

KATEDRA PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN - POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Redakcja pracy zbiorowej

J. KICIŃSKI

**SYMULACJA DEFECTÓW
I BUDOWA RELACJI
DIAGNOSTYCZNYCH
MODELU NUMERYCZNEGO**

ZESZYT 125

GLIWICE 2005

Redakcja pracy zbiorowej
JAN KICIŃSKI
IMP PAN - Gdańsk

Symulacja defektów i budowa relacji diagnostycznych modelu numerycznego

Opracowali:
Sławomir Banaszek
Jan Kiciński
Marcin Łuczak
Anna Prońska
Józef Rybczyński

Gliwice 2005

8,15

Redaktor Zeszytów
Wojciech Cholewa

Redaktor techniczny
Paweł Chrzanowski

Projekt okładki
Wojciech Cholewa, Marek Wyleżoń



112885

ISBN 83-916957-7-8

Praca została wykonana w ramach projektu
Komitetu Badan Naukowych PBZ K015/T10/2001

Wydawca
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice
tel. (32) 237-14-67, fax (32) 237-13-60
<http://www.kpkm.polsl.pl>

Druk i oprawa (z dostarczonych materiałów)
Drukarnia cyfrowa D&D sp. z o.o. ul. Moniuszki 6, 44-100 Gliwice

2447/05

Wstęp

Niniejszy Zeszyt zawiera opis fragmentu wyników badań symulacyjnych, przeprowadzonych przez zespół pracowników Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, pod kierunkiem profesora Jana Kicińskiego, w czasie wykonywania zadań projektu badawczego PBZ K015/T10/2001 pt.: *Kompleksowy model sprzężonych oddziaływań aerodynamicznych, mechanicznych i elektrycznych zachodzących w obiektach energetycznych dużej mocy*. Projekt ten, ustanowiony przez Komitet Badań Naukowych, realizowany był w latach 2001-2005. Obiektem badań był turbozespół 13K215 o mocy 200 MW, eksploatowany w wielu elektrowniach na terenie Polski. Realizując projekt podjęto próbę kompleksowego spojrzenia na procesy zachodzące w turbinie, generatorze i ich posadowieniu. Poszukiwano zintegrowanego opisu wymuszeń uwarunkowanych cechami konstrukcyjnymi rozpatrywanego obiektu i różnymi zdarzeniami eksploatacyjnymi. Wyznaczony opis stanowił podstawę modelu numerycznego pozwalającego na określanie skutków takich wymuszeń, na podstawie badań symulacyjnych. Różne aspekty badań prowadzonych przez wiele zespołów pokazano w obszernej, liczącej ponad 1300 stron, monografii pt. *Modelowanie i diagnostyka oddziaływań mechanicznych, aerodynamicznych i magnetycznych w turbozespołach energetycznych*, opracowanej pod redakcją prof. J. Kicińskiego i wydanej przez Wydawnictwo IMP PAN.

Celem prowadzonych badań symulacyjnych było zgromadzenie danych pozwalających na definiowanie relacji stanów i sygnałów diagnostycznych. Zadaniem zespołu, uczestniczących w projekcie, pracowników Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej, było między innymi odwrócenie zintegrowanego modelu obiektu, reprezentowanego zbiorem przykładów relacji generowanych podczas badań symulacyjnych. Wyznaczony model odwrotny zastosowany został w opracowanym diagnostycznym systemie doradczym K015. W celu odwrócenia modelu zastosowano wybrane metody inżynierii wiedzy. Przeprowadzono analizę skupień dla stanów technicznych, poszukiwano zbiorów relewantnych cech sygnałów, prowadzono analizę wrażliwości ich cech, budowano klasyfikatory diagnostyczne i weryfikowano ich jakość.

Przeprowadzone badania pokazały, że pole możliwych rozwiązań, dotyczących metod odwracania modeli, jest bardzo obszerne. Uznano, że kontynuowanie jego analizy po zakończeniu projektu może mieć duże znaczenie poznawcze. Stwierdzono, że rozpatrywany obiekt i jego zintegrowany model numeryczny są wyjątkowym źródłem danych uczących. Jego szczególną cechą jest to, że analiza danych, ze względu na stopień złożoności modelu, nie może bazować wyłącznie na intuicji badacza. Równocześnie jego zaletą jest to, że ogólna wiedza o istocie działania obiektu pozwala na interpretowanie wyników uzyskiwanych z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji. Wymienione aspekty stanowiły podstawę decyzji o ułatwieniu szerszego dostępu do tych danych poprzez wydanie niniejszego Zeszytu. Zamieszczono w nim wyłącznie informacje pozwalające na właściwe wykorzystanie zgromadzonych danych, w badaniach dotyczących metod inżynierii wiedzy oraz w procesie kształcenia z zakresu metod sztucznej inteligencji. Rozdziały Zeszytu zestawiono na podstawie raportów z prowadzonych badań. Część zamieszczonych w nich informacji występuje również, w skróconej postaci, we wspomnianej wcześniej monografii.

Pliki zawierające dane (wyniki badań symulacyjnych) opisywane w tym Zeszytzie są dostępne za pośrednictwem witryny <http://www.pbz-k015.imp.gda.pl>. Wybrane fragmenty tych danych, zapisane w postaci struktur środowiska MATLAB dostępne są również za pośrednictwem witryny <http://kpk.m.polsl.pl/k015/>, zawierającej materiały dotyczące systemu doradczego K015.

Wojciech Cholewa

Spis treści

1	Przypadek bazowy	9
1.1	Wstęp	9
1.2	Dokumentacja <i>przypadku bazowego</i>	9
1.3	Narzędzia badawcze	11
1.3.1	Programy komputerowe	11
1.3.2	Pre- i postprocesory graficzne	15
1.4	Dyskretyzacja modelu	16
1.5	Identyfikacja obciążeń działających w układzie	23
1.5.1	Siły kinetostaticzne	24
1.5.2	Siły dynamiczne działające na układ	26
1.6	Procedura dostrajania	28
1.7	Przypadek bazowy	33
1.8	Klasy defektów	44
1.8.1	Klasa I – przemieszczenia termiczne i montażowe podpór łożyskowych	44
1.8.2	Klasa II – przekoszenia panwi	50
1.8.3	Klasa III – pęknięcia wału	52
1.8.4	Klasa IV – klasy sprzężone	54
1.9	Uwagi końcowe	54
	Bibliografia	54
2	Przemieszczenia termiczne i montażowe podpór łożyskowych	55
2.1	Wstęp	55
2.2	Przypadek bazowy	55
2.3	Narzędzia badawcze	56
2.4	Metodyka badań	57
2.5	Zakres badań	58
2.6	Kryteria kwalifikacji stanu turbosespołu jako dopuszczalnego	59
2.7	Sposób prezentacji wyników	60
2.7.1	Pliki wynikowe	60
2.7.2	Tabele zbiorcze	61
2.7.3	Mapy przemieszczeń	62
2.7.4	Karty diagnostyczne	63
2.8	Analiza wyników badań	63
2.8.1	Poziome indywidualne przemieszczenia łożysk	64
2.8.2	Pionowe indywidualne przemieszczenia łożysk	65

2.8.3	Jednoczesne przemieszczenia łożysk nr 5 i 6	66
2.8.4	Analiza kart diagnostycznych	67
2.9	Wnioski	68
2.10	Załączniki	70
	Bibliografia	93
3	Przemieszczenia termiczne i montażowe podpór łożyskowych. Obliczenia uzupełniające	95
	Bibliografia	100
4	Badania symulacyjne wpływu defektu w postaci przekoszenia panwi na własności dynamiczne turbozespołu 200MW	101
4.1	Wstęp	101
4.2	Cel badań	102
4.3	Model geometryczny	102
4.4	Narzędzia numeryczne	103
4.5	Zakres badań	105
4.6	Wyniki badań	108
4.7	Wnioski z badań	114
4.8	Załączniki	115
4.8.1	Wykresy trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, przypadek bazowy	115
4.8.2	Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pozioma płaszczyzna zukosowania	119
4.8.3	Wykresy trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pionowa płaszczyzna zukosowania	123
4.8.4	Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pozioma płaszczyzna zukosowania	127
4.8.5	Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pionowa płaszczyzna zukosowania	132
4.8.6	Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pozioma płaszczyzna zukosowania	136
4.8.7	Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pionowa płaszczyzna zukosowania	141
4.8.8	Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku N, przypadek bazowy, wyniki z programu KINWIN	145
4.8.9	Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku N, pozioma płaszczyzna zukosowania, wyniki z programu KINWIN	149
4.8.10	Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku N, pionowa płaszczyzna zukosowania, wyniki z programu KINWIN	153
4.8.11	Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku N, przypadek bazowy, wyniki z programu NLDW	157
4.8.12	Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku N, pozioma płaszczyzna zukosowania, wyniki z programu NLDW	161

4.8.13	Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku N, pionowa płaszczyzna zukosowania, wyniki z programu NLDW	165
	Bibliografia	169
5	Obliczenia pęknięć wirnika turbozespołu 13K215	171
5.1	Uwagi wstępne	171
5.1.1	Obliczenia	173
5.1.2	Wyniki obliczeń	174
5.2	Pęknięcie 1	176
5.3	Pęknięcie 2	207
5.4	Podsumowanie	229
	Bibliografia	230

120 Kiciński, Anna Prońko

1.1 Wstęp

W wyniku dotychczasowych prac realizowanych w ramach Projektu Badawczego Zaimplementacja K13/130/1301 w celu zwiększenia wydajności turbozespołu 13K215 uwzględniając wszystkie istotne wymagania użytkownika, wypracowana została nowa Platforma Modeli Numerycznych (PMN) dla turbiny, która w szczególności umożliwia generowanie i dynamiki turbiny oraz w zakresie analizy

– w procesie obliczeniowy model turbiny zaimplementacji K13/130/1301, który jest wykorzystywany do wypracowania platformy numerycznej odpowiadającej wymogom użytkownika. Dzięki temu możliwe jest obliczenie wyników analizy numerycznej turbiny, co umożliwia generowanie modelu obliczeniowego turbiny i turbiny oraz analizy

– Modelowanie turbiny polega na zaimplementowaniu turbiny w środowisku numerycznym, co umożliwia wypracowanie platformy numerycznej odpowiadającej wymogom użytkownika.

– Celem niniejszego opracowania jest wypracowanie platformy numerycznej odpowiadającej wymogom użytkownika, co umożliwia wypracowanie platformy numerycznej odpowiadającej wymogom użytkownika. Dzięki temu możliwe jest obliczenie wyników analizy numerycznej turbiny, co umożliwia generowanie modelu obliczeniowego turbiny i turbiny oraz analizy

1.2. Dokumentacja parametrów barowego

Dokumentacja parametrów barowego w turbinie w celu zaimplementacji turbiny w środowisku numerycznym, co umożliwia wypracowanie platformy numerycznej odpowiadającej wymogom użytkownika.

– DOKUMENTACJA PARAMETRÓW BAROWEGO W TURBINIE W CELU ZAIMPLEMENTACJI TURBINY W ŚRODOWISKU NUMERYCZNYM, CO UMOGŁIWI WYPRACOWANIE PLATFORMY NUMERYCZNEJ ODPWIEDZAJĄCEJ WYMOGOM UŻYTKOWNIKA.

– DOKUMENTACJA PARAMETRÓW BAROWEGO W TURBINIE W CELU ZAIMPLEMENTACJI TURBINY W ŚRODOWISKU NUMERYCZNYM, CO UMOGŁIWI WYPRACOWANIE PLATFORMY NUMERYCZNEJ ODPWIEDZAJĄCEJ WYMOGOM UŻYTKOWNIKA.

Rozdział 1

Przypadek bazowy

Jan Kiciński, Anna Prońska

1.1. Wstęp

W wyniku dotychczasowych prac realizowanych w ramach Projektu Badawczego Zamówianego K015/T10/2001 powstał model numeryczny turbozespołu 13K215 uwzględniający wzajemnie sprzężone wymuszenia aerodynamiczne, mechaniczne i elektryczne. Pod pojęciem model numeryczny rozumiemy dyskretny model obiektu i oprogramowanie do badania kinetostatyki i dynamiki takiego obiektu w zakresie nieliniowym.

W procesie identyfikacji modelu określony został tzw. *przypadek bazowy* tzn. przypadek, w którym dane eksploatacyjne rzeczywistego obiektu najlepiej odpowiadają wynikom symulacji komputerowej. Uzyskanie zadawalającej zbieżności wyników teoretycznych i eksploatacyjnych pozwoliło uznać opracowany model za podstawę do symulacji defektów i budowy relacji diagnostycznych.

Modelowanie defektów polega na zmianie wartości liczbowej parametru opisującego określony defekt w zestawie danych do programu.

Celem niniejszego opracowania jest dokumentacja przypadku bazowego, krótka charakterystyka narzędzi badawczych, a także przedstawienie propozycji zarówno doboru klas defektów (pod kątem generowania symptomów określonego typu), jak i - w ramach poszczególnych klas - określenia parametrów, które będą zmieniane w stosunku do przypadku bazowego wraz z podaniem zakresu zmienności tych parametrów.

1.2. Dokumentacja przypadku bazowego

Dokumentację przypadku bazowego w pełnej wersji elektronicznej stanowi katalog PRZYPADEK-BAZOWY, którego strukturę przedstawiono na Rys.1.1. Znajdują się w nim trzy podkatalogi:

- OPRACOWANIE, w którym znajduje się dokumentacja przypadku bazowego [1.4];
- OBLICZENIA – zawierający dane i wyniki obliczeń przeprowadzonych dla przypadku bazowego. Podkatalogi KINWIN-60 i KINWIN-I-LEW dotyczą obliczeń kineto-

statycznych stanowiących kolejne etapy w pełnym cyklu obliczeń; katalog NLDW-LEW75 dotyczy obliczeń dynamicznych, czyli wyników końcowych (patrz Rys.1.2):

- EKSPERYMENT-DT200 – zawierający podkatalogi WYBRANY i INNE-PRZYPADKI:
 - w podkatalogu WYBRANY pliki dotyczące przypadku eksperymentalnego K7G012F wybranego jako przypadek porównawczy do obliczeń (patrz rozdział 6). Pliki wyniki.1÷wyniki.7 zawierają prędkości drgań bezwzględnych pokryw, natomiast pliki wyniki.11÷wyniki.17 zawierają przemieszczenia wału w panwi łożyska tzn. drgania względne.
 - w podkatalogu INNE-PRZYPADKI wyniki wszystkich pomiarów z systemu DT200, które zostały przekazane przez Politechnikę Śląską [1.1]. Każdy pomiar, którego opis znajduje się w pliku info.txt jest zapisany w postaci plików zawierających prędkości drgań bezwzględnych pokryw oraz przemieszczenia względne czop-panew dla siedmiu łożysk turbozespołu, a także pliki graficzne w formatach *fig*, *jpg* i *ps* zawierające karty diagnostyczne przygotowane programem karta1.m (również znajdującym się w omawianym katalogu).

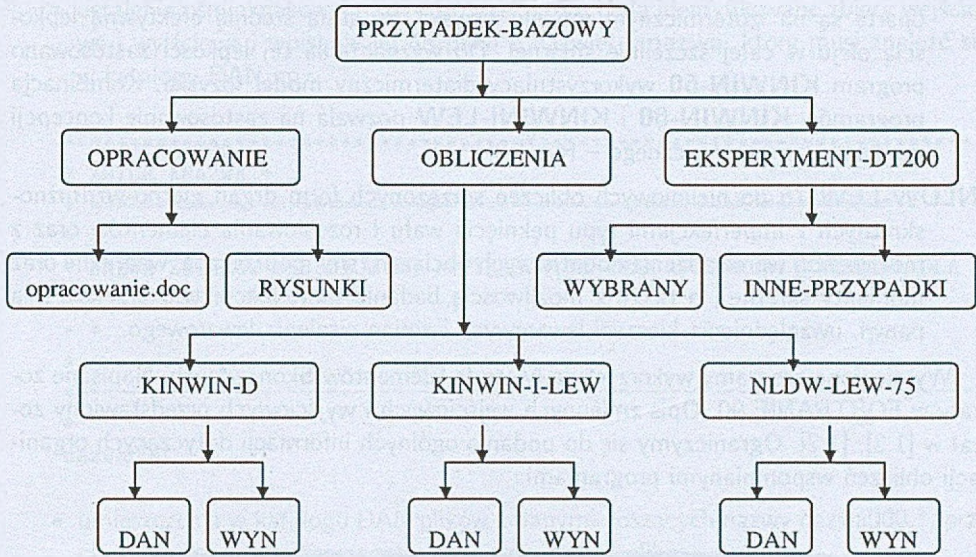
Przykład pliku *info.txt* z katalogu *k7g012f*:

```
wyniki
3000
BAZA-eksperyment
13K215
2000-04-12 09:51
E1. KOZIENICE, blok nr 7
NomObcPelne, ngenb=211.25 MW, ngenb=73.75 MVA, rpm=3000 obr/min.
System DT200-1
```

Opis końcowych zbiorów wynikowych tzn. zbiorów wynikowych z programu NLDW-LEW-75 (PRZYPADEK-BAZOWY\OBLICZENIA\nldw-75-lew\WYN) znajduje się w [1.4].

Ponadto, w opracowaniu [1.4] zamieszczono wydruki niektórych plików znajdujących się w katalogach DAN i WYN (które są podkatalogami katalogów PRZYPADEK-BAZOWY\OBLICZENIA\.....\; gdzie oznaczają kolejno katalogi KINWIN-60, KINWIN-I-LEW, NLDW-75-LEW). Pliki te wybrano ze względu na ich przydatność w badaniach symulacyjnych i tak są to:

- wszystkie pliki z danymi zarówno do obliczeń kinetostatycznych jak i dynamicznych;
- wybrane pliki wynikowe:
 - z obliczeń kinetostatycznych tylko pliki zawierające dane do dalszych obliczeń,
 - z obliczeń dynamicznych tylko plik z rozszerzeniem *amp*, który jest wykorzystywany przy wstępnej ocenie wyników badań symulacyjnych.



Rys. 1.1: Schemat katalogu PRZYPADEK-BAZOWY. Dużymi literami oznaczono nazwy podkatalogów.

1.3. Narzędzia badawcze

Celem badań, które będą prowadzone metodami właściwymi diagnostyce według modelu, jest przygotowanie relacji defekt → symptom stanowiących bazę danych dla systemu diagnostycznego. Narzędzia badawcze w tym przypadku to programy komputerowe do obliczeń kinetostatycznych i dynamicznych uzupełnione oprogramowaniem graficznym. W dalszej części przedstawiono krótkie charakterystyki wymienionych elementów.

1.3.1. Programy komputerowe

Najnowszą generację oprogramowania stosowanego i doskonalonego od lat w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, służącego do analizy zagadnień kinetostatyki i dynamiki wielopodporowych i wielomasowych wirników stanowią systemy programów komputerowych KINWIN-I-LEW i NLDW-LEW-75. Człon **LEW** oznacza możliwość uwzględnienia dowolnego kształtu całej szczeliny smarnej w łożysku łącznie z jej konfiguracją geometryczną (np. rodzaj luzu, kieszenie lewarowe, rowki obwodowe, kieszenie zasilające) i eksploatacyjną (np. przekoszenia panwi). Oznaczenie wersji numerem **75** stwarza możliwość uwzględnienia zewnętrznych obciążeń w formie dodatkowych (poza niewyważeniami) sił poprzecznych, wzdłużnych i momentów skrętnych zmiennych w czasie w sposób nieliniowy.

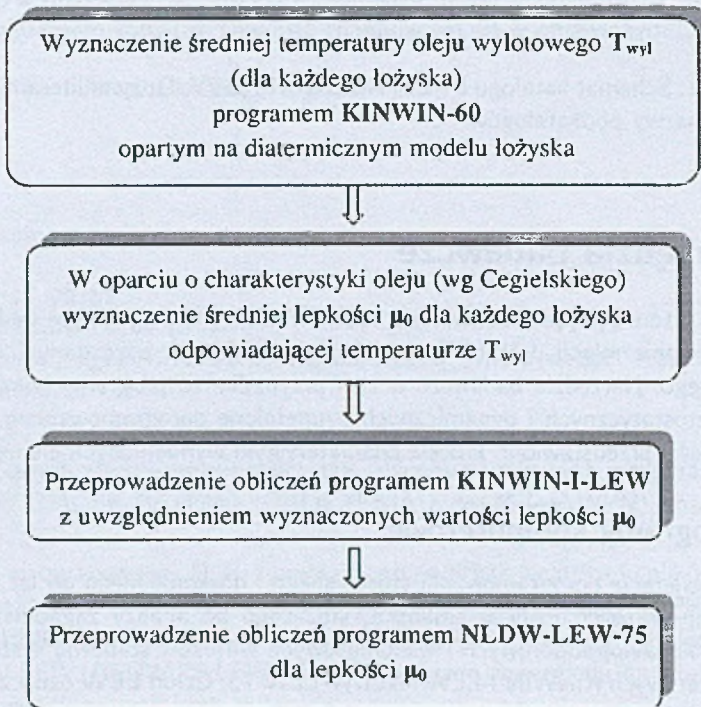
Do badań prowadzonych w ramach PBZ z powyższych systemów wybrane zostały następujące programy:

KINWIN-I-LEW do zagadnień kinetostatycznych. Programy z serii KINWIN-LEW

oparte są na izotermicznym modelu łożyska, ze stałą średnią efektywną lepkością oleju w całej szczelinie smarnej. Do wyznaczenia tej lepkości zastosowano program **KINWIN-60** wykorzystujący diatermiczny model łożyska. Kombinacja programów **KINWIN-60** i **KINWIN-I-LEW** pozwala na zastosowanie koncepcji modelu quasiadiatermicznego – Rys.1.2.

