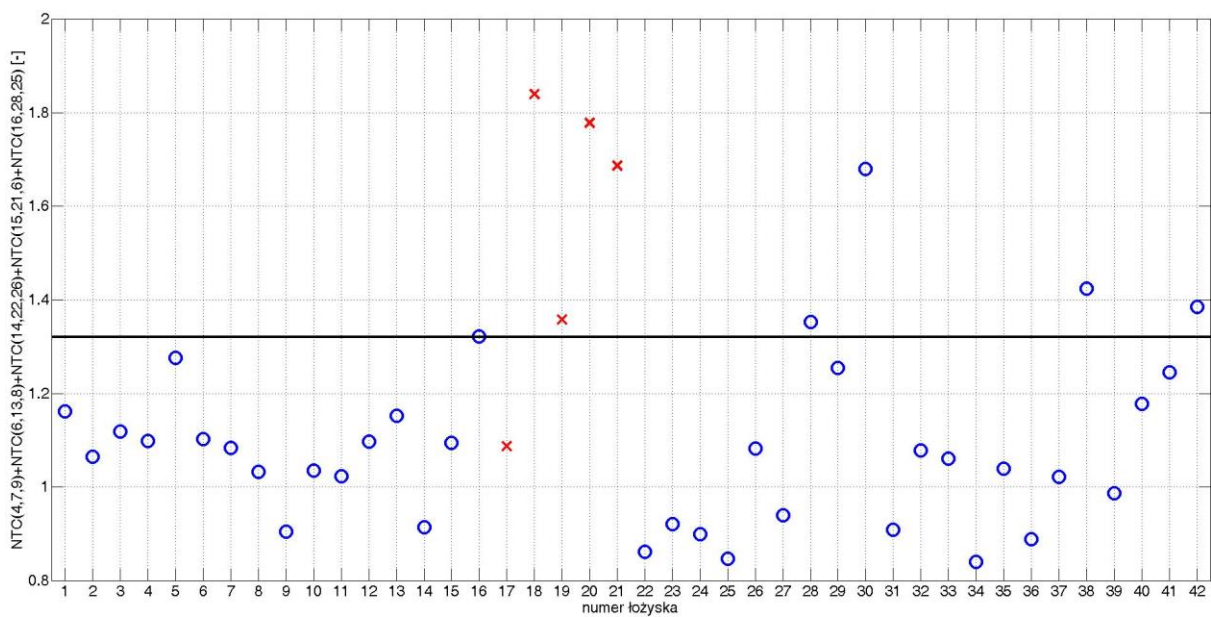
Rys. C. 23. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 0,7 kW



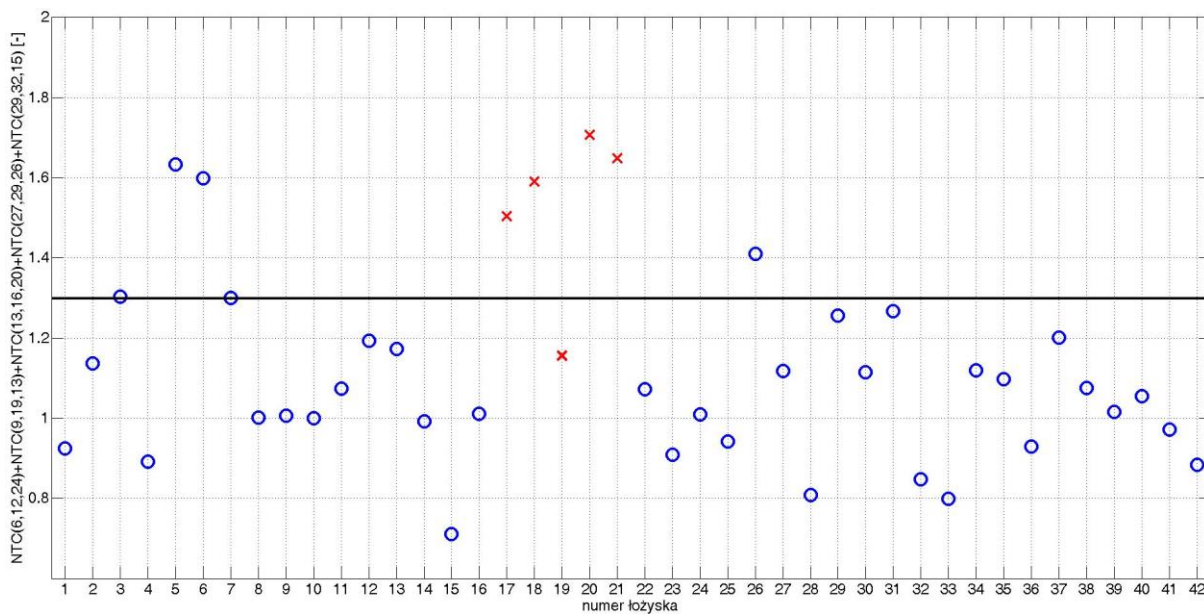
Rys. C. 24. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 0,7 kW