NLDW-LEW-75 do nieliniowych obliczeń sprzężonych form drgań giętno-wzdłużno-skrętnych z imperfekcjami typu pęknięcia wału i rozosiowania elementów oraz z możliwością wprowadzania dodatkowych obciążeń (siły: poprzeczne, wzdłużne oraz momenty skrętne), a także z możliwością badania imperfekcji typu przekoszenia panwi, uwzględnienia kieszeni lewarowych i zmian ciśnienia lewarowego.

Wymienione programy wykorzystują Metodę Elementów Skończonych. Napisane zostały w FORTRANIE 90. Opis zmiennych wejściowych i wyjściowych przedstawiony został w [1.3], [1.2]. Ograniczymy się do podania ogólnych informacji dotyczących organizacji obliczeń wspomnianymi programami.



Rys. 1.2: Koncepcja obliczeń quasi-diatermicznych stanowiących kombinację modelu izotermicznego i diatermicznego

Praca z programami **KINWIN-60**, **KINWIN-I-LEW** i **NLDW-LEW-75** wymaga:

- utworzenia katalogów **DAN** i **WYN**;

- ustalenia ośmionakowej nazwy, poprzez którą będą identyfikowane zbiory wejściowe i wyjściowe i wpisanie jej do pliku o nazwie **aanazwa**, który musi znaleźć się w katalogu DAN np.:

```
*****
* ZBIOR ANAZWA *
* ===== *
* *
* NAZWA ZBIOROW WEJSCIOWYCH I WYNIKOWYCH (MAX 8 ZNAKOW) WLASCIWA DLA *
* OBLICZANEGO PRZYPADKU *
* *
* *
* -----
*
nazwa000
```

- umieszczenia w katalogu DAN plików z danymi noszących nazwy **nazwa000.***, przy czym * oznacza następujące rozszerzenia nazwy pliku:

– dla programów **KINWIN-60**

- * dok
- * epp
- * gaf
- * ip1,ip2,.....,ipLP gdzie LP liczba podpór czytana z pliku nazwa000.wir
- * wir

– dla programu **KINWIN-I-LEW**

- * dok
- * epp
- * gaf
- * l1,l2,.....,lLP gdzie LP liczba podpór czytana z pliku nazwa000.wir
- * wir

– dla programu **NLDW-LEW-75**

- * dpl
- * epk
- * gaf
- * gau
- * wdo
- * l1,l2,.....,lLP gdzie LP liczba podpór czytana z pliku nazwa000.wdo
- * obc
- * m1,m2,.....,mILMS gdzie ILMS liczba momentów skrętnych czytana z pliku nazwa000.obc
- * p1,p2,.....,pILOP gdzie ILOP liczba sił poprzecznych czytana z pliku nazwa000.obc

- * w1,w2,.....,wi**LOW** gdzie **ILMS** liczba sił wzdłużnych czytana z pliku nazwa000.obc
- * prz
- W katalogu **WYN** zapiszą się zbiory wynikowe nazwa000.*, przy czym * oznacza następujące rozszerzenia nazwy pliku:
 - dla programów **KINWIN-60**
 - * cha
 - * epk
 - * gab
 - * prz
 - * rea
 - * sld
 - * ci1,ci2,.....,ci**LP** gdzie **LP** liczba podpór czytana z pliku nazwa000.wir
 - dla programu **KINWIN-I-LEW**
 - * chi
 - * epk
 - * gab
 - * prz
 - * rea
 - * sld
 - pliki zawierające ciśnienia będą miały wspólne rozszerzenie .cis i nazwę zawierającą informację, którego łożyska dotyczą tzn.:
 - * nazwa000-p1.cis,nazwa000-p2.cis,.....,nazwa000-p**LP**.cis, gdzie **LP** liczba podpór czytana z pliku nazwa000.wir
 - dla programu **NLDW-LEW-75**
 - * obc
 - * amp
 - * sld
 - * c1,.....,c**LP**, gdzie **LP** liczba podpór czytana z pliku pbartmax.wdo
 - * e1,.....,e**LP**, gdzie **LP** liczba podpór czytana z pliku pbartmax.wdo
 - pliki zawierające ciśnienia będą miały wspólne rozszerzenie .cis i nazwę zawierającą informację, którego łożyska dotyczą i dla jakiej wartości **tal** zostały zapisane tzn.:
 - nazwa000-p01t**TALPC(1,1)**.cis,
 - nazwa000-p01t**TALPC(1,2)**.cis
 -,
 - nazwa000-p01t**TALPC(1,ltalpc(1))**.cis,
 - nazwa000-p02t**TALPC(1,1)**.cis,
 - nazwa000-p02t**TALPC(1,2)**.cis
 -,
 - nazwa000-p02t**TALPC(1,ltalpc(1))**.cis,

```

.....,
nazwa000-p0LPCIStTALPC(LPCIS,1).cis,
nazwa000-p0LPCIStTALPC(LPCIS,2).cis,
.....,
nazwa000-p0LPCIStTALPC(LPCIS,ltalpc(LPCIS)).cis

```

gdzie wartości wielkości *wytłuszczonych* czytane są z pliku *nazwa000.dpl*

1.3.2. Pre- i postprocesory graficzne

Programy graficzne stowarzyszone z programami KINWIN-I-LEW i NLDW-LEW-75 służą do przygotowania danych, do sprawdzenia zawartości plików z danymi i wizualizacji wyników.

Możliwości wspomnianych programów zademonstrujemy na przykładzie przypadku bazowego. W tym miejscu ograniczymy się do podania nazw stosowanych programów i opisu ich działania.

PREPROCESORY

Przy pomocy interaktywnego programu **preproc-75-lew.exe** możemy zweryfikować dyskretyzację badanego obiektu. Daje on także możliwość sprawdzenia i ewentualnej zmiany wprowadzonych wartości sił. Program ten można stosować zarówno do zagadnień kinetostatycznych jak i dynamicznych.

Interaktywny program **preproc-sily.exe** rysuje siły dynamiczne: aerodynamiczne i naciągu generatora zapisane w plikach nazwa.p'i', nazwa.w'i' oraz nazwa.m'i', gdzie 'i' oznacza numer siły (patrz 1.5.2). „Klikając” na odpowiednią strzałkę mamy możliwość wykreślenia przebiegu oscylacji danej siły.

POSTPROCESOR dla KINWIN-I-LEW:

kinwinlewgraf.m – przestrzenny rozkład ciśnienia w łożyskach (w punkcie równowagi statycznej).

POSTPROCESORY dla NLDW-LEW-75:

kd3x7umwp.m – karta diagnostyczna zawierająca *przemieszczenia* bezwzględne panwi i przemieszczenia względne czop-panew w płaszczyźnie centralnej panwi;

kv3x7umwp.m – karta diagnostyczna zawierająca *prędkości* bezwzględne panwi i przemieszczenia względne czop-panew w płaszczyźnie czujnika;

FFTamp.m – widmo drgań w wybranym węźle, wykres słupkowy;

FFTfaza.m – widmo fazowe w wybranym węźle, wykres słupkowy;

wykr6_nldw75.m – rysunek przestrzennych trajektorii wzdłuż linii wirnika (tzw bączki);

wyktra6.m – rysunek trajektorii drgań bezwzględnych jednego lub dwóch węzłów;

wyktra4.m – rysunek trajektorii drgań względnych jednego lub dwóch węzłów (konieczność stosowania programu wyktra4 wynika z faktu, że pliki *nazwa.c** są czterokolumnowe);

wykr6_film_nldw75.m - animacja linii łączącej punkty na trajektoriach o tym samym tau;

anim_traj75lew.exe – animacja trajektorii poszczególnych węzłów;

nldwlewgraf.m – przestrzenny rozkład ciśnienia w łożyskach (dla dowolnej chwili τ);

wykres.m – wykres dwóch dowolnych kolumn z pliku.

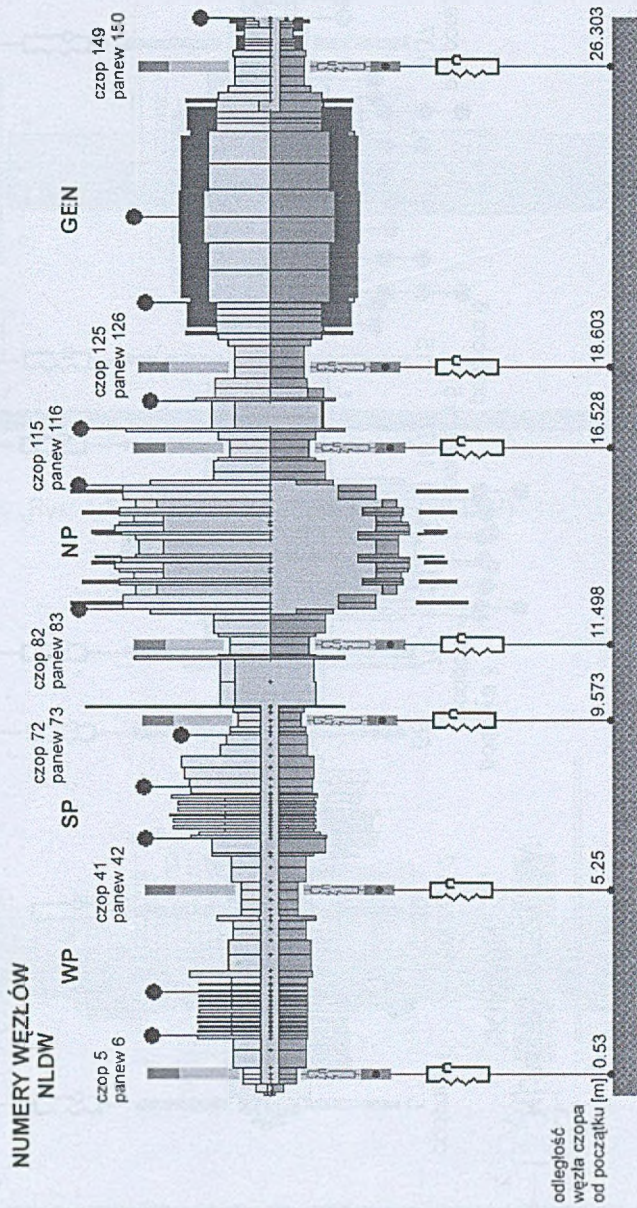
1.4. Dyskretyzacja modelu

Wykorzystanie programów wymienionych w punkcie 1.3.1 do budowy relacji diagnostycznych wymaga zamodelowania układu przy pomocy odpowiednich elementów skończonych a następnie „dostrojenia” modelu do rzeczywistego obiektu.

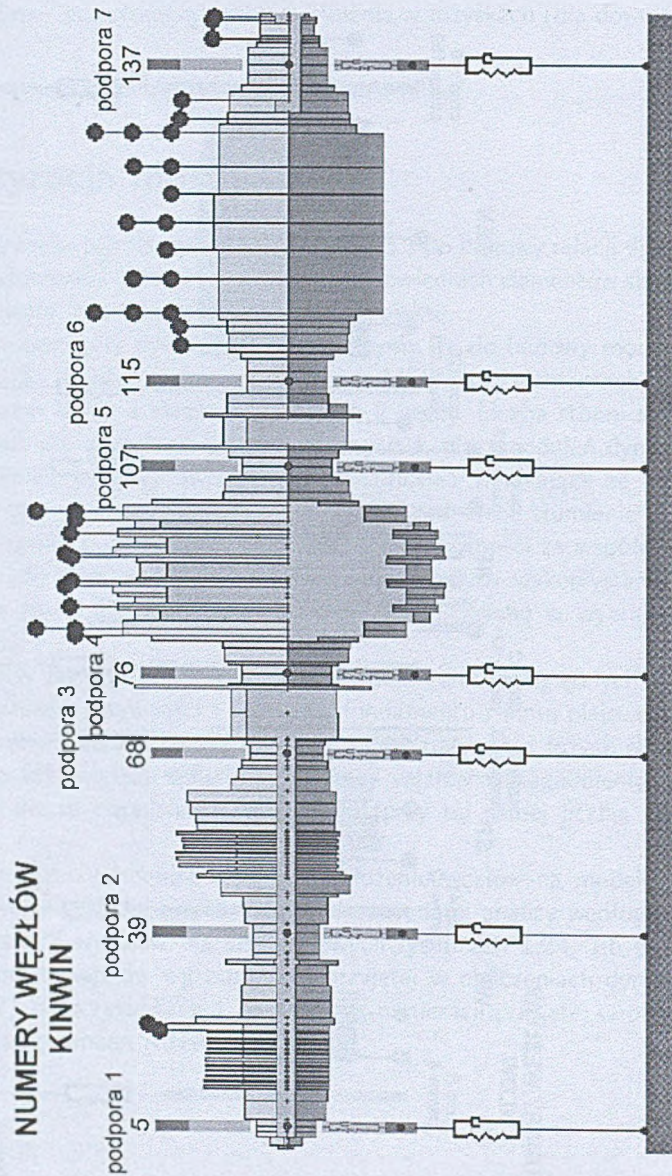
Nie wchodząc w szczegóły dyskretyzacji zaznaczmy, że do budowy modelu przedstawionego na Rys.1.3 i Rys.1.4 zastosowano metodę MES o 145 elementach belkowych Timoszenki, przy czym każdy z elementów posiada 2 węzły. Liczba stopni swobody w każdym węźle wynosi: dla zagadnień kinetostatycznych 4, dla zagadnień dynamicznych 6. Zastosowany element belkowy uwzględnia odkształcenia wynikające ze ścinania w przekrojach belki oraz - w zagadnieniach dynamiki - wewnętrzne tłumienie materiałowe będące liniową kombinacją macierzy bezwładności i sztywności ze współczynnikami α oraz β (patrz p.1.5) jako stałymi. Do modelowania dysków wykorzystano sztywne elementy skończone (dysk jest bryłą nieodkształcalną, mocowaną w wybranym węźle elementu belkowego).

Celem obliczenia w zagadnieniach dynamiki również drgań bezwzględnych panwi (dla zadanych współczynników sztywności i tłumienia fundamentu i filmu olejowego) wykorzystano punktowe elementy skończone modelujące oddziaływanie łożysk ślizgowych i fundamentu, z tego też względu schemat numeracji węzłów w zagadnieniach kinetostatyki będzie inny niż w zagadnieniach dynamiki (przy tej samej liczbie elementów skończonych).

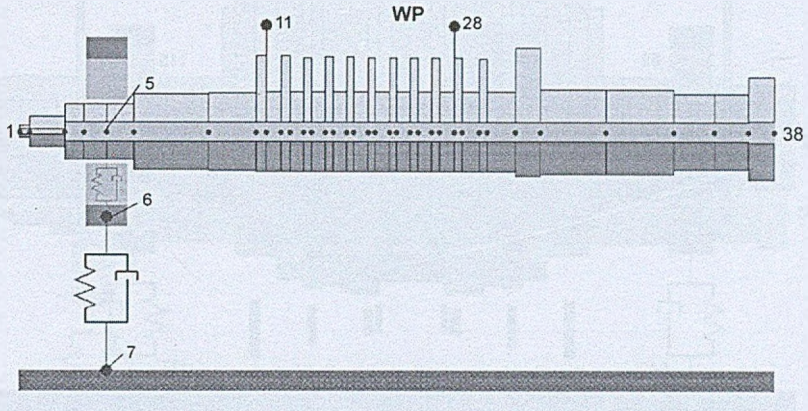
Ponieważ informacje o numerach węzłów i położeniu węzłów na modelu turbozespołu okazały się – w dotychczasowych badaniach metodami analizy według modelu – istotne przy interpretacji wyników, na szczegółowych rysunkach 1.2÷ 1.6 podane zostały numery wybranych węzłów wg numeracji przyjętej w obliczeniach dynamicznych (programem NLDW), a na rysunkach 1.7÷ 1.10 wg numeracji przyjętej w obliczeniach kinetostatycznych (programami KINWIN)



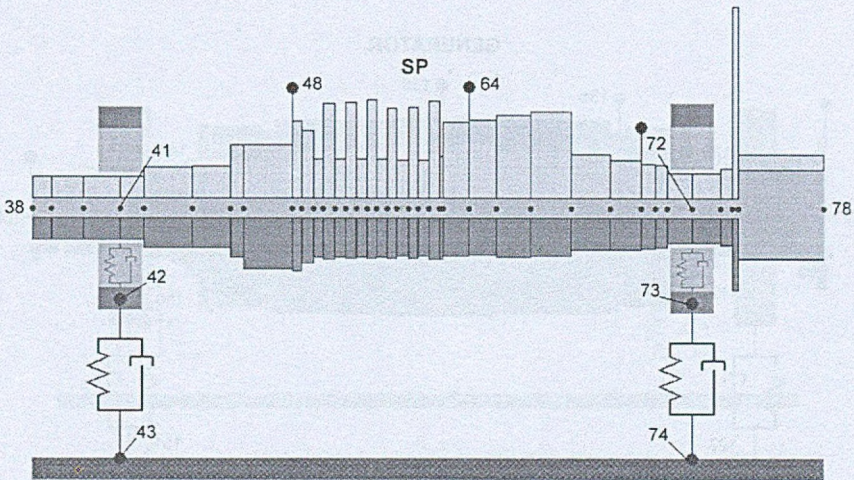
Rys. 1.3: Model MES turbiny 13K215 – numeracja dla zagadnień dynamicznych (dla programów NLDW-LEW-75)



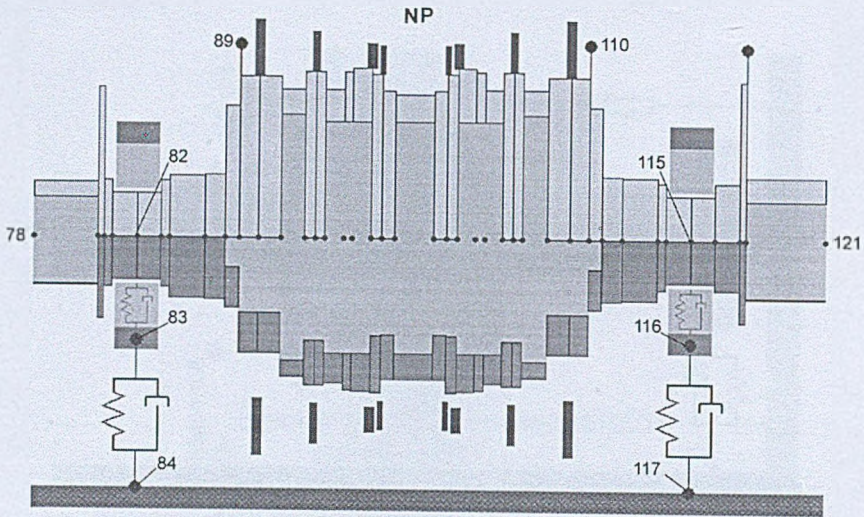
Rys. 1.4: Model MES turbiny 13K215 – numeracja dla zagadnień kinetostacyjnych (dla programów KINWIN-60 i KINWIN-I-LEW)



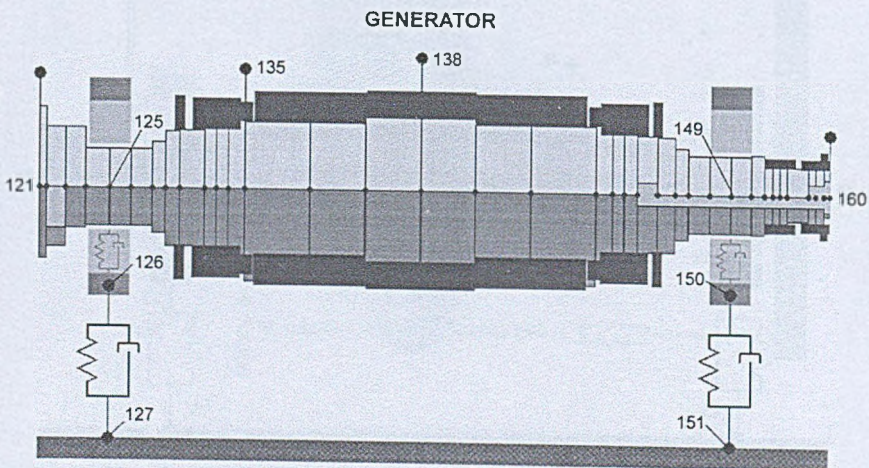
Rys. 1.5: Numeracja w części WP (NLDW)