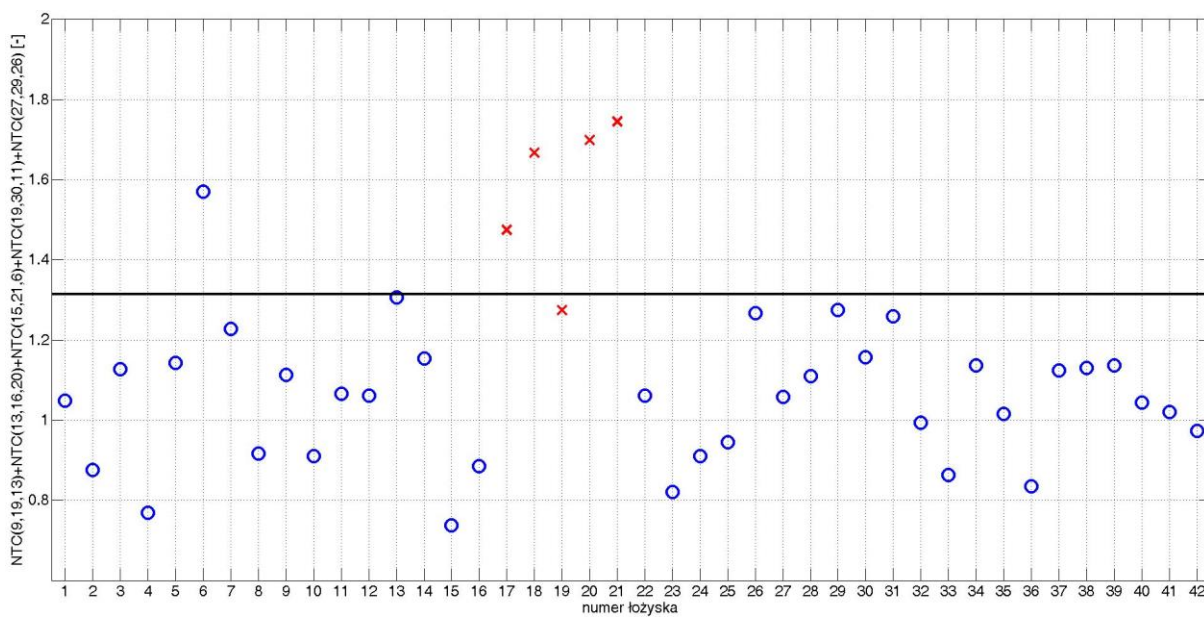
Rys. C. 25. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 0,6 kW



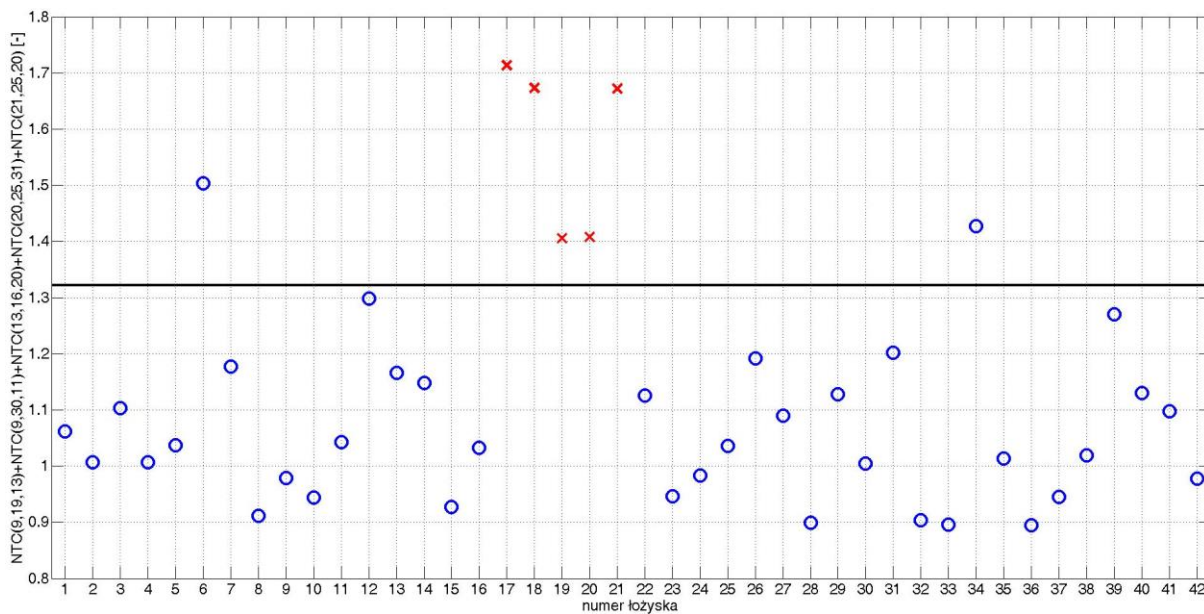
Rys. C. 26. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 0,6 kW