Rys. 1.6: Numeracja w części SP (NLDW)



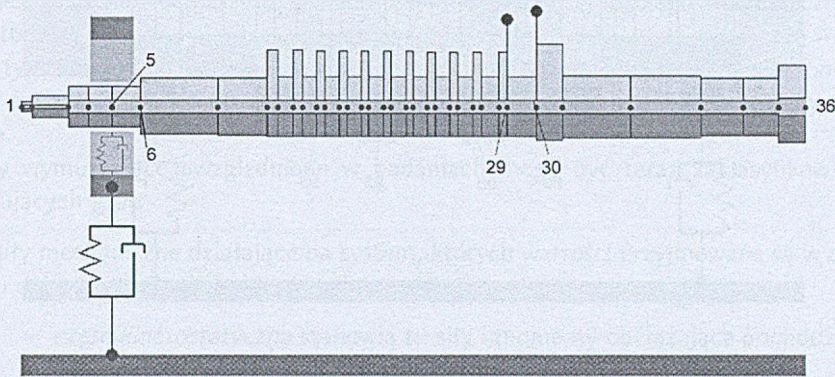
Rys. 1.7: Numeracja w części NP (NLDW)



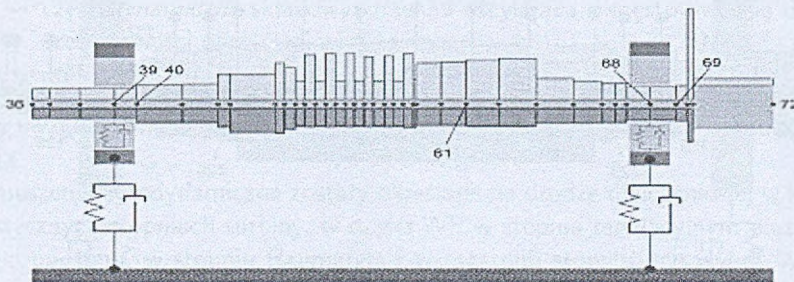
Rys. 1.8: Numeracja w generatorze (NLDW)

1.5. Identyfikacja obciążeń działających w układzie

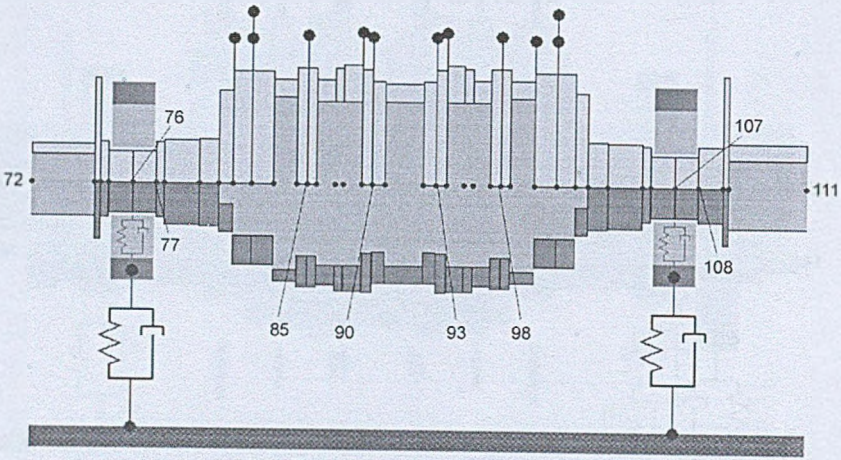
Z uwagi na potrzebę korekcji podłożenia w wyznaczonych miejscach połączenia na tryb łączymy moduł obciążenia i symulujemy. Wynikami są dane potrzebne do wyznaczenia odpowiedniej korekcji. Wynikami są dane potrzebne do wyznaczenia odpowiedniej korekcji. Wynikami są dane potrzebne do wyznaczenia odpowiedniej korekcji.



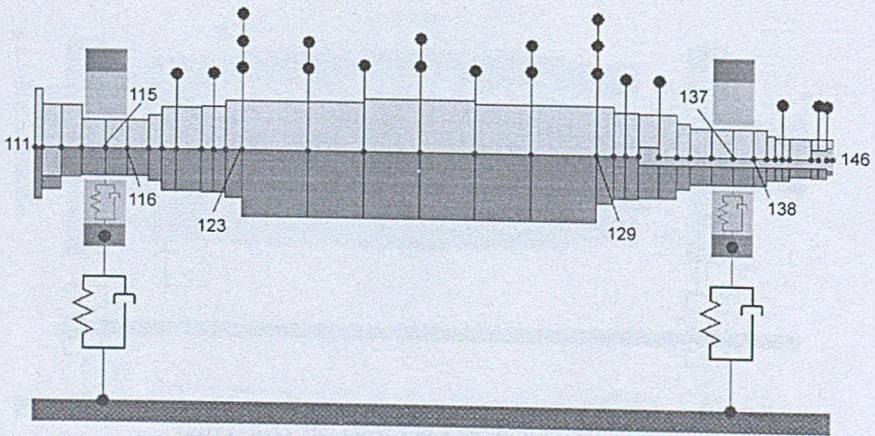
Rys. 1.9: Numeracja w części WP (KINWIN)



Rys. 1.10: Numeracja w części SP (KINWIN)



Rys. 1.11: Numeracja w części NP (KINWIN)



Rys. 1.12: Numeracja w generatorze (KINWIN)

1.5. Identyfikacja obciążeń działających w układzie

Z uwagi na przyjętą koncepcję modelowania w dynamice wirników polegającą na wyrażeniu rozdziału części kinetostatycznej i dynamicznej zachodzi potrzeba przyjęcia odpowiedniej konwencji zapisu sił zewnętrznych działających na każdy z wyodrębnionych układów. W zagadnieniach kinetostatycznych wszelkie siły muszą być stałe co do wartości, kierunku i zwrotu i oddziaływać na wirujący wał wirnika. Uwaga ta dotyczy zarówno sił wynikających z ciężaru dysków sztywnych, uzwojenia w generatorze, jak również części stałej sił dynamicznych np. sił aerodynamicznych, czy naciągu magnetycznego w generatorze.

W tym kontekście używane w dalszej części opracowania określenie *siła kinetostyczna* oznacza stałą co do wartości siłę lub moment działający na obracający się wał wirnika.

Siły wymuszające uwzględnione w badaniach mogą być teraz zaklasyfikowane do następujących grup:

- siły mechaniczne działające na system, których wartości przyjmowane są w oparciu o dokumentację techniczną turbozespołu:
 - część *kinetostatyczną* stanowią tu siły i momenty obciążające pochodzące od dysków ewentualnie uzwojeń w generatorze,
 - część *dynamiczną* stanowią niewyważenia resztkowe wyznaczone w procesie dostrajania modelu,
- siły aerodynamiczne:
 - część *kinetostatyczną* tych sił stanowi składowa stała,
 - część *dynamiczną* oscylacje wokół składowej stałej,
- naciągi magnetyczne w generatorze:
 - część *kinetostatyczną* stanowi składowa stała tych sił,
 - część *dynamiczną* składowa zmienna oscylująca z częstotliwością podwójnej częstotliwości obrotowej wirnika.

Ze względu na fakt, że siły aerodynamiczne i siły naciągu w generatorze są po raz pierwszy uwzględniane w modelu turbozespołu przedstawimy pokrótce sposób ich wprowadzenia.

Wymuszenia aerodynamiczne zostały określone na drodze obliczeniowej w kilku charakterystycznych stopniach turbiny: w części WP w stopniu regulacyjnym oraz w części NP przed upustem, w stopniu Baumanna i w ostatnim stopniu. Ich wybór był podyktowany tym, iż tylko w tych stopniach otrzymano tzw. wymuszenia aerodynamiczne niskoczęstotliwościowe, o częstościach porównywalnych z częstościami drgań wirnika (w odróżnieniu od sił wysokoczęstotliwościowych o częstościach odpowiadających częstościom łopatkowym) i tylko w tych stopniach wpływ sił aerodynamicznych na wirnik był zauważalny. W wyniku obliczeń otrzymano kilka zestawów sił aerodynamicznych różniących się zadanymi warunkami, np. rozstrojeniem łopatek, pulsacją ciśnień, geometrią upustu, zadanym obciążeniem itp. Poprzez *zestawy sił* należy rozumieć pliki z podanymi przebiegami czasowymi sił działających w różnych kierunkach.

W celu zaimplementowania ich do programu NLDW-75-LEW należało wykonać szereg czynności mających na celu przede wszystkim zachowanie zgodności formatu otrzymanych przebiegów czasowych z wymaganiami dotyczącymi formatu danych do programu NLDW, jak również zachować założenia dotyczące warunków pracy (obciążenia). Z tych przyczyn kilka zestawów sił zostało wstępnie odrzuconych (np. odrzucono wszystkie wyniki obliczeń w stopniu Baumanna). Z pozostałych stworzono 2 przypadki: *nominalny*, w którym przebiegi sił aerodynamicznych uważać można za zbliżone do występujących w maszynie pracującej w warunkach nominalnych oraz *ekstremalny*, dla którego przyjęto siły o maksymalnych obliczonych amplitudach (obliczenia były prowadzone przy maksymalnych spodziewanych czynnikach wzbudzających drgania typu rozstrojenie łopatek lub pulsacje ciśnienia). Następnie ustalono odpowiednie kierunki działania poszczególnych sił dokonując stosownych konwersji (układy współrzędnych przyjęte w poszczególnych programach oraz w programie NLDW były różne).

Bardzo ważnym zagadnieniem okazała się kwestia usunięcia (*odsiania*) z przebiegów czasowych wymuszeń ich składowej stałej, czyli wyodrębnienie części kinetostatycznych i dynamicznych tych sił. W toku dostrojenia modelu zdecydowano się ostatecznie na odsianie stałej w oparciu o średnią arytmetyczną przebiegu danego wymuszenia. Można udowodnić, że w przybliżeniu odpowiada to jego wartości skutecznej. Wartość ta została każdorazowo odjęta od przebiegu czasowego danego wymuszenia i wprowadzona do danych do programów serii KINWIN w odpowiednich węzłach. Dzięki temu do programu NLDW zostały wprowadzone czyste wymuszenia dynamiczne.

Głównym źródłem sił wymuszających drgania w generatorze są tzw. *siły naciągu magnetycznego*. Są to promieniowo działające siły wynikające ze zmiennych pól magnetycznych w obwodzie magnetycznym wirnik-stojan generatora. Siły te mają złożony charakter i nie mogą być modelowane jako synchroniczne z obrotami wirnika.

Generalnie siły naciągu generatora mają składową stałą o stałym kierunku o stałej wartości, oraz składową zmienną zarówno co do wielkości jak i co do kierunku. Wypadkowa tych sił oscyluje na pewnym kątowym obwodzie stojana z częstotliwością podwójnej częstości obrotowej wirnika. Ponadto siły te są zmienne wzdłuż długości wirnika generatora. Mogą one być wyznaczone na podstawie szczegółowych danych geometrycznych i parametrów elektrycznych pracy generatora, w szczególności mocy czynnej i biernej. Dla potrzeb niniejszej pracy siły naciągu zostały obliczone za pomocą programu komputerowego o nazwie *nac.mgt*, utworzonego specjalnie do tego celu w trakcie prac związanych z PBZ K015/T10/2001

Wielkość sił naciągu zależy m. in. od stopnia ugięcia wirnika generatora, od przemieszczenia podpór łożysk generatora i od przemieszczenia osi wirnika względem osi stojana. Ugięcie wirnika zależy z kolei od wielkości sił naciągu generatora. W ten sposób wielkości te są wzajemnie sprzężone i naciąg generatora może być obliczony tylko na drodze iteracyjnej. Możliwość takich obliczeń przewiduje dostarczony program.

1.5.1. Siły kinetostatyczne

Części kinetostatyczne sił działających na układ uwzględniane są w obliczeniach programami KINWIN-60 i KINWIR-I-LEW. Są one wprowadzane do programu, jako obciążenia kinetostatyczne czytane z pliku *nazwa.wir*. Wartości obciążeń kinetostatycznych przyjętych do obliczeń zestawione zostały w Tab.1.1 – Tab.1.3. Z uwagi na przyjęty model w obliczeniach kinetostatycznych uwzględniane są części stałe tylko sił poprzecznych, stąd

w Tab.1.2 nie uwzględniono sił wzdłużnych i momentów skrętnych. Położenie węzłów, których numery znajdują się w tabelach przedstawiają Rys.1.3 i Rys.1.9÷ Rys.1.12. Znak (-) wartości sił w tabelach 1.1÷1.3 oznacza dla kierunku Y pionowo w dół.

Tab. 1.1: Kinetostatyczne siły mechaniczne (dyski, uzwojenia w generatorze)

numer węzła	numer kierunku	kierunek	siła [N]
82	327	Y	-14 106.80
85	339	Y	-6 023.30
89	355	Y	-5 405.30
90	359	Y	-2 884.10
93	371	Y	-2 881.10
94	375	Y	-5 405.30
98	391	Y	-6 023.30
101	403	Y	-14 106.80
119	475	Y	-3 786.70
121	483	Y	-17 609.00
123	491	Y	-1 353.80
123	491	Y	-2 187.60
124	495	Y	-44 046.90
126	503	Y	-39 338.10
128	511	Y	-44 046.90
129	515	Y	-2 187.60
129	515	Y	-1 353.80
131	523	Y	-17 609.00
133	531	Y	-3 786.70
141	563	Y	-1 373.40
144	575	Y	-1 373.40
145	579	Y	-784.80

Tab. 1.2: Części stałe (kinetostatyczne) sił aerodynamicznych

numer węzła	numer kierunku	kierunek	siła [N]
30	117	X	2638.71
30	119	Y	9208.26
82	325	X	2.17
82	327	Y	-0.75
101	401	X	-2.17
101	403	Y	-0.75

Tab. 1.3: Kinetostatyczne siły magnetyczne (naciągi magnetyczne w generatorze)

numer węzła	numer kierunku	kierunek	siła [N]
123	491	Y	-13 304
124	495	Y	-20 374
125	499	Y	-20 691
126	503	Y	-20 776
127	507	Y	-20 623
128	511	Y	-20 242
129	515	Y	-13 181

1.5.2. Siły dynamiczne działające na układ

Zewnętrzne obciążenia dynamiczne w formie dodatkowych (poza niewyważeniami) sił poprzecznych, wzdłużnych i momentów skrętnych są zapisane w plikach danych do programu NLDW-LEW-75, które znajdują się w katalogu PRZYPADEK-BAZOWY\OBLICZENIA\nldw-75-lew\ DAN i tak:

pbartmax.p'i' - zbiór zawierający wartości sił poprzecznych zmiennych w czasie dla siły poprzecznej o numerze 'i':

pierwsza kolumna - czas [s]

druga kolumna - składowa x siły [N]

trzecia kolumna - składowa y siły [N]

pbartmax.w'i' - zbiór zawierający wartości sił wzdłużnych zmiennych w czasie dla siły wzdłużnej o numerze 'i':

pierwsza kolumna - czas [s]

druga kolumna - siła wzdłużna [N]

pbartmax.m'i' - zbiór zawierający wartości momentów skrętnych zmiennych w czasie dla momentu o numerze 'i':

pierwsza kolumna - czas [s]

druga kolumna - moment skrętny [Nm]

Siły aerodynamiczne

Tabele 1.4, 1.5, 1.6 przedstawiają numerację wymuszeń aerodynamicznych i odpowiadających im węzłów.

Tab. 1.4: Siły poprzeczne

Nr siły poprzecznej	Nr węzła (wg NLDW)	Stopień
1	32	Regulacyjny (WP)
2	90	Ostatni (WP)
3	109	Ostatni (WP)

Przebiegi czasowe tych sił znajdują się w plikach **pbartmax.p1÷p3**, katalogu PRZYPADEKBAZOWY\OBLICZENIA\nldw-75-lew\ DAN

Tab. 1.5: Siły wzdłużne

Nr siły wzdłużnej	Nr węzła (wg NLDW)	Stopień
1	32	Regulacyjny (WP)
2	90	Ostatni (NP)

Przebiegi czasowe tych sił znajdują się w plikach **pbartmax.w1÷w5** katalogu PRZYPADEKBAZOWY\OBLICZENIA\nldw-75-lew\ DAN

Tab. 1.6: Momenty skrętne

Nr siły wzdłużnej	Nr węzła (wg NLDW)	Stopień
1	32	Regulacyjny (WP)
2	90	Ostatni (NP)
3	97	Upust (NP)
4	102	Upust (NP)
5	109	Ostatni (NP)

Przebiegi czasowe tych sił znajdują się w plikach **pbartmax.m1÷m5** katalogu PRZYPADEKBAZOWY\OBLICZENIA\nldw-75-lew\ DAN Przykładowe przebiegi sił aerodynamicznych w funkcji obrotu wału w stopniu regulacyjnym, gdzie wymuszenia są największe przedstawia Rys.1.31.

Niewyważenia reszkowe

Siły pochodzące od niewyważenia wirnika są w istocie siłami odśrodkowymi mas niewyważenia umieszczonych na pewnym promieniu. Wielkości te były dla modelowanego wirnika określone na podstawie badań podobnego wirnika w odwirowni. Ponieważ jednak niewyważenie wirnika może się w czasie eksploatacji maszyny zmienić, należy uznać, że jest ono w istocie nieznanne. Wyniki badań z odwirowni zostały zatem przyjęte jako „wyjściowe”. W toku prac dostrojeniowych modelu zostały one nieznacznie zmodyfikowane. Ostateczny rozkład niewyważenia reszkowego wirnika przedstawia Tab.1.7.

Tab. 1.7: Ostateczny rozkład niewyważenia resztkowego wirnika

L.p.	Masa niewyważenia [kg]	Promień niewyważenia [m]	Położenie niewyważenia [stopnie]	Nr węzła przyłożenia [-]	Krotność wirowania niewyważenia
I	MNW(I)	RNW(I)	FI(I)	NOW(I)	HAR(I)
1	0.132	0.320	0.000	11	1.000
2	0.128	0.335	0.000	28	1.000
3	0.080	0.655	0.000	48	1.000
4	0.104	0.492	0.000	64	1.000
5	0.240	0.430	0.000	69	1.000
6	0.100	0.690	226.000	89	1.000
7	0.240	0.690	137.000	110	1.000
8	0.056	0.425	0.000	120	1.000
9	0.064	0.373	0.000	121	1.000
10	0.168	0.102	0.000	135	1.000
11	0.168	0.102	0.000	138	1.000
12	0.053	0.166	0.000	160	1.000

Siły naciągu magnetycznego w generatorze

W wyniku obliczeń programem *nac_mgt* zostały wygenerowane przebiegi sił naciągu dla 19 przekrojów wzdłuż długości wirnika. Są to dyskretne zbiory 100 wartości sił naciągu w trakcie jednego obrotu wirnika. Obliczone w ten sposób siły naciągu generatora zostały dostosowane do postaci wymaganej przez program NLDW. Zostały one przyłożone do 7 węzłów rozłożonych wzdłuż wirnika generatora. Są to węzły o numerach: 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141. Numery tych węzłów, oraz numerację plików z danymi zawierającymi siły naciągu magnetycznego zawiera zbiór *pbartmax.obc*, który znajduje się w katalogu PRZYPADKBAZOWY\OBLICZENIA\nldw-75-lew\ DAN. Ze względu na konieczność zachowania kolejności numeracji wymuszeń, siły naciągu magnetycznego mają numery 4÷10. Ze względu na różne dyskretyzacje wirnika w programach *nac_mgt* (19 odcinków) i NLDW (7 węzłów), siły przyłożone do poszczególnych węzłów w programie NLDW wyznaczono w taki sposób, iż w programie NLDW siła przyłożona w węźle jest sumą sił wyznaczonych w odpowiednich odcinkach wału wg programu *nac_mgt*, najbliższych do danego węzła (patrz Tab.1.8).

Przebiegi czasowe tych sił zweryfikowane w procesie dostrojenia znajdują się w plikach *pbartmax.p4÷p10*, umieszczonych w katalogu PRZYPADKBAZOWY\OBLICZENIA\nldw-75-lew\ DAN

1.6. Procedura dostrajania

Podstawowymi danymi dla budowy przypadku bazowego, tzn. danymi, do których dostrajamy nasz model, są parametry pracy turboszespołu zarejestrowane przez system diagnostyczny DT200 w dniu 12.04.2000 r. Odpowiada mu praca turboszespołu w stanie ustalonym, przy prędkości obrotowej nominalnej 3000 obr./min., przy mocy czynnej 211.25 MW

Tab. 1.8: Numeracja wymuszeń magnetycznych, zamiana dyskretyzacji wirnika generatora

Nr wymuszenia wg pliku *.obc	Nr węzła (NLDW)	Numery odcinków wału wg <i>nac.mgt</i>
4	135	1, 2
5	136	3, 4, 5
6	137	6, 7, 8
7	138	9, 10, 11
8	139	12, 13, 14
9	140	15, 16, 17
10	141	18, 19

mocy biernej 73.75 MW i współczynnika mocy $\cos\varphi = 0.94$. Karta diagnostyczna dla tego przypadku zaczerpnięta z [1.1] jest przedstawiona na Rys.1.13.