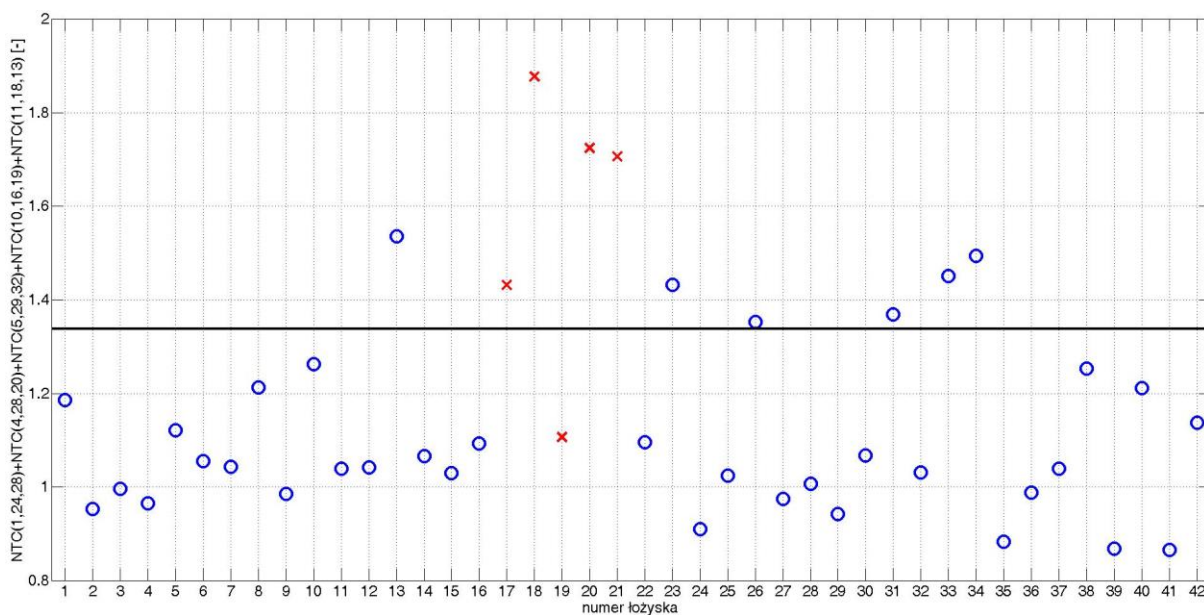
Rys. C. 27. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 0,6 kW



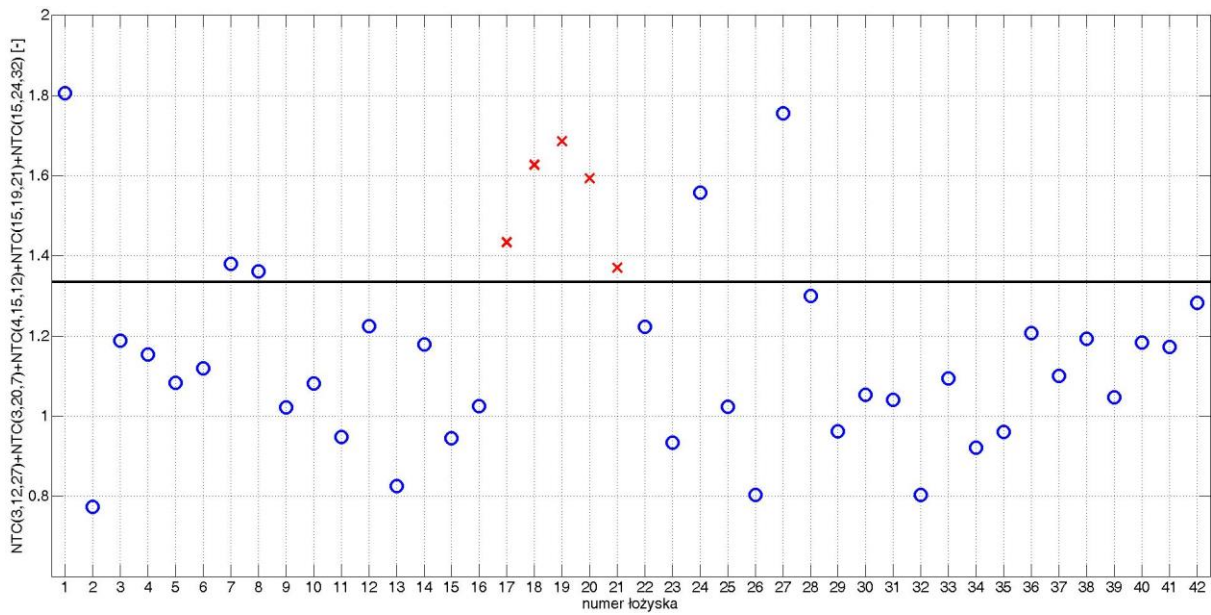
Rys. C. 28. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 0,6 kW



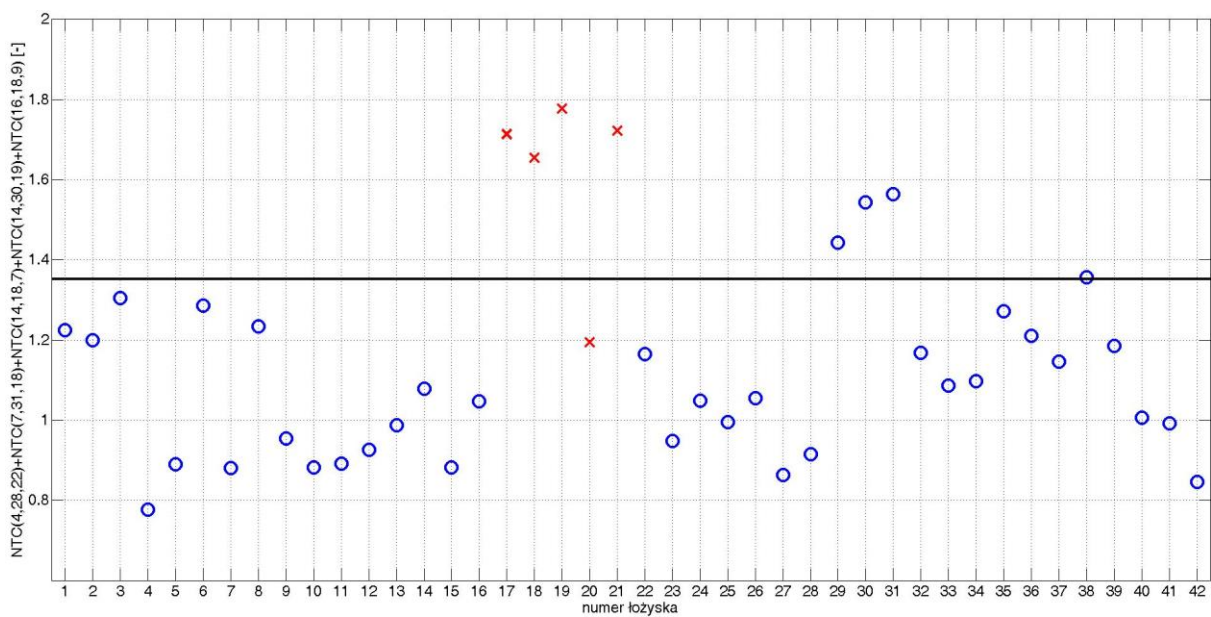
Rys. C. 29. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 0,6 kW