W ramach procedury dostrajania dobrane zostały wartości takie jak: kompleksowe współczynniki tłumienia w elementach, współczynniki sztywności i tłumienia podpór, niewyważenia resztkowe, kształt gorącej linii kinetostatycznej i naciągi magnetyczne. Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę procedury dostrajania i ostateczne wartości wspomnianych parametrów. Wszystkie inne dane geometryczne pozostały niezmiennione i są wyspecyfikowane w plikach znajdujących się w katalogach PRZYPADK-BAZOWY\OBLICZENIA\.....\DAN (w miejsce kropek należy wstawić odpowiednią nazwę katalogu: kinwin-60, kinwin-i-lew, nldw-75-lew).

Parametry dostrajania modelu:

1. kompleksowe współczynniki tłumienia w elementach;

Tłumienie wewnętrzne w elementach wirników opisują dwa współczynniki:

α - uzależniającego tłumienie wewnętrzne od bezwładności elementu,

β - uzależniającego tłumienie wewnętrzne od sztywności elementu.

Współczynniki te związane są z tłumieniem materiałowym, ale także uwzględniają tłumienie spowodowane przepływem pary przez wirnik, stąd dla odróżnienia ich od współczynników tłumienia materiałowego dodano w nazwie człon „kompleksowe”.

W wyniku procesu dostrajania ustalono następujące wartości tych współczynników:

$$\alpha = 2.4, \beta = 0.00032$$

2. współczynniki sztywności i tłumienia podpór;

W ramach prac prowadzonych w PBZ opracowano model MES korpusów i stojaków w oparciu o dokumentację techniczną. Metodami przestrzennej analizy komputerowej wyznaczono macierze sztywności, tłumienia i mas w miejscach podparcia łożysk. Wyniki badań zweryfikowano uwzględniając wyniki pomiarów na rzeczywistym obiekcie. Przyjęte do obliczeń wartości zestawione zostały w Tab.1.9.

3. wielkości sił niewyważenia resztkowego;

Wielkości te zostały wyznaczone w oparciu o badania podobnego wirnika w odwrotni. Wyniki badań zmodyfikowano w nieznacznym stopniu porównując je z danymi eksploatacyjnymi dla bloku 7 w Elektrowni Koźlenice. Ostatecznie zbiór wartości

Tab. 1.9: Przyjęte do obliczeń wartości współczynników FGAM oraz FBETA

Nr łożyska	FGAM [N/m]				FBETA [N*s/m]			
	11	12	21	22	11	12	21	22
1	2.0E+9	0.0	0.0	2.0E+9	0.0	0.0	0.0	0.0
2	2.0E+9	0.0	0.0	2.0E+9	0.0	0.0	0.0	0.0
3	2.0E+9	0.0	0.0	2.0E+9	0.0	0.0	0.0	0.0
4	2.8E+9	0.0	0.0	2.4E+9	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1.3E+9	0.0	0.0	1.8E+9	0.0	0.0	0.0	0.0
6	1.7E+9	0.0	0.0	2.5E+9	0.0	0.0	0.0	0.0
7	5.0E+9	0.0	0.0	5.0E+9	0.0	0.0	0.0	0.0

charakteryzujących rozkład sił niewyważenia resztkowego zawarty w Tab.1.7 został ustalony w procesie dostrajania modelu.

4. kształt gorącej linii kinetostatycznej;

Do obliczeń przyjęto zestaw parametrów pomierzonych w EI. Kozienice.

Przesunięcia podpór względem linii geodezyjnej zestawiono w Tab. 1.10. Przesunięcia łożysk w stosunku do tzw. zerowej linii geodezyjnej określają dwa parametry:

a_{mont} [m] – przesunięcia poziome,

b_{mont} [m] – przesunięcia pionowe.

Tab. 1.10: Przesunięcia podpór względem linii geodezyjnej

nr podpory	1	2	3	4	5	6	7
a_{mont} [m]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
b_{mont} [m]	-0.006	-0.0074	-0.0056	-0.0046	0.0002	0.0021	0.0108

5. Naciągi magnetyczne

W toku prac (obliczeń identyfikacyjnych i dostrojonych modelu) przyjęto wariant maksymalnych sił naciągu magnetycznego wyznaczanych programem **nac_mgt**. Zadowolającą zgodność drgań modelu i obiektu rzeczywistego uzyskano, przyjmując tak wyznaczoną składową stałą składową bez zmian, zaś składową zmienną zwiększając 1,5 raza.

Przebiegi czasowe tych sił zweryfikowane w procesie dostrojenia znajdują się w plikach **pbartmax.p4÷p10**, które zamieszczono w katalogu PRZYPADKOWY\OBLICZENIA\nldw-75-lew\ DAN.

Wynik procesu dostrajania modelu w postaci karty diagnostycznej przedstawia Rys.1.14. Karta ta obliczona została w płaszczyźnie montażu czujników, co umożliwia bezpośrednio jej porównanie z kartą eksperymentalną (Rys.1.13) i wyciąganie wniosków co do jakości procedury dostrajania i modelowania obiektu.

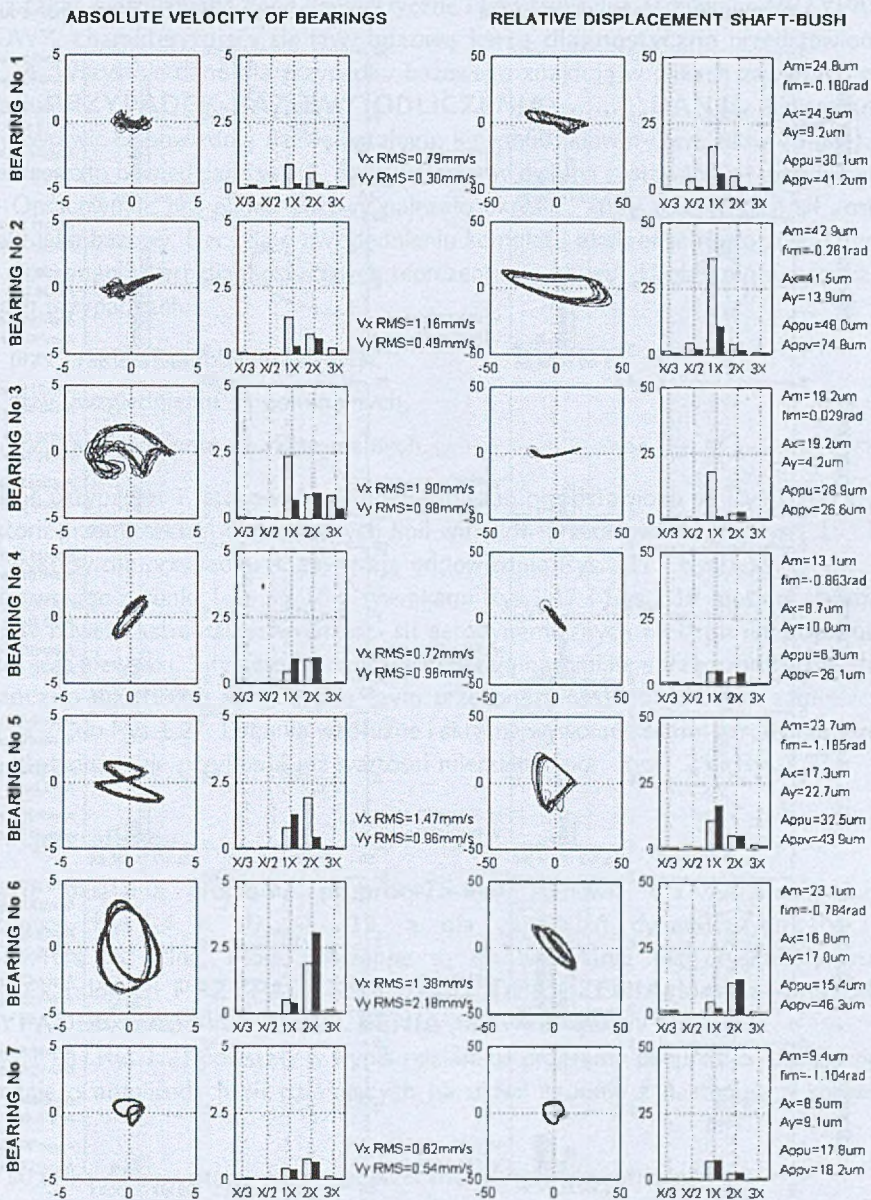
Card code: BAZA-eksperyment

Object: 13K215

Date: 2000-04-12 09:51

Defect description: El. KOZIENICE, blok nr 7

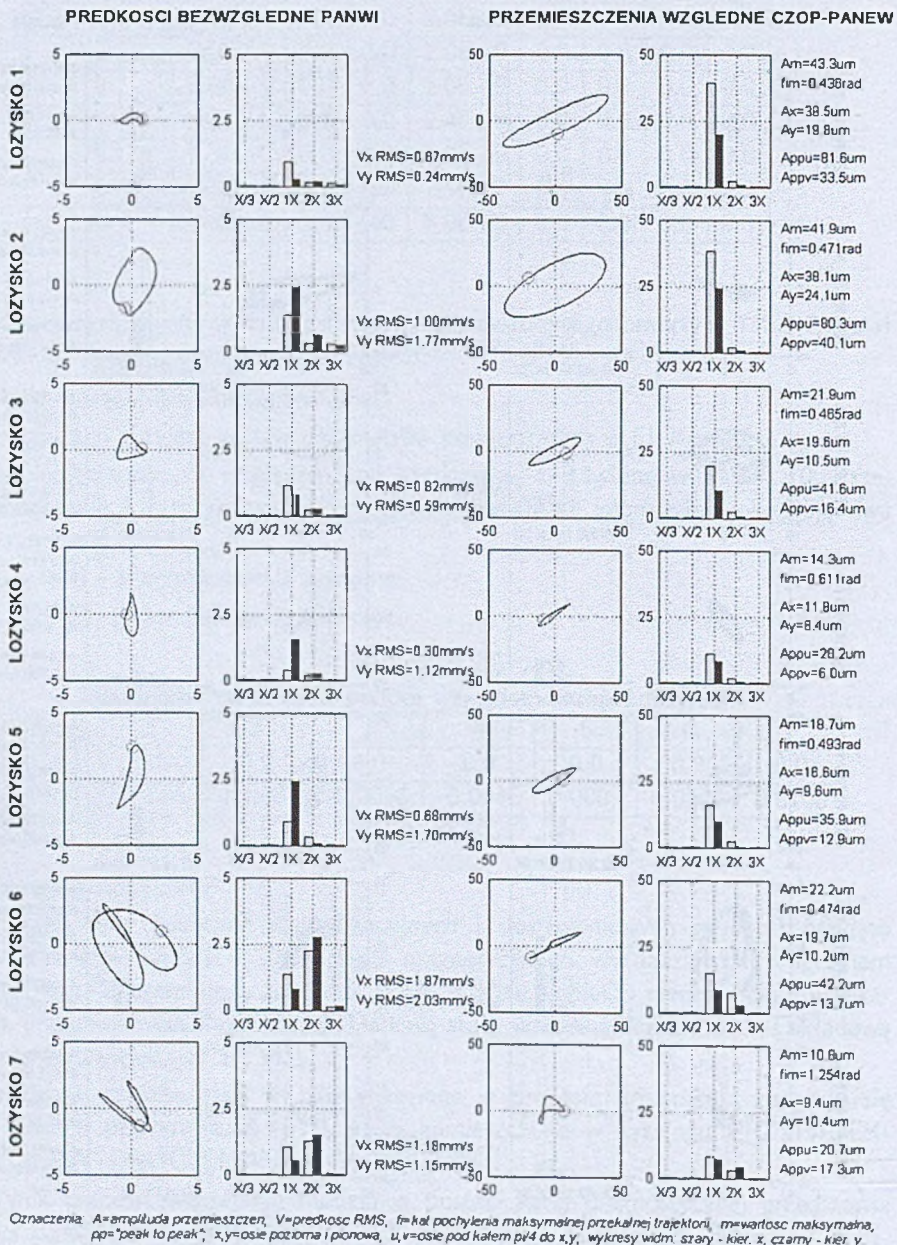
Variable data: NomObcPelne, ngenc=211.25 MW, ngenb=73.75 MVA, rpm=3000 obr/min.



System DT200-1

Rys. 1.13: Eksperymentalna karta diagnostyczna. Wyniki pomiarów na obiekcie rzeczywistym za pomocą systemu DT200 (turbozespół 13K215 blok 7 w elektrowni Koziencice)

Kod karty: BAZA-gen-aerodynMAX	Obiekt: 13K215	Data: 13.02.2004
Opis defektu:		
Dane zmienne:		



Rys. 1.14: Bazowa prędkościowa karta diagnostyczna. Efekt dostrojenia modelu do danych pomiarowych na obiekcie rzeczywistym – Rys.1.13. Drgania względne w płaszczyźnie czujnika i skala umożliwiająca porównanie z kartą prezentowaną na Rys.1.13

1.7. Przypadek bazowy

Uwzględniając wartości parametrów dobieranych w ramach procedury dostrajania modelu, a także niezmienione dane geometryczne i konstrukcyjne otrzymano PRZYPADEK BAZOWY, charakteryzujący się tzw. **bazową kartą diagnostyczną** przedstawioną na Rys.1.14. Wszystkie dane dla przypadku bazowego znajdują w plikach zawartych w katalogach **PRZYPADEK-BAZOWY\OBLICZENIA\.....\DAN** (w miejsce kropek należy wstawić odpowiednią nazwę katalogu: kinwin60, kinwin-i-lew, nldw-75-lew).

Jak zostało powiedziane w 1.5, dysponowaliśmy dwoma zestawami sił aerodynamicznych. Opracowując przypadek bazowy należało określić, który zestaw tych sił zostanie przyjęty jako bazowy. Decyzja o uwzględnieniu kompletu **ekstremalnego** została podjęta po porównaniu kart diagnostycznych reprezentujących wyniki obliczeń dynamicznych w trzech przypadkach:

1. przy braku sił aerodynamicznych,
2. przy uwzględnieniu sił nominalnych,
3. przy uwzględnieniu sił ekstremalnych.

Ilustrację przypadku 1. stanowi karta diagnostyczna przedstawiona na Rys.1.16 i wykres trajektorii przemieszczeń dynamicznych linii wirników przedstawiony na Rys.1.15. Takie same wykresy dla przypadku 3. zawierają odpowiednio Rys.1.17 i Rys.1.19.

Porównując rysunki 1.15 i 1.16 z rysunkami Rys.1.17 i Rys.1.19 musimy stwierdzić, iż wpływ nawet ekstremalnych wartości sił aerodynamicznych na **drżania poprzeczne układu** jest niewielki. Siły aerodynamiczne generują natomiast **sprężone formy drgań poprzeczno-wzdłużno-skrętnych** czym przekonują nas widma drgań zamieszczone na Rys.1.24 do Rys.1.27. Drgania wzdłużne i skrętne wywołane siłami aerodynamicznymi nie są zbyt duże, ale przyjmują już wartości mierzalne (por. Rys.1.26 i Rys.1.27).

Ilustracja graficzna

Ilustrację działania programu **preproc-75-lew** stanowią dla zagadnień kinetostatycznych Rys.1.4 i 1.9 ÷ 1.12, a dla zagadnień dynamicznych Rys.1.3 i Rys.1.5 ÷ Rys.1.8. Pliki, które potrzebne są do wykonania tych rysunków znajdują się w katalogach **PRZYPADEKBAZOWY\OBLICZENIA\kinwin-i-lew\DAN** i **PRZYPADEK-BAZOWY\OBLICZENIA\nldw-75-lew\WYN**

Rys.1.20 i Rys.1.21 powstały w wyniku działania programu **preproc-SILY**. Zawierają informacje o amplitudach sił działających na układ zgodnie z następującą konwencją zapisu:

- strzałka skierowana w górę – poprzeczne siły aerodynamiczne;
- strzałka wzdłuż linii wału – wzdłużne siły aerodynamiczne;
- strzałka pod kątem 45° - momenty skrętne;
- strzałka skierowana w dół – poprzeczne siły w generatorze.

Program **preproc-SILY** jest programem interaktywnym, *kliknięcie* na strzałkę pozwala uzyskać informacje o wartości amplitudy, fazie i przebiegu siły, którą dana strzałka reprezentuje.

Ilustracja wyników otrzymanych dla przypadku bazowego i zapisanych w katalogu PRZYPADK-BAZOWY\OBLICZENIA\nldw-75-lew\WYN będzie równocześnie prezentacją programów graficznych, których krótkie charakterystyki znajdują się w punkcie 1.3.2.

Na Rys.1.19. pokazano kartę diagnostyczną zawierającą ilustrację drgań bezwzględnych panwi i drgań względnych czop-panew w płaszczyźnie centralnej panwi.

Podkreślamy – do określenia stopnia *dostrojenia* modelu postużyliśmy się kartą zawierającą prędkości bezwzględne i drgania względne w płaszczyźnie czujnika (Rys.1.14), analogiczną do karty ilustrującej wyniki pomiarów (Rys.1.13). Z oczywistych powodów przy analizie symptomów związanych z konkretnymi defektami opierać się będziemy na obrazie drgań. Karty diagnostyczne przedstawiona na Rys.1.16 i Rys.1.19 prezentują obraz drgań w skali, która będzie utrzymana na dalszych wykresach. Zostały przygotowane programem `kd3x7umwp.m`. Program do przygotowania kart zawierających opisy w języku angielskim nosi nazwę `kd3x7umwa.m`.

Rys.1.17, Rys.1.18 i Rys.1.22 powstały przy zastosowaniu programu `wykr6-nldw75.m`, prezentują przestrzenne trajektorie drgań wzdłuż linii wirnika.

W celu otrzymania wykresów przedstawionych na Rys.1.17 i Rys.1.18 należy umieścić w katalogu WYN (zawierającym wyniki z programu NLDW o podstawowej części nazwy `pbartmax`) następujący plik o nazwie `pbartmax.str`:

```
Ilosc podpor
7
Odleglosci bezwzgleadne podpor od punktu z=0 w metrach
0.53 5.25 9.573 11.498 16.528 18.603 26.303
N-ry wezlow (wg nazwa.wdy) dla rys. traj. bezwzgl. panwi ...
6 42 73 83 116 126 150
N-ry wezlow (wg nazwa.wdy) dla rys. traj. bezwzgl. walu ...
1 5 9 11 18 24 28 32 34 36 38 41 45 48 52 56 59
62 63 66 67 69 72 78 82 87 89 92
95 98 100 103 106 108 110 112 115 121 125 131
135 136 137 138 139 140 141 145 149 160
koniec
```

Rys.1.22 powstał przy zastosowaniu następującego pliku `pbartmax.str`

```
Ilosc podpor
7
Odleglosci bezwzgleadne podpor od punktu z=0 w metrach
0.53 5.25 9.573 11.498 16.528 18.603 26.303
N-ry wezlow (wg nazwa.wdy) dla rys. traj. bezwzgl. panwi ...
6 42 73 83 116 126 150
N-ry wezlow (wg nazwa.wdy) dla rys. traj. bezwzgl. walu ...
koniec
```

Po umieszczeniu w katalogu WYN odpowiedniego pliku sterującego i uruchomieniu MATLABA należy przejść do katalogu WYN i wprowadzić z klawiatury następujące dane:

	dla Rys.1.17	dla Rys.1.18	dla Rys.1.22
wykr6_nldw75			
Podstawowa czesc nazwy plikow:		pbartmax	
Współczynnik skali dla trajektorii:	1	300	1
Współczynnik skali dla linii kinetostatycznej:	0	1	0
Parametr linii łączącej punkty 0-bez,1-0,2-90,3-180,4-270:	0	0	0
Par. kcp=0 - traj. wzgl.(zb.: .c1) nie są rysowane, kcp=1 -sa:	0	0	1
skala, ręczna - r, automatyczna - a:		r	
min xy:	-5e-5	(-5e-5)*300 -0.015	-5e-5
max xy:	5e-5	(5e-5)*300 0.015	5e-5

Rys.1.23 powstał przy pomocy programów **wyktra6.m** i **wyktra4.m**. Jak zostało wspomniane w 1.3.2 programy te umożliwiają wykreślenie trajektorii jednego lub dwóch węzłów czytanych odpowiednio z plików *nazwa.nr węzła*, *nazwa.c numer łożyska*. Konieczność stosowania programu **wyktra4** wynika z faktu, że pliki *nazwa.c** są czterokolumnowe. Na Rys.1.23(a) zilustrowano pliki **pbartmax.6** i **42**, a na Rys.1.23(b) pliki **pbartmax.c1** i **c2** z katalogu **PRZYPADEK-BAZOWY\OBLICZENIA\nldw-75-lew\WYN**

Rys.1.24 ÷ Rys.1.27 przedstawiają widma drgań poprzecznych, wzdłużnych i skrętnych w łożysku nr 2, gdzie spodziewać się można było największego wpływu sił aerodynamicznych. Rysunki te powstały przy pomocy programu **FFTamp.m** po wpisaniu następujących danych:

Nazwa pliku z danymi: **pbartmax.c2** dla A i B; **pbartmax.41** dla C i D

Nr kolumny w pliku danych: **2** dla A, **3** dla B, **4** dla C, **5** dla D

Zakres analizy w Hz: **200** dla A, B, C i D.

Rys.1.28 powstał przy pomocy programu **anim_traj75lew**. Wykorzystano jedną z możliwości tego programu, jaką jest przedstawienie trajektorii względnych w płaszczyźnie luzów łożyskowych. Otrzymanie wykresów prezentowanych na tym rysunku wymagało:

- skopiowania plików **pbartmax.e*** do plików **animacja.e*** (pliki te znajdują się w katalogu **WYN**)
- uruchomienia programu **anim_traj75lew.exe**
- ustawienia odpowiednich wartości w tablicy, która pojawia się na ekranie; tzn.
 - po wejściu do MENU→Wczytaj dane→ określenie nazwy pliku z danymi,
 - w oknie *generowanie zbiorów wynikowych* wpisanie **0**,
 - w oknie *dane sterujące animacją trajektorii* POBR trajektorii **3000**,
 - w oknie *ilość punktów trajektorii* **1000**,
 - następnie po wejściu do MENU wybranie opcji oglądanie trajektorii.

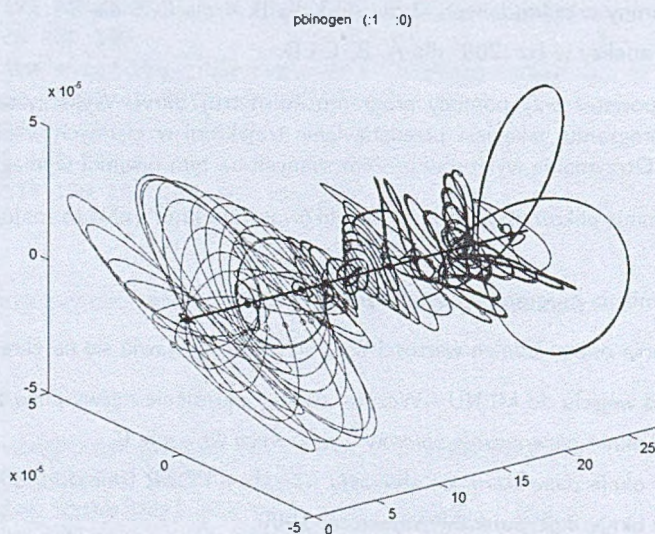
Rys.1.29 powstał przy pomocy programu **nldwlewgraf**. Jak widać wykresy ciśnień dla wszystkich chwil są identyczne, co po spojrzeniu na okno odpowiadające łożysku 6 na Rys.1.20 potwierdza poprawność działania programu. Oczywiście przy wprowadzaniu defektów ten obraz ulegnie zmianie.

Rys.1.30 przedstawia rozkład ciśnień w łożysku 6 otrzymanych z programu KINWIN-I-LEW, powstał przy pomocy programu **kinwinlewgraf**.

Dla porządku podajemy sposób uzyskania prezentowanych wykresów, w nawiasach podajemy dane dotyczące programu kinwinlewgraf:

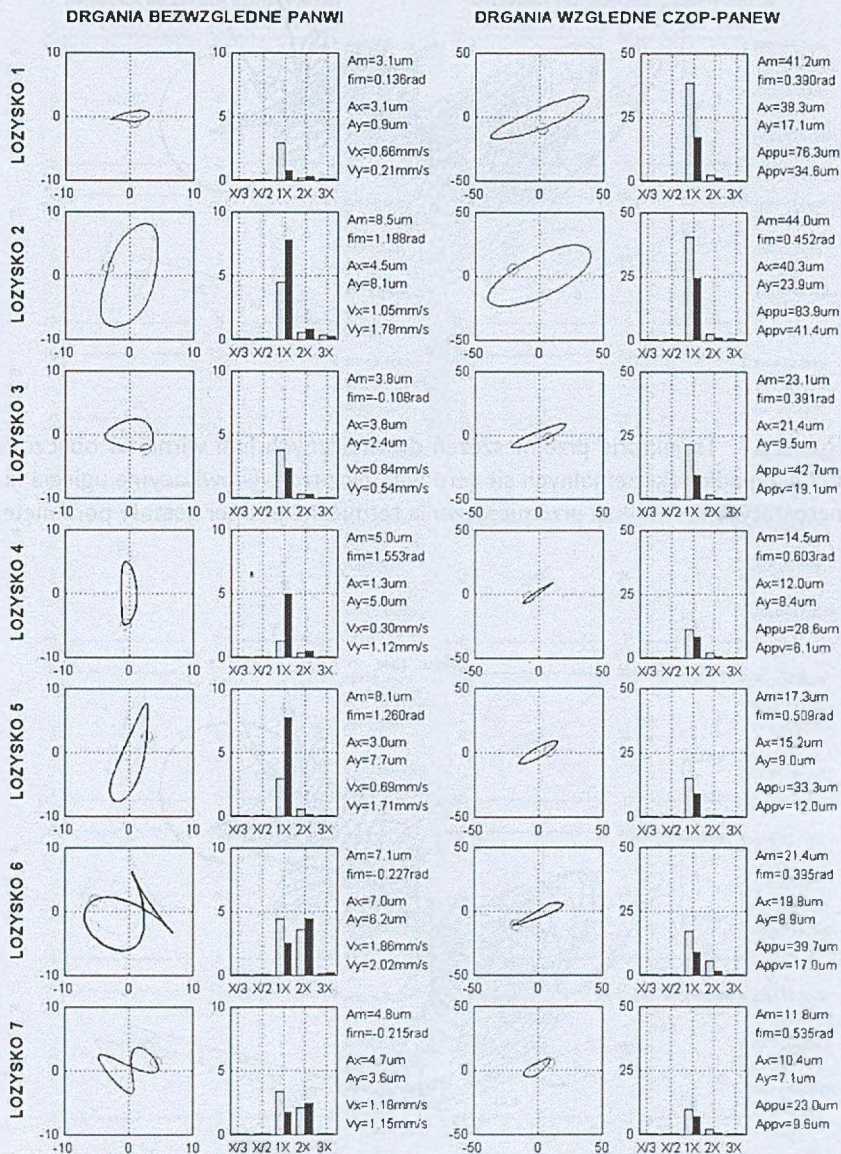
- do katalogu zawierającego katalogi DAN i WYN wprowadzamy katalog NLDW-LEWGRAF (KINWIN-I-LEWGRAF)
- po uruchomieniu MATLABA i przejściu do wymienionego wyżej katalogu wpisujemy polecenie *nldwlewgraf (kinwinlewgraf)*
- wybieramy w oknie nazwę pliku zawierającą interesujące nas ciśnienia (nazwa pliku, który został „zilustrowany” znajduje się nad rysunkiem)
- z MENU wybieramy MENU CISNIENIA
- podajemy skalę rysunku – na prezentowanych wykresach największa wartość ciśnienia wynosiła 7255000 N/m^2
- z MENU wybieramy WYBRANY KLIN WEDLUG PSI
- podajemy zakres PSI – od 0 do 360 stopni
- wychodzimy z programu poprzez MENU GLOWNE→WYJSCIE.

Rys.1.31 powstał przy pomocy programu **wykres.m**. Przedstawia przykładowe przebiegi sił aerodynamicznych w funkcji kąta obrotu wału i odpowiedź układu w stopniu regulacyjnym (największe przyjęte wymuszenia aerodynamiczne).



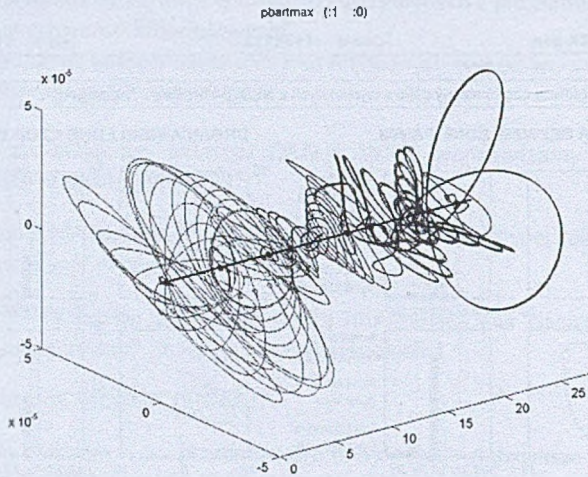
Rys. 1.15: Trajektorie przemieszczeń dynamicznych linii wirników dla przypadku bez sił aerodynamicznych

Kod karty: BAZA-gen	Obiekt: T13K215	Data: 19.01.2004
Opis defektu:		
Dane zmienna: główna część nazwy plików wynikowych z NLDW-75-LEW "pbinogen"		

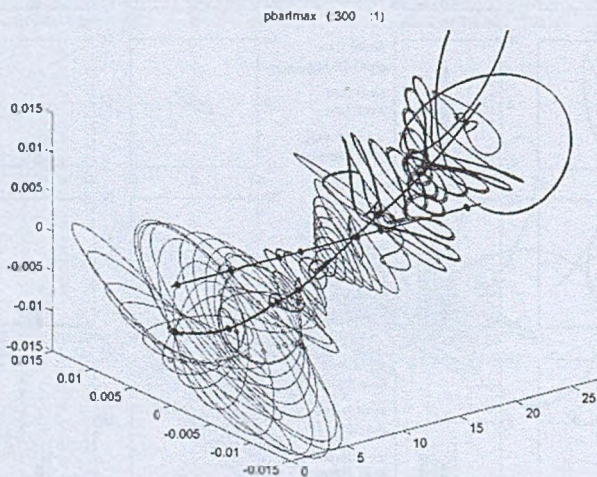


Oznaczenia: A=amplituda przemieszczeń, V=prędkość RMS, f=kat pochylecia maksymalnej przekatnej trajektorii, m=wartosc maksymalna, pp="peak to peak", x,y=osiessie pozioma i pionowa, u,v=osiessie pod katem pi/4 do x,y, wykresy widm: szary - kier. x, czarny - kier. y.

Rys. 1.16: „Przemieszczeniowa” karta diagnostyczna dla przypadku bez sił aerodynamicznych. Drgania względne obliczone w płaszczyźnie centralnej panwi łożyskowych.



Rys. 1.17: Trajektorie przemieszczeń dynamicznych linii wirników obliczone dla przypadku ekstremalnych sił aerodynamicznych. Grawitacyjne ugięcia kinetostatyczne wirnika i przemieszczenia termiczne podpór zostały pominięte.



Rys. 1.18: Kształt „gorącej” linii kinetostatycznej oraz ugięcia grawitacyjne linii wirników w zestawieniu z trajektoriami przemieszczeń dynamicznych. Skala przemieszczeń dynamicznych została 300-krotnie powiększona w stosunku do skali rysunku. ($0.015 = 300 \cdot 5e-5$)

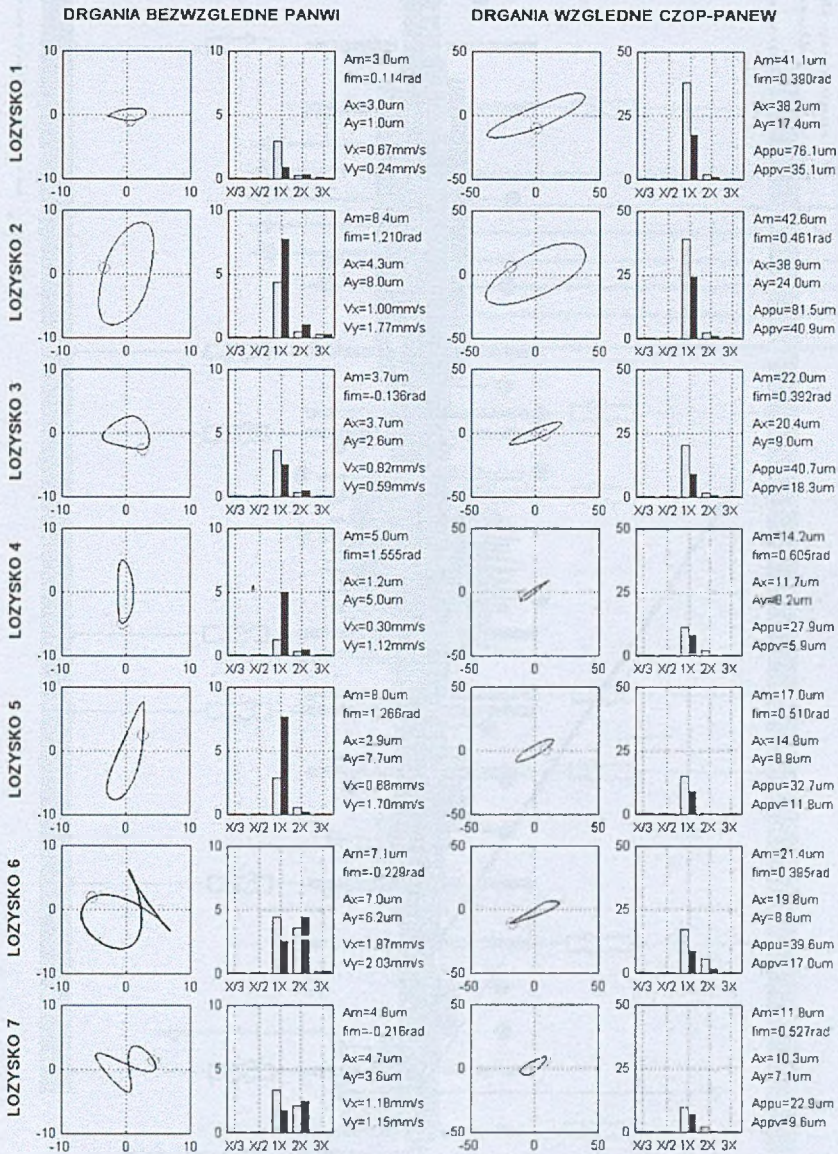
Kod karty: BAZA-gen-aerodynMAX

Objekt: 13K215

Data: 13.02.2004

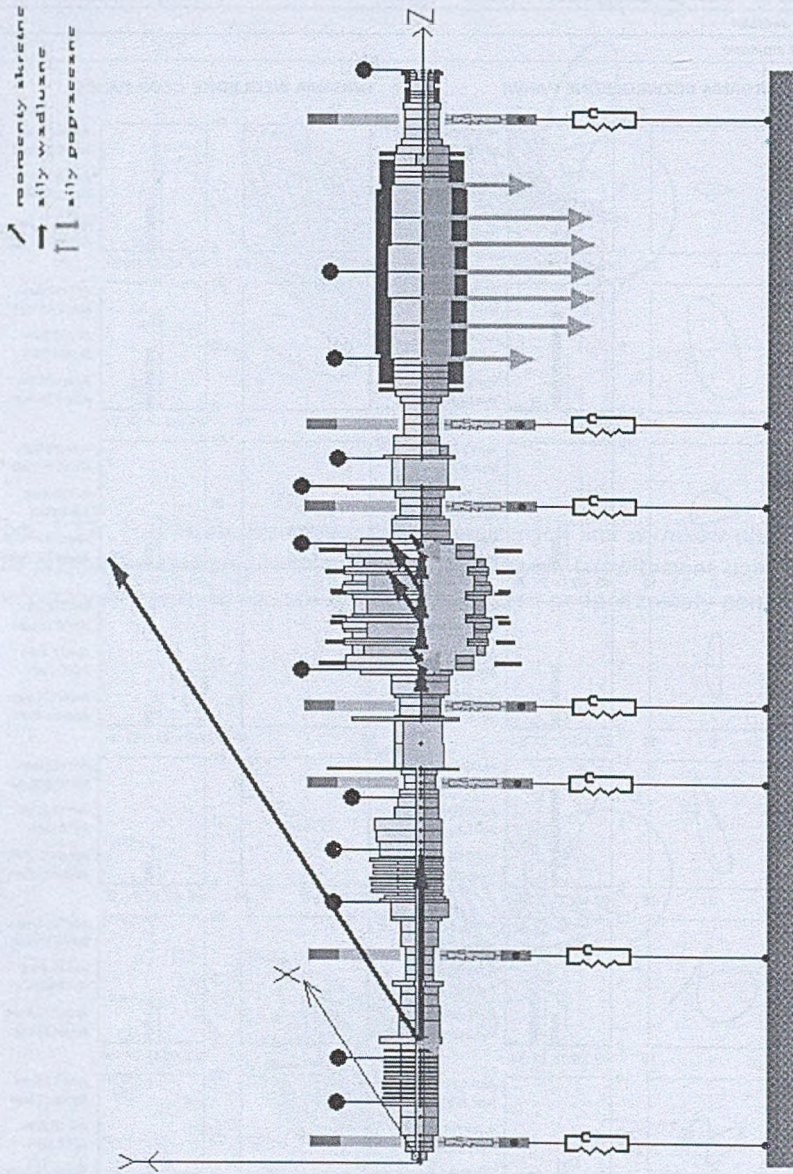
Opis defektu:

Dane zmienne:

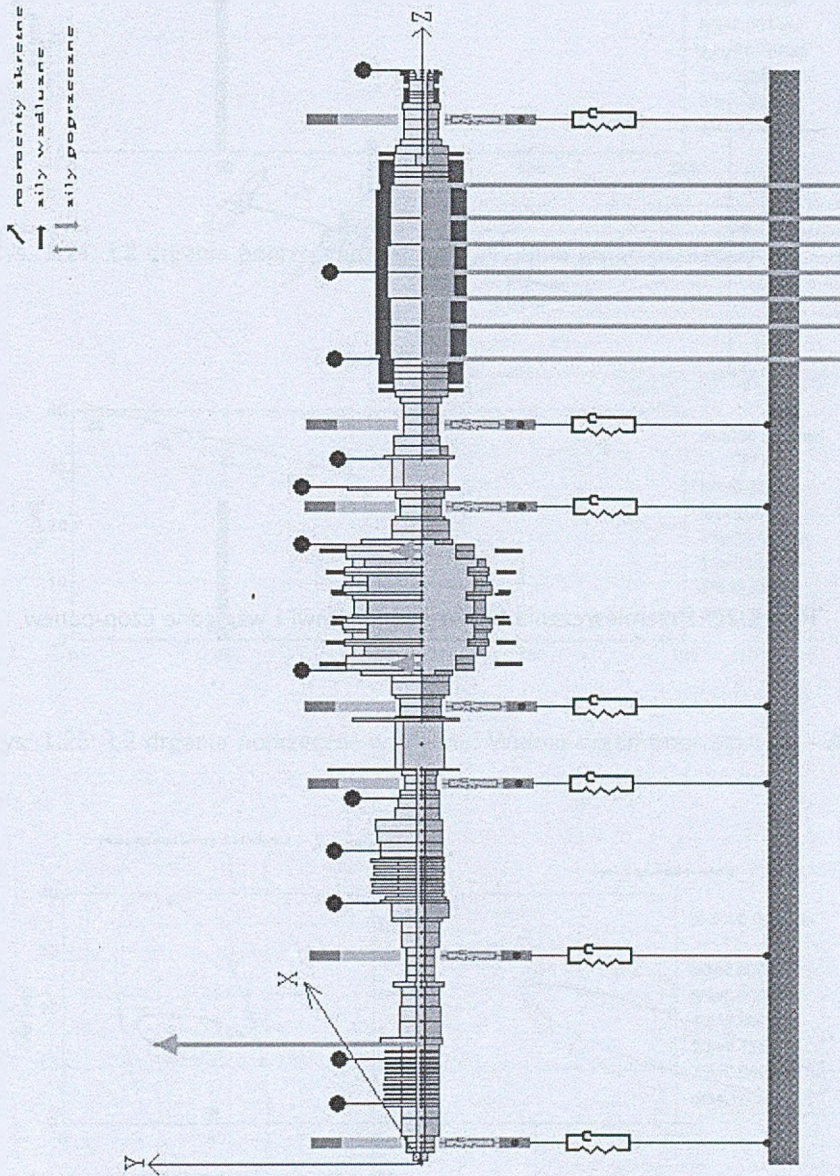


Oznaczenia: A=amplituda przemieszczeń, V=prędkość RMS, f_m=kąt pochylenia maksymalnej przekątnej trajektorii, m=wartość maksymalna, pp="peak to peak", x,y=osię pozioma i pionowa, u,v=osię pod kątem 45° do x,y, wykresy widm: szary - kier x, czarny - kier y

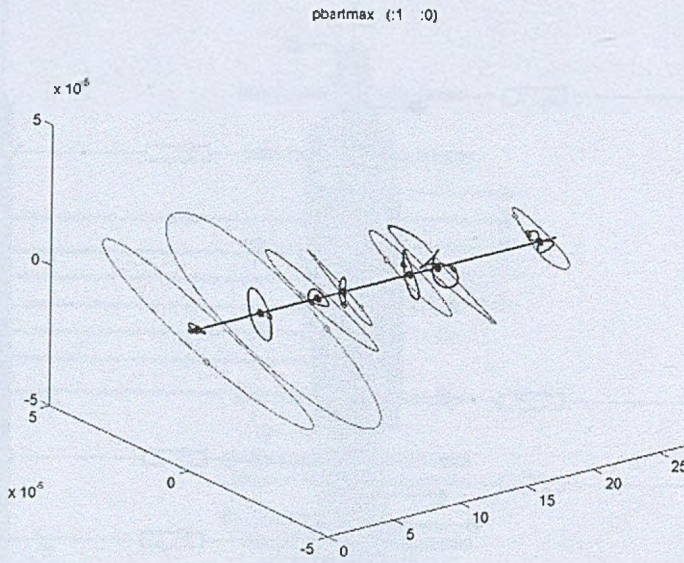
Rys. 1.19: Bazowa „przemieszczeniowa” karta diagnostyczna uwzględniająca ekstremalne wartości sił aerodynamicznych. Drgania względne obliczone zostały w płaszczyźnie centralnej panwi.