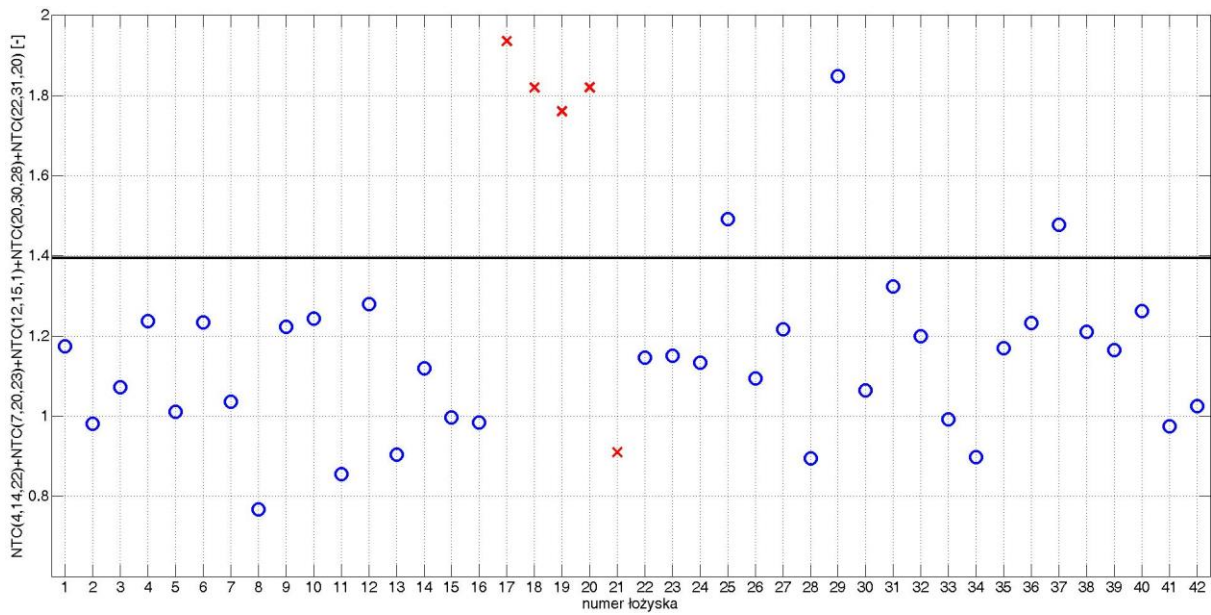
Rys. C. 30. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 przy obciążeniu 0,5 kW



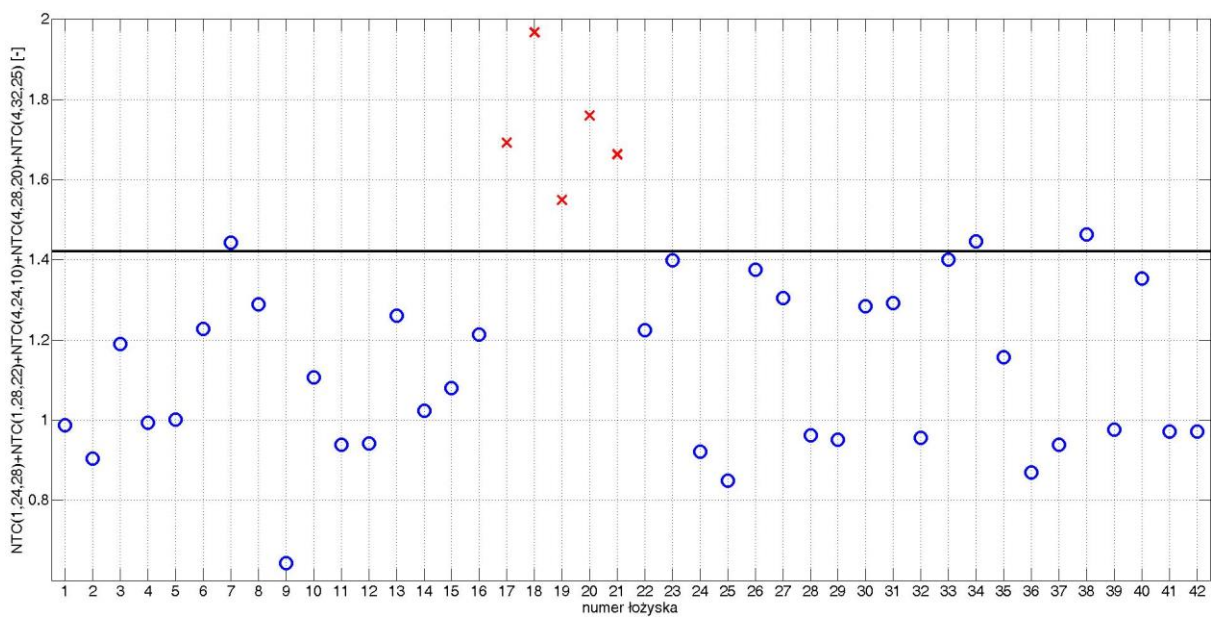
Rys. C. 31. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 przy obciążeniu 0,5 kW