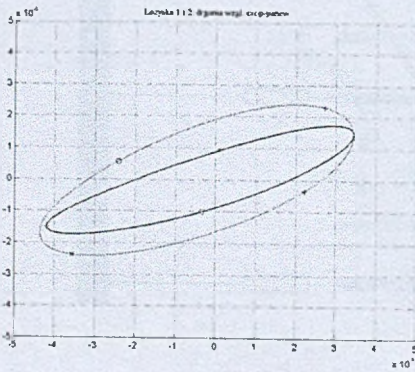
Rys. 1.20: Reprezentacja graficzna sił poprzecznych, wzdłużnych i momentów skrętnych w jednej skali.



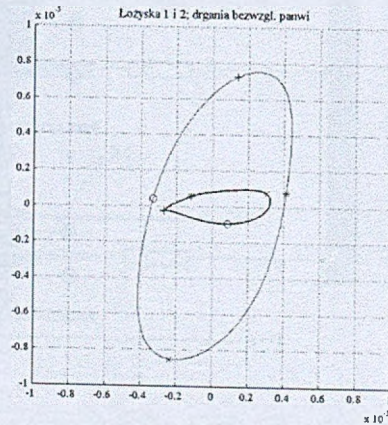
Rys. 1.21: Poprzeczne siły aerodynamiczne na tle sił naciągu magnetycznego



Rys. 1.22: Przemieszczenia bezwzględne panwi i względne czop-panew

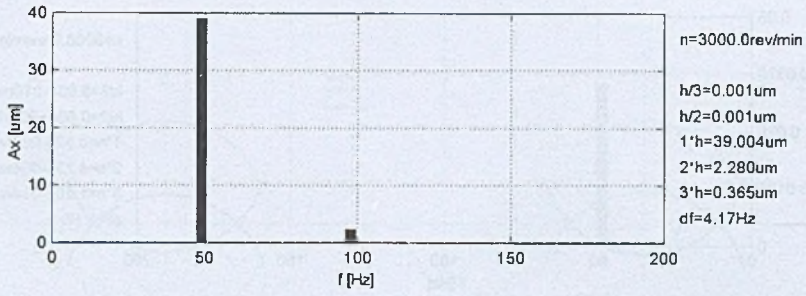


(a) wyktra6

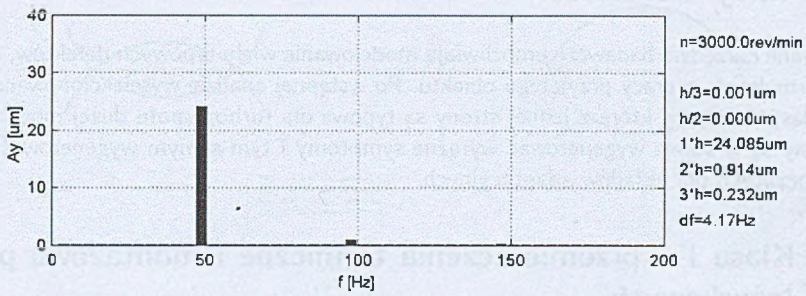


(b) wyktra4

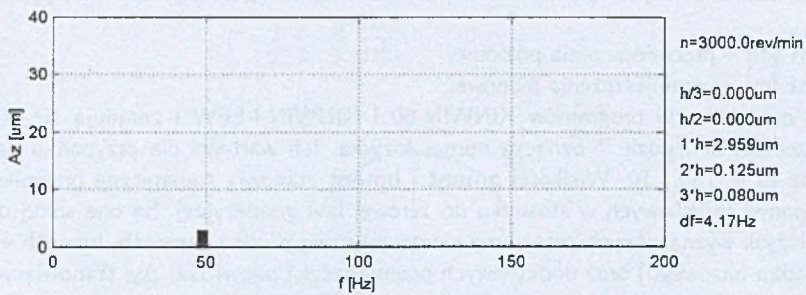
Rys. 1.23: Ilustracja działania programów



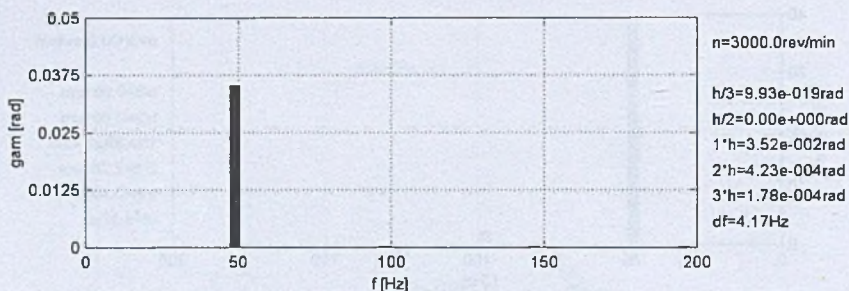
Rys. 1.24: Ł2 drgania poprzeczne względne. Widmo drgań poprzecznych - Ax



Rys. 1.25: Ł2 drgania poprzeczne względne. Widmo drgań poprzecznych - Ay



Rys. 1.26: Ł2 drgania wzdłużne. Widmo drgań wzdłużnych



Rys. 1.27: Ł2 drgania skrętne. Widmo drgań skrętnych

1.8. Klasy defektów

Opracowane narzędzia badawcze umożliwiają modelowanie wielu typowych defektów, czyli stanów anormalnych w pracy przyjętego obiektu. Po wstępnej analizie wyselekcjonowane zostały cztery klasy defektów, które z jednej strony są typowe dla turbozespołu dużej mocy, a z drugiej strony są w stanie wygenerować wyraźne symptomy i tym samym wygenerować zestawy danych uczących dla układów adaptacyjnych.

1.8.1. Klasa I – przemieszczenia termiczne i montażowe podpór łożyskowych

Przeprowadzone zostały badania wpływu maksymalnych przemieszczeń pionowych i poziomych wszystkich siedmiu podpór a także wybranych kombinacji jednoczesnych przemieszczeń podpór uznanych za najbardziej newralgiczne pod względem dynamicznym, czyli podpór nr 5 i 6. Na Rys.1.32 przedstawiono w poglądowy sposób schemat przemieszczeń i zastosowane oznaczenia.

Przemieszczenia łożysk w stosunku do tzw. zerowej linii geodezyjnej określają dwa parametry:

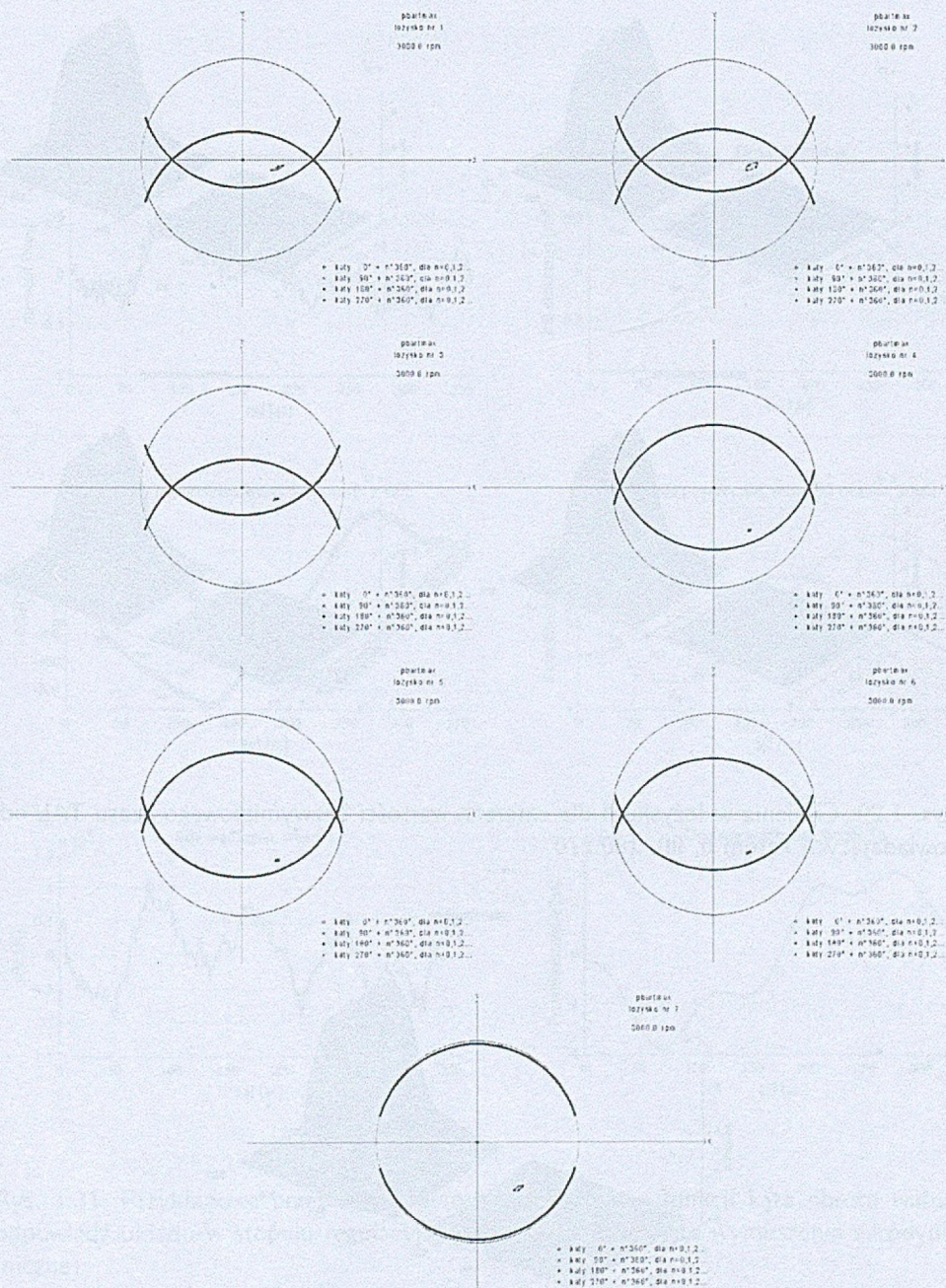
amont [m] – przemieszczenia poziome,

bmont [m] – przemieszczenia pionowe.

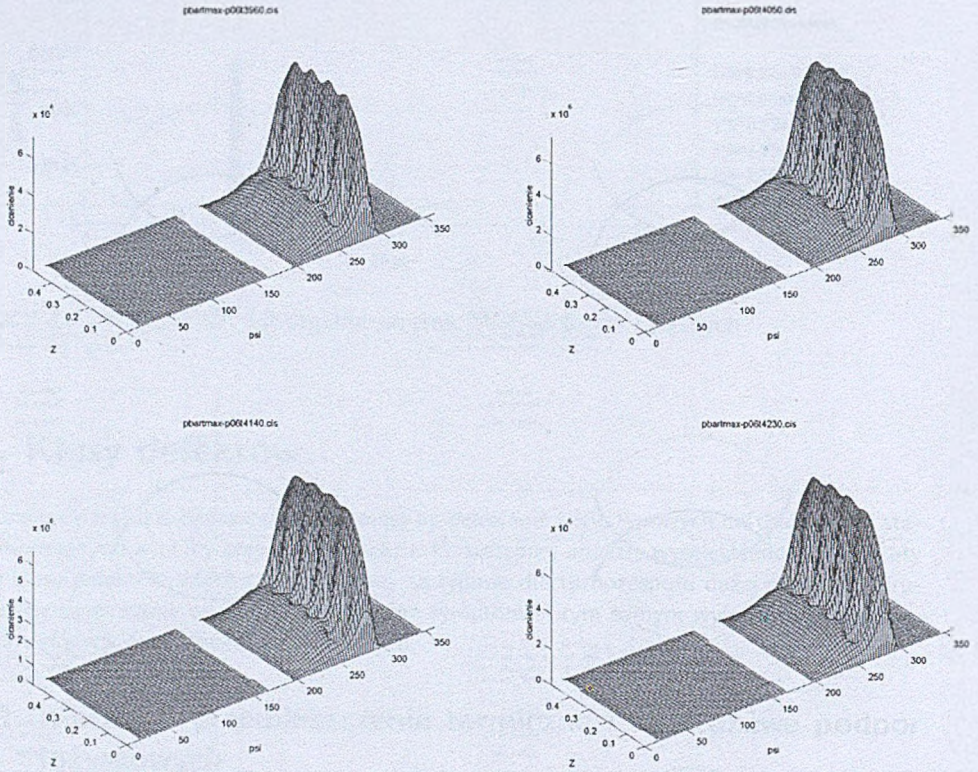
Stanowią one dane do programów KINWIN-60 i KINWIN-I-LEW i znajdują się w plikach z rozszerzeniem .il*, gdzie * oznacza numer łożyska. Ich wartości dla przypadku bazowego zestawione są w Tab.1.10. Wielkości **amont** i **bmont** stanowią sumaryczne przemieszczenia środków panwi łożyskowych w stosunku do zerowej linii geodezyjnej. Są one sumą odchyłeń środków łożysk wyznaczonych przez linię kinetostatyczną wirnika (**amontb**, **bmontb** – danych dla przypadku bazowego) oraz dodatkowych przemieszczeń panwi Δx , Δy , stanowiących założony defekt.

Ogólnym kryterium określenia maksymalnych, akceptowalnych przemieszczeń podpór jest jednoczesne spełnienie wszystkich trzech następujących warunków dla wszystkich siedmiu łożysk turbozespołu:

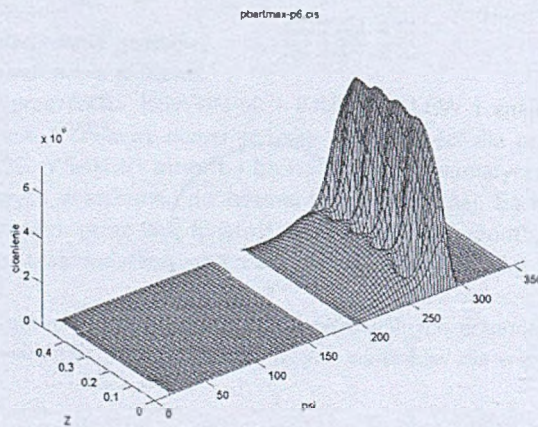
- dla drgań względnych czop - panew: amplitudy przemieszczeń p-p, w kierunkach odchyleń o 45 stopni od pionu, $s < s_{gr}$ [μm],
- dla drgań bezwzględnych łożysk: prędkości drgań średnie kwadratowe, w kierunku poziomym i pionowym, $v_{RMS} < v_{RMSgr}$ [mm/s].



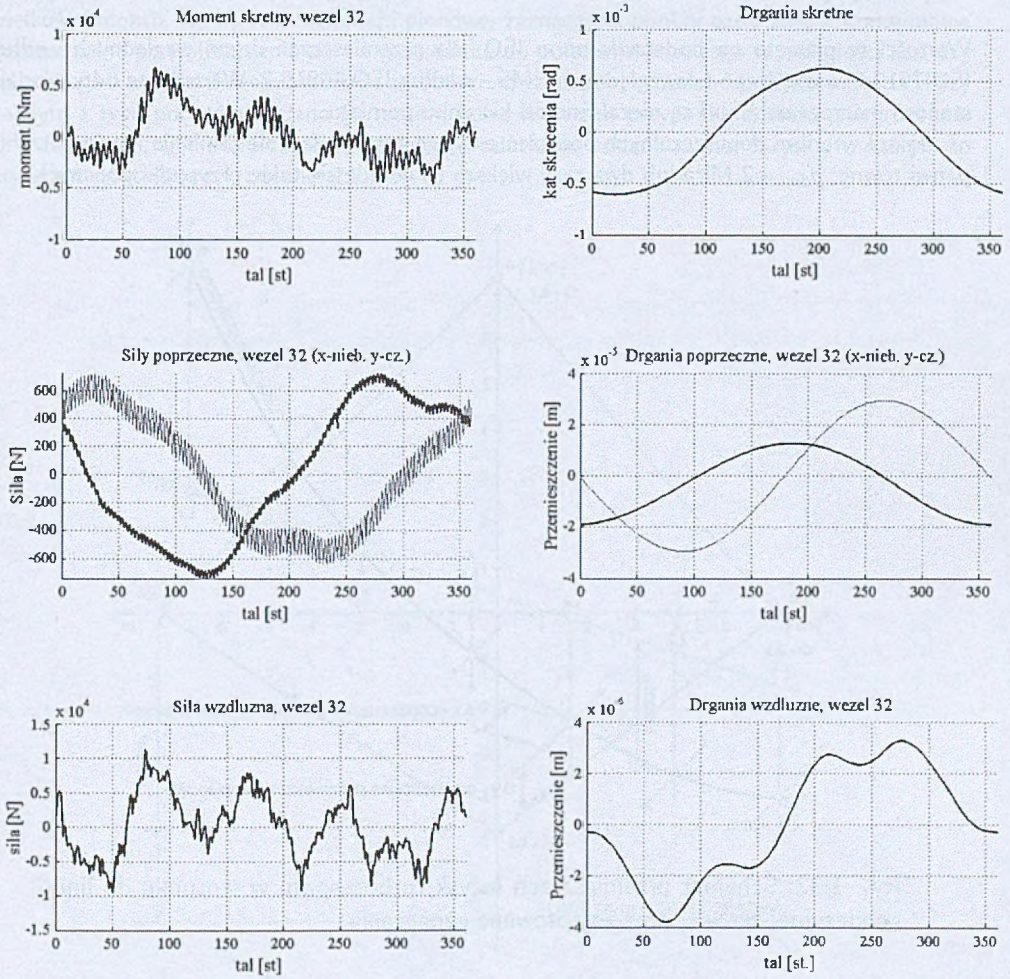
Rys. 1.28: Trajektorie względne w płaszczyźnie luzów łożyskowych



Rys. 1.29: Ciśnienia w łożysku 6 dla czterech wartości bezwymiarowego czasu TAL odpowiadających kątom 0, 90, 180, 270



Rys. 1.30: Ciśnienie w łożysku 6 (wizualizacja wyników z programu KINWIN-I-LEW)



Rys. 1.31: Przykładowe przebiegi sił aerodynamicznych w funkcji kąta obrotu wału i odpowiedź układu w stopniu regulacyjnym (największe przyjęte wymuszenia aerodynamiczne)

- obciążenia łożysk obliczane na podstawie średniego ciśnienia na powierzchni panwi $p < p_{dop}$.

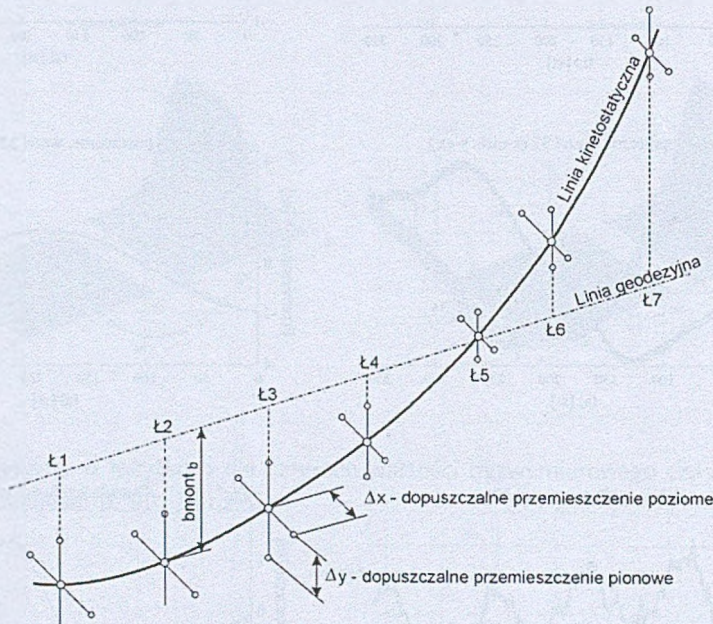
Dla ilościowej oceny drgań łożysk turbozespołu przyjęte zostaną następujące wielkości graniczne:

$$s_{xgr} = s_{ygr} = 165 \mu\text{m},$$

$$v_{RMSxgr} = v_{RMSygr} = 7,5 \text{ mm/s}.$$

Wartości te przyjęto na podstawie norm ISO: dla przemieszczeń drgań względnych według ISO 7919-2, a dla drgań bezwzględnych RMS - według ISO 10816-2. Wartości te odpowiadają stanowi ostrzegawczemu i są niezależne od kierunku pomiaru.

Jako kryterium dopuszczalnych obciążeń przyjęte zostaną średnie ciśnienia na powierzchni panwi równe: $p_{dop} = 2 \text{ MPa}$ lub dwa razy większe (o ile uda się takie przypadki policzyć).



Rys. 1.32: Schemat przemieszczeń łożysk turbozespołu w stosunku do linii geodezyjnej zerowej oraz zastosowane oznaczenia

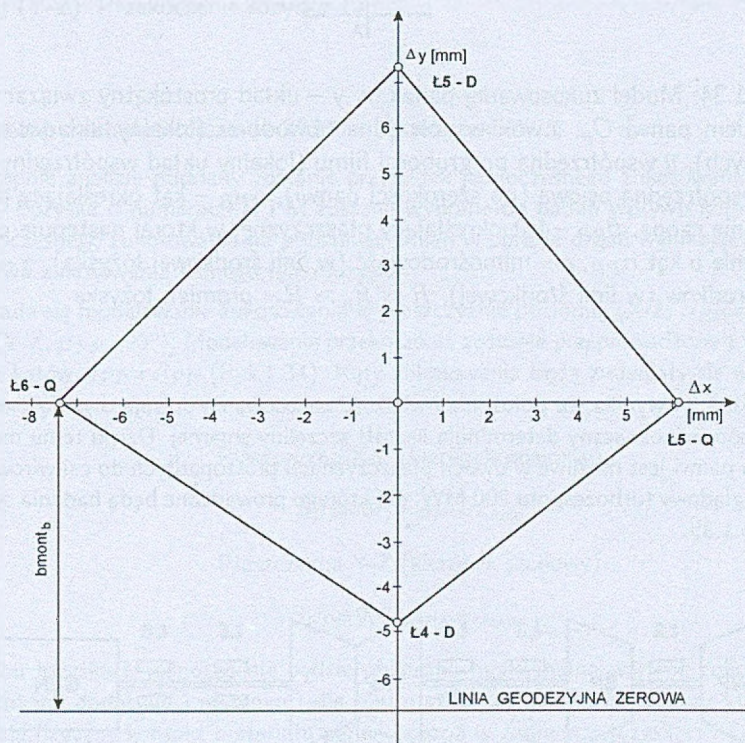
Do modelowania tego defektu wybrane zostały następujące przypadki:

1. maksymalne akceptowalne przemieszczenie (wg kryteriów zdefiniowanych powyżej) każdego łożyska w pionie w dół i w górę, w poziomie w prawo i w lewo w stosunku do położenia bazowego, przy braku przemieszczeń pozostałych 6. łożysk;
otrzymujemy $7 \cdot 4 = 28$ związków defekt symptom,
2. maksymalne akceptowalne przemieszczenie łożyska nr 5 w czterech kierunkach: w dół, w górę, w prawo i w lewo, przy jednoczesnym przemieszczeniu łożyska nr 6 w 4. kierunkach o jedną określoną wartość;
otrzymujemy $4 \cdot 4 = 16$ związków defekt symptom,

3. maksymalne akceptowalne przemieszczenie łożyska nr 6 w czterech kierunkach: w dół, w górę, w prawo i w lewo, przy jednoczesnym przemieszczeniu łożyska nr 5 w 4. kierunkach o jedną określoną wartość;

otrzymujemy $4 \cdot 4 = 16$ związków defekt symptom.

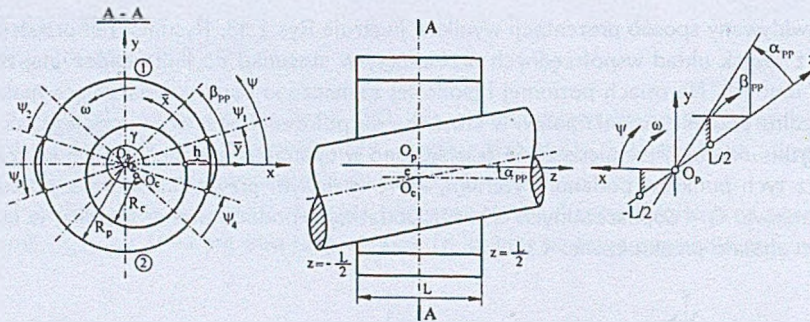
Przewidywany sposób prezentacji wyników ilustruje Rys.1.33. Rysunek ten przedstawia dla jednego z łożysk układ współrzędnych przesunięty w stosunku do linii geodezyjnej zerowej o wielkość b_{montB} . Na osiach poziomej i pionowej zaznaczono punkty oznaczające maksymalne dopuszczalne przemieszczenia panwi w stosunku do położenia bazowego w odległości Δx , Δy od początku układu. Przemieszczenia te obliczono w oparciu o podane powyżej kryteria. Przy każdym z tych punktów podano kryterium, które w danym przypadku zostało przekroczone: D – drganiowe, Q – dopuszczalnych ciśnień. Dodatkowo podano numer łożyska, w którym to kryterium zostało przekroczone: Ł1...Ł7.



Rys. 1.33: Sposób prezentacji wyników dopuszczalnych przemieszczeń panwi na przykładzie Ł6. Δx , Δy – przemieszczenia w stosunku do położenia bazowego, b_{montB} – przemieszczenie bazowe w stosunku do linii geodezyjnej, Ł1,...,Ł7 – numer łożyska, w którym przekroczone zostały wartości dopuszczalne: D – ze względu na drgania Q – ze względu na obciążenia

1.8.2. Klasa II – przekoszenia panwi

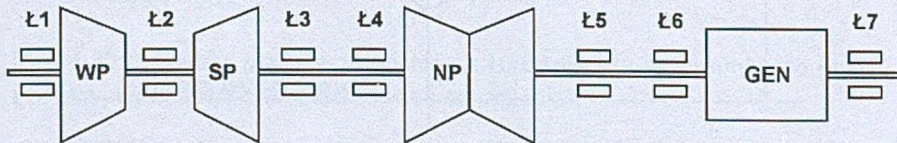
Defekt typu zukosowanie panwi polega na przekoszeniu osi panwi w stosunku do osi wału oraz, co za tym idzie, zmianę geometrii szczeliny smarnej łożyska. Sytuację taką ilustruje Rys.1.34.



Rys. 1.34: Model zukosowanej panwi. x, y – układ prostokątny związany ze środkiem panwi O_p , \bar{x} – współrzędna obwodowa (lokalny układ współrzędnych), \bar{y} współrzędna po grubości filmu (lokalny układ współrzędnych), z – współrzędna osiowa (po szerokości panwi), α_{PP} – kąt określający przekoszenie czopa, β_{PP} – kąt określający płaszczyznę, w której następuje przekoszenie o kąt α_{PP} , e – mimośrodek (w linii środkowej łożyska), γ – kąt linii środków (w linii środkowej), $R \approx R_p \approx R_c$ – promień łożyska

Z rysunku 1.34 wynika, że położenie i wielkość zukosowania opisują dwa kąty α_{PP} i β_{PP} , które w sposób jednoznaczny determinują kształt szczeliny smarnej. Dzięki temu modelowanie zukosowania panwi jest możliwe w dwóch płaszczyznach prostopadłych do osi wirowania wału.

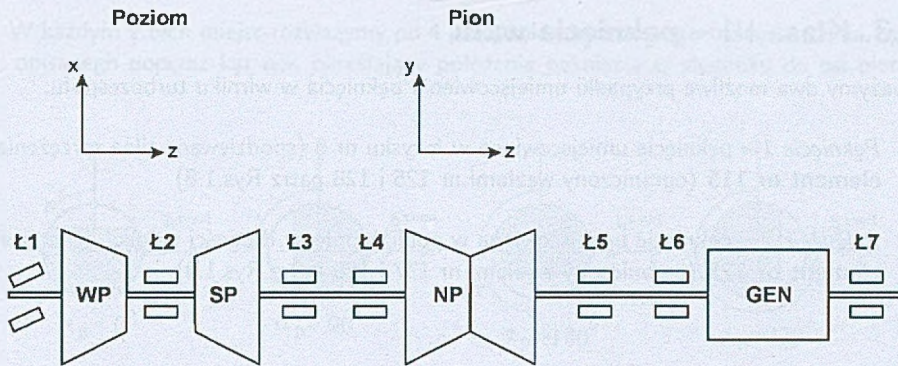
Szkic poglądowy turboszespołu 200 MW, dla którego prowadzone będą badania symulacyjne ilustruje Rys.1.35.



Rys. 1.35: Szkic poglądowy turboszespołu 200 MW – przypadek bazowy.

Do modelowania tego defektu zostały wybrane następujące przypadki:

1. Defekt w postaci zukosowania w płaszczyźnie poziomej ($X-Z$, $\beta_{PP}=0^\circ$) i pionowej ($Y-Z$, $\beta_{PP}=90^\circ$) dla każdego z siedmiu łożysk. Dla każdego łożyska obliczana będzie maksymalna wartość zukosowania w obu kierunkach dodatnim i ujemnym (kąt α_{PP}) w płaszczyźnie poziomej i pionowej, przy której nie następuje fizyczny kontakt materiału panwi i czopa (grubość filmu smarnego osiąga wartość minimalną równą $5 \mu\text{m}$).



Rys. 1.36: Schemat przekoszenia panwi w płaszczyźnie poziomej (X-Z) i pionowej (Y-Z). Przekoszenie łożyska 1.

Ten etap zakłada obliczenie $2 \cdot 2 \cdot 7 = 28$ przypadków.

- Następnie analizie poddany zostanie przypadek jednoczesnego zukosowania dwóch łożysk. Łożyska o numerach N i M zostaną wybrane do badań wpływu kombinowanego jednoczesnego zukosowania na podstawie zmian w obrazie drgań wynikających z badań wpływu zukosowania jednego tylko łożyska.

Zakłada się modelowanie zukosowania w płaszczyźnie poziomej (X-Z, $\beta_{PP} = 0^\circ$) i pionowej (Y-Z, $\beta_{PP} = 90^\circ$). Modelowanie przekoszenia zostanie przeprowadzone z wykorzystaniem kątów α_{PP} i β_{PP} (Rys.1.34). Kąty zukosowania będą zmieniały się wg poniższej zależności:

Płaszczyzna X-Z (kierunek poziomy)

$$\beta_{PP} = 0^\circ, \alpha_{PP} = \alpha_{max}$$

Płaszczyzna Y-Z (kierunek pionowy)

$$\beta_{PP} = 90^\circ, \alpha_{PP} = \alpha_{max}$$

W obu łożyskach jednocześnie będzie obliczana maksymalna wartość zukosowania (w kierunkach dodatnim i ujemnym) dla obu płaszczyzn zukosowania, przy której nie następuje fizyczny kontakt materiału panwi i czopa w żadnym z łożysk.

Obliczenia układu wirnik-łożyska dla dwu panwi zukosowanych jednocześnie będą przeprowadzone następująco:

- jednoczesne ukosowanie obu łożysk: nr N i M w płaszczyźnie poziomej
- jednoczesne ukosowanie obu łożysk: nr N i M w płaszczyźnie pionowej
- jednoczesne ukosowanie obu łożysk: nr N w płaszczyźnie poziomej i nr M w płaszczyźnie pionowej
- jednoczesne ukosowanie obu łożysk: nr N w płaszczyźnie pionowej i nr M w płaszczyźnie poziomej

Ten etap zakłada obliczenie $4 \cdot 4 = 16$ przypadków.

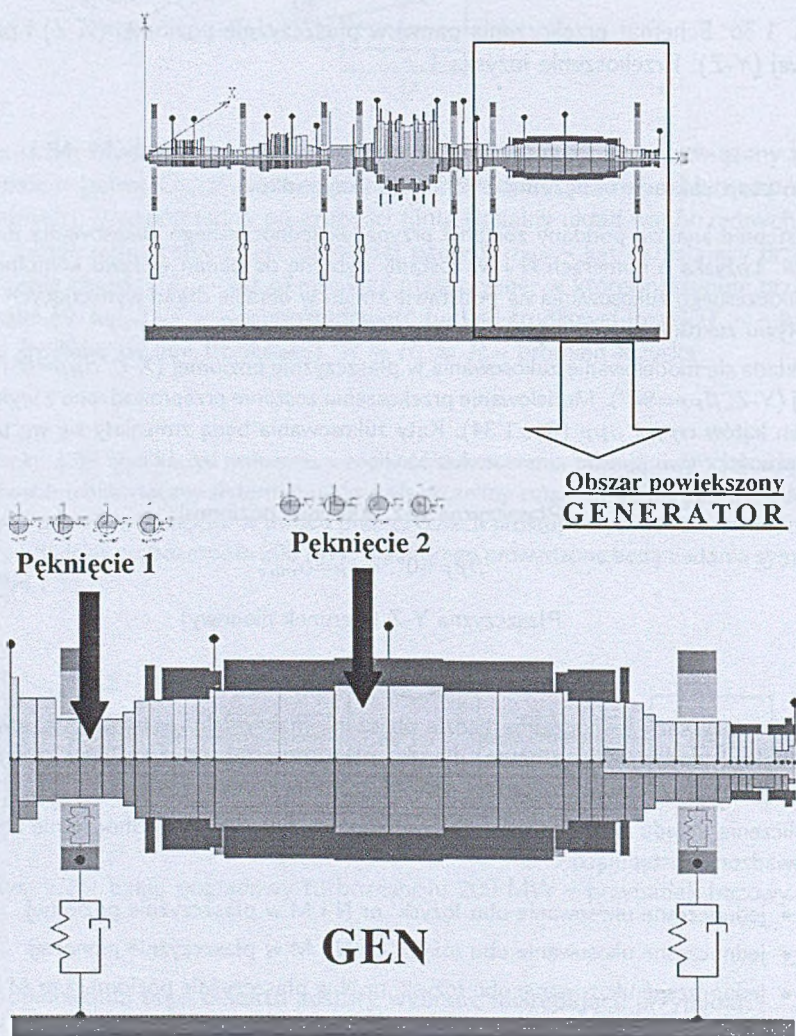
Oba etapy wymagają obliczenia $28 + 16 = 44$

1.8.3. Klasa III – pęknięcia wału

Rozważmy dwa możliwe przypadki umiejscowienia pęknięcia w wirniku turbozespołu:

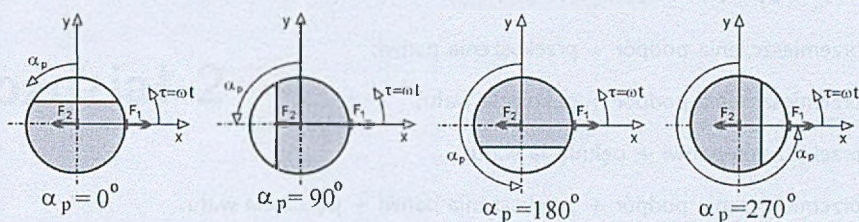
Pęknięcie 1 – pęknięcie umiejscowione w łożysku nr 6 (spodziewane silne sprężenia) – element nr 115 (ograniczony węzłami nr 125 i 128 patrz Rys.1.8)

Pęknięcie 2 – pęknięcie umiejscowione w pobliżu połowy długości wirnika generatora – element nr 125 (ograniczony węzłami nr 137 i 138 patrz Rys.1.8)



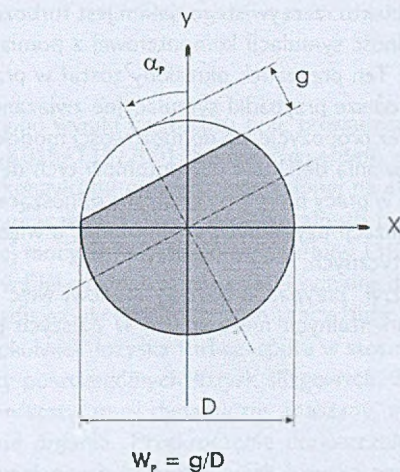
Rys. 1.37: Umiejscowienie rozważanych przypadków pęknięć w wirniku turbozespołu.

W każdym z tych miejsc rozważymy po 4 przypadki **obwodowego** umiejscowienia pęknięcia, opisanego poprzez kąt α_p , określający położenie pęknięcia w stosunku do osi pionowej y .



Rys. 1.38: Obwodowe umiejscowienie pęknięcia.

Głębokość pęknięcia jest określona przez współczynnik pęknięcia, zwany również względną głębokością pęknięcia W_p , rozumianą jako stosunek względnej głębokości pęknięcia do średnicy wału



Rys. 1.39: Współczynnik pęknięcia.

Obliczenia będą prowadzone dla maksymalnego współczynnika pęknięcia W_p dla danego α_p . Za *maksymalny* współczynnik pęknięcia uznany zostanie największy ze współczynników, dla których możemy przeprowadzić obliczenia programem NLDW.

Obliczenia będą prowadzone osobno dla przypadku *Pęknięcie 1* i *Pęknięcie 2*. Nie będzie zatem przypadku, w którym obydwa pęknięcia wystąpią jednocześnie.

W wyniku prac dla każdego pęknięcia otrzymamy po 4 wartości W_{pmax} odpowiednio dla każdego α_p , co w efekcie oznacza 8 przypadków „granicznych”. „Najciekawszy” przypadek zostanie opisany bardziej szczegółowo. Celem prześledzenia stanów maszyny przy propagacji pęknięcia zostaną podane wyniki obliczeń dla różnych W_p z zakresu od 0 do W_{pmax} .

1.8.4. Klasa IV – klasy sprzężone

Zakłada się kombinacje trzech wcześniej wymienionych defektów i ich sprzężonego oddziaływania. Wynikają stąd cztery nowe przypadki, a mianowicie:

- przemieszczenia podpór + przekoszenia panwi;
- przemieszczenia podpór + pęknięcia wału;
- przekoszenia panwi + pęknięcia wału;
- przemieszczenia podpór + przekoszenia panwi + pęknięcia wału.

1.9. Uwagi końcowe

Niniejsze opracowanie stanowi podsumowanie prac prowadzonych w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN odnoszących się do adaptacji i przystosowania istniejących narzędzi badawczych w postaci programów komputerowych oraz do budowy nowych narzędzi w znacznie większym stopniu adekwatnych do rzeczywistości.

Przeprowadzona została obszerna procedura strojenia tak opracowanego modelu i narzędzi badawczych do wybranego obiektu rzeczywistego, jakim jest turbosespół dużej mocy. W efekcie uzyskano zadawalającą zgodność symulacji komputerowej z pomiarami eksploatacyjnymi (porównaj Rys.1.13 i Rys.1.14). Ten przypadek określony został w pracy jako *przypadek bazowy*, do którego będą odnoszone dalsze przypadki symulacyjne związane z badaniem defektów.

W pracy przedstawiono też propozycje, co do możliwości modelowania stanów anormalnych w pracy obiektu tzn. modelowania defektów i symptomów tych defektów.

Wszystkie przedstawione w pracy programy graficzne odnoszące się do przypadku bazowego będą mogły służyć do wizualizacji uzyskanych symptomów, a więc będą mogły być użyteczne przy budowie relacji diagnostycznych.

Przedstawiony w pracy tzw. *przypadek bazowy* stanowi więc pełną dokumentację narzędzi teoretycznych i eksperymentalnych niezbędnych w dalszych pracach związanych z PBZ K015\T10\2001.