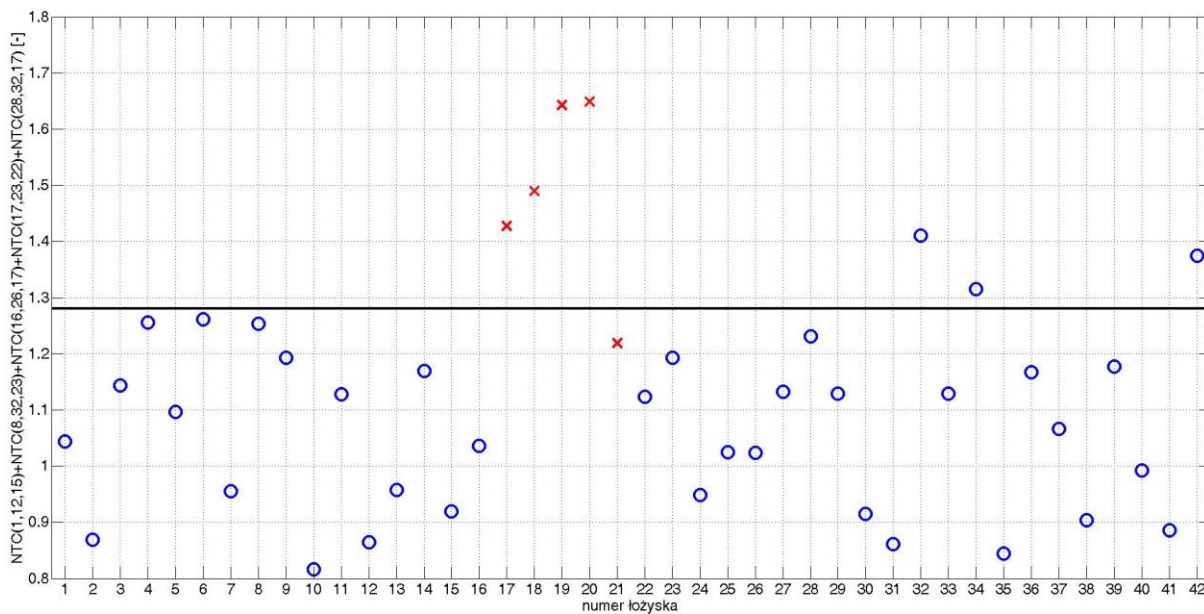
Rys. C. 32. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 przy obciążeniu 0,5 kW



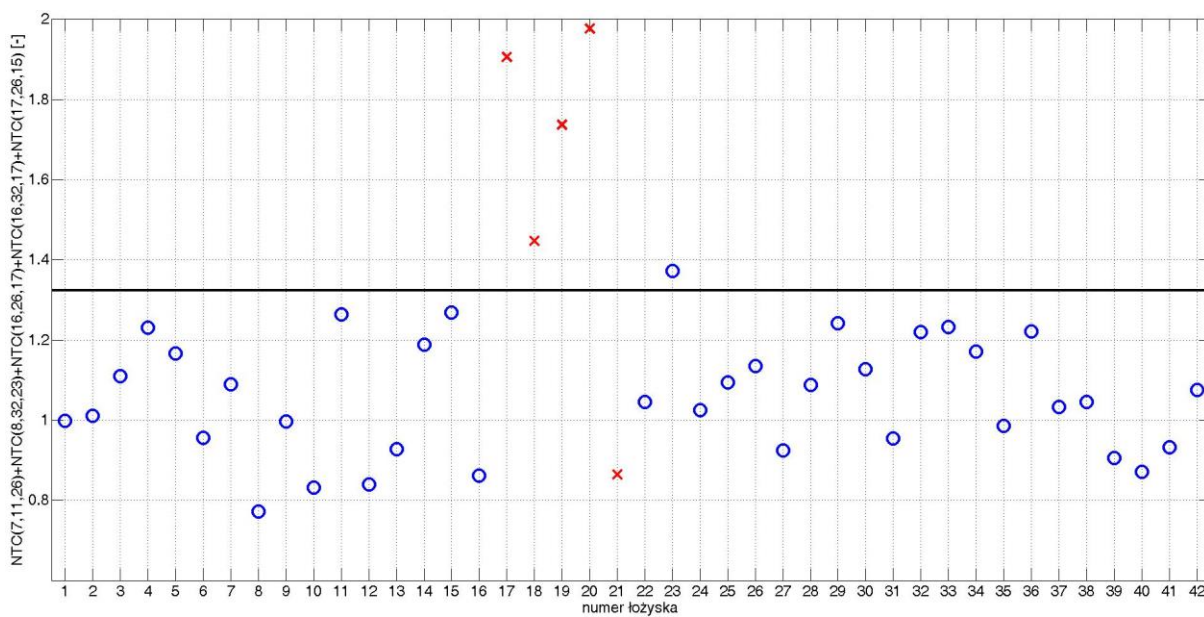
Rys. C. 33. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 przy obciążeniu 0,5 kW



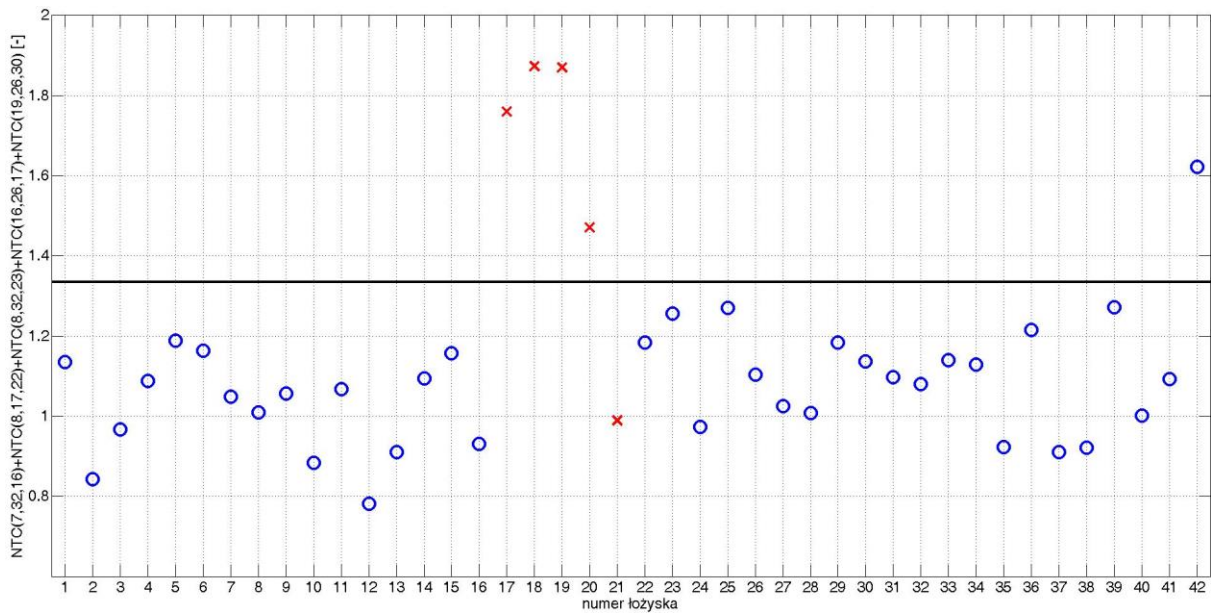
Rys. C. 34. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 przy obciążeniu 0,5 kW



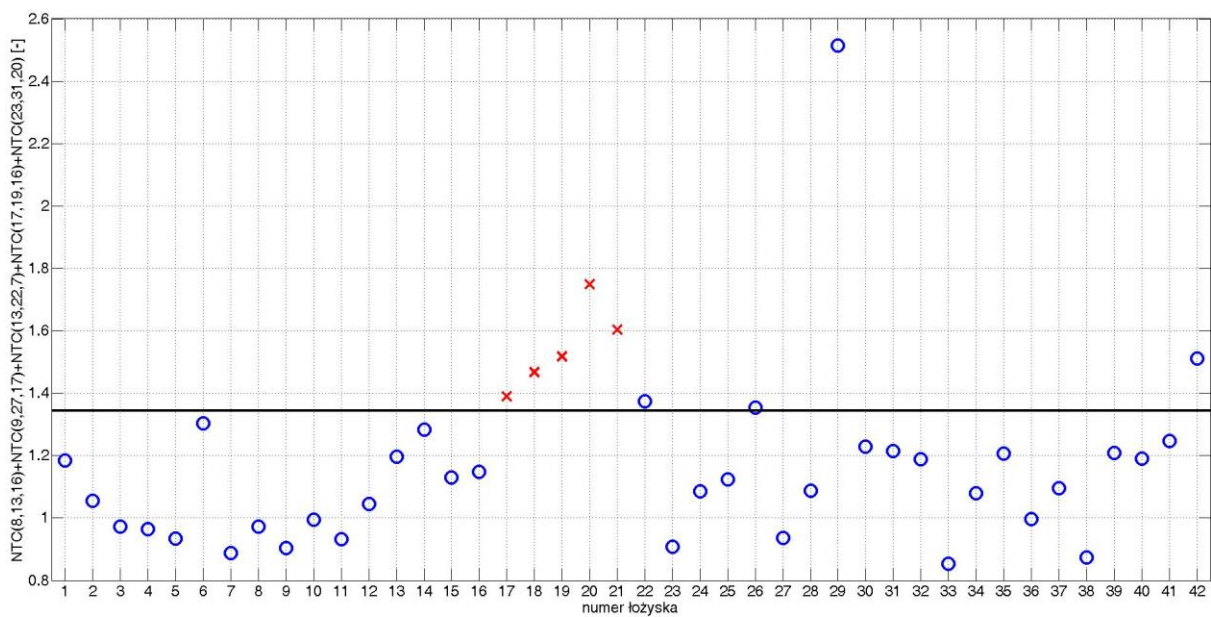
Rys. C. 35. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 1 bez obciążenia



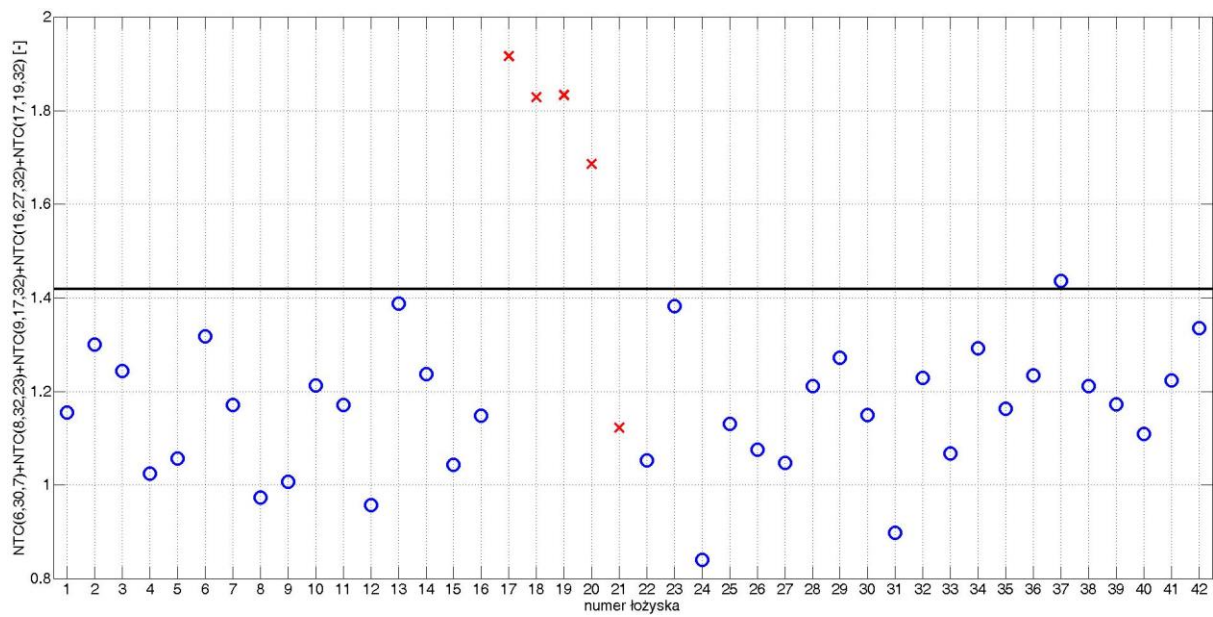
Rys. C. 36. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 2 bez obciążenia



Rys. C. 37. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 3 bez obciążenia



Rys. C. 38. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 4 bez obciążenia



Rys. C. 39. Wartość wskaźnika diagnostycznego dla poszczególnych łożysk dla zestawu 5 bez obciążenia