Bibliografia

- [1.1] W. Cholewa, J. Kiciński. *Diagnostyka techniczna. Metody odwracania nieliniowych modeli obiektów*. Politechnika Śląska, Gliwice, 2001.
- [1.2] J. Kiciński, A. Markiewicz-Kicińska. NLDW-LEW-75. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 3857/03, 2003.
- [1.3] J. Kiciński, A. Markiewicz-Kicińska. Programy NLDW-75 do obliczeń sprzężonych form drgań gietno-wzdłużno-skrętnych z imperfekcjami typu pęknięcia wału i rozosiowania elementów oraz z zewnętrznymi obciążeniami w formie dodatkowych (poza niewyważeniami) sił poprzecznych, wzdłużnych i momentów skrętnych. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 3094/03, 2003.
- [1.4] J. Kiciński, A. Prońska. Identyfikacja modelu obliczeniowego turbosespołu 13K215. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 4068/2004, 2004.

Rozdział 2

Przemieszczenia termiczne i montażowe podpór łożyskowych

Józef Rybczyński

2.1. Wstęp

W rozdziale tym przedstawiono wyniki fragmentu prac prowadzonych w IMP PAN w ramach Projektu Badawczego PBZ-K015/T10/2001. Są one elementem większej całości, realizowanej we współpracy z innymi wykonawcami projektu, podzielonej na etapy i zadania.

Zadanie polegało na wyznaczeniu zakresu dopuszczalnych przemieszczeń łożysk turbozespołu przemysłowego wielkiej mocy, składającego się z turbiny 13K215 i generatora TWW-230-2L, pracującego jako blok 7 w Elektrowni Kozienice. Maksymalne dopuszczalne przemieszczenia łożysk wyznaczono ze względu na akceptowalny stan pracy turbozespołu jako całości.

Przemieszczenie któregośkolwiek łożyska turbozespołu w stosunku do jego położenia bazowego zmienia warunki pracy poszczególnych łożysk ślizgowych, a tym samym warunki pracy całej maszyny. Zmienia stan statyczny i dynamiczny maszyny, a w szczególności obciążenie wszystkich łożysk i generuje drgania. Przekroczenie dopuszczalnych obciążeń łożysk, bądź drgań względnych lub bezwzględnych któregośkolwiek łożyska powoduje, że turbozespół jako całość nie może być eksploatowany. Zatem takie przemieszczenie któregoś z łożysk, które to przekroczenie powoduje, jest niedopuszczalne.

Poniżej opisano w skrócie metodykę badań, która została zastosowana w celu określenia obszarów akceptacji przemieszczeń łożysk, oraz wyniki tych badań. Cel pracy, zastosowane narzędzia badawcze (użyte oprogramowanie), oraz model obliczeniowy turbozespołu, będącego przedmiotem analizy, a także zamierzony sposób prezentacji wyników zostały opisane w odrębnych opracowaniach. Tutaj zostaną przedstawione w skrócie, w zakresie umożliwiającym analizę prezentowanych wyników.

2.2. Przypadek bazowy

Punktem wyjścia dla obliczeń i późniejszych analiz wyników jest *przypadek bazowy*, utworzony dla turbozespołu 13K215/28 blok 7 w Elektrowni Kozienice.

Przypadek bazowy stanowi zbiór danych podstawowych do obliczeń turbozespołu tak dobranych, aby otrzymane w wyniku obliczeń własności maszyny były możliwie najlepiej zgodne z pomierzonymi własnościami rzeczywistego obiektu, w tym wypadku bloku 7 w Elektrowni Kozienice. Wygenerowany został dyskretny model fizyczny i odpowiadający mu model numeryczny turbozespołu dostosowany do obliczeń własności mechanicznych metodą elementów skończonych. W praktyce przez "przypadek bazowy" należy rozumieć zestaw plików zawierających dane do programów KINWIN-60, KINWIN-I-LEW i NLDW-75-LEW, a także zestaw danych do programów pomocniczych.

Przypadek bazowy został utworzony w oparciu o wyniki pomiarów w Elektrowni Kozienice, dokonane przez elementy systemu diagnostycznego DT200 w różnych warunkach pracy, to znaczy w różnych warunkach ruchu i obciążenia. Wyniki pomiarów turbozespołu przedstawione zostały w postaci tzw. kart diagnostycznych, zawierających, w sformalizowanej formie, wyniki pomiarów parametrów drganiowych turbozespołu. Są one przedmiotem opracowania [2.1]. Karty diagnostyczne zawierają wykresy trajektorii czopów łożyskowych wszystkich łożysk oraz wykresy widmowe drgań czopów łożyskowych, a także hodografy ruchów bezwzględnych panwi łożyskowych wszystkich łożysk oraz ich wykresy widmowe.

Ostateczną wersję przypadku bazowego utworzono bazując na parametrach pracy turbozespołu zarejestrowanych przez system diagnostyczny DT200 w dniu 12.04.2000 r.

Odpowiada mu praca turbozespołu w stanie ustalonym, przy prędkości obrotowej nominalnej 3000 obr./min., przy mocy czynnej 211.25 MW, mocy biernej 73.75 MW i współczynniku mocy $\cos\varphi = 0.94$. Pomierzony stan dynamiczny turbozespołu dla tego przypadku został przedstawiony na karcie diagnostycznej nr K7G012 prezentowanej na Rys. 2.1.. Rys. 2.2 przedstawia analogiczną kartę diagnostyczną dla przypadku bazowego obliczoną zestawem programów do obliczeń dynamiki wirników. Powstał on w wyniku dostrajania modelu obliczeniowego do doświadczalnej karty diagnostycznej. Sposób tworzenia przypadku bazowego oraz opis danych dla przypadku bazowego jest przedmiotem opracowania wewnętrznego [2.9], [2.20].

2.3. Narzędzia badawcze

Obliczenia przeprowadzone zostały za pomocą zestawu programów komputerowych z serii MESWIR, oraz programów pomocniczych dla obróbki wyników obliczeń:

- KINWIN-60 - do obliczeń kinetostatyki wirnika podpartego w łożyskach ślizgowych, przy założeniu diatermicznego modelu filmu olejowego łożysk. Ich wynikiem są m.in. średnie temperatury filmu olejowego stanowiące dane do programu KINWIN-I-LEW.
- KINWIN-I-LEW - do obliczeń kinetostatyki wirnika przy założeniu izotermicznego modelu filmu olejowego łożysk, z uwzględnieniem kieszeni lewarowych na powierzchni panwi. Ich wynikiem są m.in. reakcje łożyskowe, stanowiące dane do programu NLDW-75-LEW.
- NLDW-75-LEW - do obliczeń dynamiki wirnika. Ich wynikiem są m.in. ruchy poszczególnych węzłów układu wirnik – łożyska, stanowiących dane do tworzenia kart diagnostycznych.

W każdym przypadku obliczeń uruchamiane były 3 powyższe programy sekwencyjnie, w kolejności podanej powyżej. Niektóre wyniki z programu poprzedzającego były danymi do programu następnego w kolejności. Szczegóły odnośnie przekazywanych danych i struktury wyników zawarte są w opracowaniu wewnętrznym [2.9].

Ze względu na bardzo dużą ilość obliczeń i związaną z tym potrzebę przygotowania dużej ilości plików danych i przetwarzania dużej ilości plików wynikowych, konieczne było zautomatyzowanie procesu obliczeniowego. Ze względów praktycznych do sterowania obliczeniami i

zarządzania plikami użyto programu MATLAB. Utworzony został zestaw skryptów napisanych w MATLABie, sterujących poszczególnymi fazami obliczeń [2.15], [2.16], [2.14]. Dokonują one odpowiedniej do obliczanego przypadku wymiany danych między plikami danych i plikami wynikowymi poszczególnych programów, oraz prowadzą iteracyjny proces obliczeniowy dla uzyskania zbieżności przemieszczeń łożysk do przemieszczeń granicznych ze względu na założone kryterium przemieszczeń dopuszczalnych. W tym celu dokonują obliczeń amplitud przemieszczeń drgań względnych i prędkości drgań bezwzględnych odpowiednich węzłów oraz obliczają reakcje łożyskowe w poszczególnych łożyskach w odpowiednich kierunkach.

2.4. Metodyka badań

Zadanie polegało na określeniu dopuszczalnych przemieszczeń poszczególnych łożysk turbozespołu ze względu na określone kryteria, które kwalifikują pracę turbozespołu jako dopuszczalną. Kryteria te sformułowano w dalszej części opracowania. Zadanie realizowano przemieszczając określone łożysko w stosunku do jego położenia wyjściowego, określonego w przypadku bazowym. Skutkowało to zmianą stanu dynamicznego turbozespołu w stosunku do stanu obliczonego dla przypadku bazowego i przedstawionego na karcie diagnostycznej na Rys.2.2.

W programach, za pomocą których prowadzono obliczenia, położenie poszczególnych łożysk jest określone przez ich przemieszczenie w stosunku do linii geodezyjnej. Jest ono zadawane w plikach danych łożyskowych do programów KINWIN-60 i KINWIN-I-LEW w postaci dwóch parametrów:

- *amont* - poziomego przemieszczenia łożyska w stosunku do linii geodezyjnej,
- *bmont* - pionowego przemieszczenia łożyska w stosunku do linii geodezyjnej.

Wielkości te są zadawane w plikach *.ipn do programu KINWIN-60 oraz w plikach *.lIn do programu KINWIN-I-LEW, gdzie *n* oznacza numer łożyska.

W przypadku bazowym przemieszczenia te wynikają z przyjętej linii kinetostatycznej wirników i tutaj są oznaczane jako *amontb* i *bmontb*. Dodatkowe przemieszczenia łożysk, stanowiące "defekty" maszyny są dodawane do wartości *amontb* i *bmontb*. Dla przypadku bazowego położenia łożysk są określone przez wartości:

- łożysko nr 1: *amontb* = 0 *bmontb* = -5.98 mm
- łożysko nr 2: *amontb* = 0 *bmontb* = -7.37 mm
- łożysko nr 3: *amontb* = 0 *bmontb* = -5.56 mm
- łożysko nr 4: *amontb* = 0 *bmontb* = -4.57 mm
- łożysko nr 5: *amontb* = 0 *bmontb* = 0.19 mm
- łożysko nr 6: *amontb* = 0 *bmontb* = 2.10 mm
- łożysko nr 7: *amontb* = 0 *bmontb* = 10.8 mm

Na Rys.2.3 przedstawiono schemat analizowanego turbozespołu, pokazujący m.in. rozmieszczenie łożysk i jego orientację w układzie współrzędnych. Taki układ współrzędnych jest przyjęty w IMP i był konsekwentnie stosowany podczas analiz. Rys.2.4 przedstawia schematyczny kształt linii wirników oraz ideę analizy przemieszczeń poszczególnych łożysk w stosunku do linii kinetostatycznej.

Poszczególne łożyska mogą być przemieszczane w kierunku poziomym o wielkość Δx i w kierunku pionowym o wielkość Δy . W przypadku obliczeń turbozespołu z defektami do programów obliczeniowych podstawiane są wartości *amont* i *bmont* będące sumą przemieszczeń dla przypadku bazowego i przemieszczeń dodatkowych:

$$a_{mont} = a_{montb} + \Delta x$$

$$b_{mont} = b_{montb} + \Delta y$$

Zastosowana została następująca procedura określania maksymalnych dopuszczalnych przemieszczeń łożysk ze względu na każde z przyjętych kryteriów osobno:

1. Obliczenie wielkości kryterialnej, ze względu na którą prowadzono obliczenia po przemieszczeniu łożyska o wielkość Δx lub Δy określoną intuicyjnie;
2. Porównanie wyników obliczeń z odpowiednimi wartościami granicznymi przyjętymi dla określonego kryterium.
3. Ustalenie nowej wartości przemieszczenia łożyska w następujący sposób:
 - gdy żadna z wartości granicznych nie została przekroczona, zwiększano przemieszczenie łożyska o 50%;
 - gdy którakolwiek z wartości granicznych została przekroczona, zmniejszano przemieszczenie łożyska do wartości średniej między przemieszczeniem bieżącym, a przemieszczeniem zastosowanym w poprzednim kroku (w którym żadna z wartości granicznych nie została przekroczona).
4. Procedurę 3 powtarzano wielokrotnie, aż do uzyskania zbieżności rozwiązania z wymaganą dokładnością.

Ze względu na numeryczne błędy obliczeń w praktyce nie zakładano określonej dokładności wyników, lecz zawsze stosowano określoną ilość iteracji: w przypadku obliczania dopuszczalnych przemieszczeń ze względu na drgania – 18 iteracji, a w przypadku obliczeń ze względu na dopuszczalne obciążenia łożysk – 20 iteracji. Kryteria obliczeń sformułowano w punkcie 2.6 opracowania.

2.5. Zakres badań

Pełny zbiór map dopuszczalnych przemieszczeń łożysk można by uzyskać przemieszczając wszystkie łożyska w stosunku do wszystkich. Zbadanie powstałych w ten sposób wszystkich konfiguracji wzajemnych przesunięć łożysk nie jest oczywiście możliwe ze względu na brak fizycznych możliwości analizy takiej sieci przypadków z powodu ograniczeń czasowych i technicznych. Trudna była by także analiza takiej sieci przypadków. Doświadczenia zebrane podczas wcześniejszych podobnych analiz pozwalają na rozsądny wybór przypadków istotnych i przydatnych w praktyce eksploatacyjnej.

Zakres badań ograniczony został do następujących przypadków:

1. Przesunięcia wszystkich 7. łożysk turbosespołu w czterech kierunkach: w dół, w górę, w prawo i w lewo, przy braku przemieszczeń pozostałych 6. łożysk. Generuje to 7 map dopuszczalnych przemieszczeń łożysk.
2. Przesunięcia łożyska nr 5 w czterech kierunkach: w dół, w górę, w prawo i w lewo, przy jednoczesnym przemieszczeniu łożyska nr 6 w 4. kierunkach o jedną określoną wartość. Generuje to 4 mapy dopuszczalnych przemieszczeń łożysk.
3. Przesunięcia łożyska nr 6 w czterech kierunkach: w dół, w górę, w prawo i w lewo, przy jednoczesnym przemieszczeniu łożyska nr 5 w 4. kierunkach o jedną określoną wartość. Generuje to 4 mapy dopuszczalnych przemieszczeń łożysk.

Realizacja badań w zakresie zbioru przypadków 1, 2, 3 wykreowała 15 map dopuszczalnych przemieszczeń łożysk.

Wybór łożysk nr 5 i nr 6 dla zbadania wpływu ich wzajemnych przemieszczeń na kształt obszarów akceptacji można uzasadnić tym, że łożyska te są położone bardzo blisko siebie i mimo połączenia odcinków wałów między tymi łożyskami sprzęgłem podatnym, ich wzajemne przesunięcia silnie na siebie wpływają. Ponadto są to łożyska silnie obciążone i sprawiające stosunkowo najwięcej kłopotów eksploatacyjnych. Podobna sytuacja jak dla pary łożysk nr 5 i nr 6, zachodzi dla pary łożysk nr 3 i nr 4, gdyż są one również położone blisko siebie (zob. Rys.2.3). łożyska te nie sprawiają jednak w praktyce eksploatacyjnej tak dużych kłopotów.

2.6. Kryteria kwalifikacji stanu turbozespołu jako dopuszczalnego

Najogólniejszym kryterium służącym do kwalifikacji stanu turbozespołu jako całości jest **jednoczesne spełnienie wszystkich trzech następujących warunków dla wszystkich siedmiu łożysk turbozespołu:**

- dopuszczalnych drgań względnych czop – panew, określonych przez amplitudy przesunięć p-p w kierunkach odchylonych o 45 stopni od pionu:

$$s < s_{gr}$$

- dopuszczalnych drgań bezwzględnych łożysk, określonych przez prędkości drgań średnie kwadratowe w kierunku poziomym i pionowym:

$$v_{RMS} < v_{RMSgr}$$

- dopuszczalnego obciążenia łożysk określone przez średnie ciśnienia na powierzchni panwi:

$$p < p_{dop}$$

Dla ilościowej oceny, czy stan dynamiczny turbozespołu jest dopuszczalny, przyjęte zostały następujące wielkości graniczne powyższych parametrów:

$$\begin{aligned} s_{xgr} = s_{ygr} &= 165 \mu\text{m}, \\ v_{RMSxgr} = v_{RMSygr} &= 7,5 \text{ mm/s}, \\ p_{dop} &= 2 \text{ MPa}. \end{aligned}$$

Drganiove wartości graniczne przyjęto na podstawie norm ISO: dla przemieszczeń drgań względnych według ISO 7919-2, a dla prędkości drgań bezwzględnych RMS - według ISO 10816-2. Wartości te odpowiadają stanowi ostrzegawczemu. Ciśnienia graniczne na powierzchni panwi przyjęto wzorując się na stosowanych w przemyśle turbinowym wielkościach obliczeniowych przy konstrukcji dużych łożysk ślizgowych. Na podstawie wymiarów geometrycznych poszczególnych łożysk zostały obliczone rzuty powierzchni nośnej łożysk na płaszczyznę pionową i poziomą, a na tej podstawie obliczono dopuszczalne obciążenie łożysk w kierunkach do nich prostopadłych. Dopuszczalne obciążenia łożysk muszą być obliczone indywidualnie dla każdego z nich i osobno dla kierunku poziomego i pionowego. Przy obliczaniu rzutu powierzchni nośnej na płaszczyznę pionową i poziomą, odliczone zostały powierzchnie kieszeni

smarnych, rowki obwodowe w górnej półpanwi oraz powierzchnie kieszeni lewarowych jako nie przesuwających obciążeń.

Zastosowany został algorytm obliczeniowy dający w wyniku najpierw obszary akceptacji przesunąć łożysk niezależnie ze względu na dwa kryteria:

- kryterium dopuszczalnych drgań względnych i bezwzględnych łożysk (jednocześnie),
- kryterium dopuszczalnych obciążeń łożysk.

Obszar akceptacji przesunąć łożysk ze względu na te kryteria traktowane łącznie obejmuje obszar, w którym oba te kryteria częściowe są spełnione jednocześnie.

2.7. Sposób prezentacji wyników

Pełne wyniki badań w zakresie podanym powyżej stanowią bardzo obszerny materiał zgromadzony w postaci plików dyskowych. Wyselekcjonowano z niego wyniki istotne, które następnie zostały przetworzone do postaci nadającej się do analizy. W ramach sprawozdania z badań zostały przedstawione następujące materiały:

2.7.1. Pliki wynikowe

Pliki danych i pliki wynikowe z obliczeń zawarte są na dysku CDROM [2.19]. Są zgromadzone w następujących katalogach:

- OBLICZENIA_1 – dotyczą obliczeń dopuszczalnych przemieszczeń łożysk przy przemieszczaniu każdego z 7. łożysk turbozespołu oddzielnie,
- OBLICZENIA_2 – dotyczą obliczeń dopuszczalnych przemieszczeń łożysk przy przemieszczaniu jednego z łożysk nr 5 lub nr 6, przy jednoczesnym przemieszczeniu drugiego z tych łożysk o 0.25 mm.

Struktura każdego z tych katalogów jest jednakowa. Zawierają one podkatalogi mieszczące dane i wyniki obliczeń poszczególnych przypadków związanych z określonym przemieszczeniem łożysk o ośmioliterowych nazwach. W każdym z nich mieszczą się 3 podkatalogi:

- KIND – dotyczący obliczeń programem KINWIN-60,
- KINI – dotyczący obliczeń programem KINWIN-I-LEW,
- NLDW - dotyczący obliczeń dynamiki wirnika programem NLDW-75-LEW.

Każdy z tych trzech katalogów zawiera podkatalogi:

- DAN – mieszczące pliki danych do programów,
- WYN – mieszczące pliki wynikowe.

Strukturę i znaczenie poszczególnych plików danych i wynikowych zawartych w katalogach DAN i WYN opisano w [2.9].

Część zasadnicza nazw plików jest podobna do nazw katalogów i definiuje sposób przemieszczenia łożysk dla określonego przypadku obliczeniowego. Poszczególne przypadki obliczeniowe mają ośmioliterowe nazwy, w których jest zakodowany sposób przemieszczenia łożysk. Cztery pierwsze znaki dotyczą przemieszczeń pierwszego z pary łożysk przemieszczanych, cztery następne – drugiego z przemieszczanych łożysk pary. Pierwszy z czterech znaków (litera) oznacza kierunek przemieszczenia:

- P - łożysko przemieszczane w prawo (dodatnie, zgodne z kierunkiem osi x),
- L - łożysko przemieszczane w prawo (ujemne, przeciwne do kierunku osi x),
- G - łożysko przemieszczane w górę (dodatnie, zgodne z kierunkiem osi y),
- D - łożysko przemieszczane w dół (ujemne, przeciwne do kierunku osi y).

Drugi z czterech znaków (liczba) oznacza numer łożyska przemieszczanego. Cyfry trzecia i czwarta są kodem obliczanego przypadku związanego z wielkością przemieszczenia w kolejnej iteracji. Gdy przemieszczane są indywidualnie poszczególne łożyska maszyny (to znaczy tylko jedno z łożysk jest przemieszczane), to cztery pierwsze znaki są zerami 0000. Zasady te odnoszą się zarówno do katalogów, jak i plików zawartych w tych katalogach, z tym, że w przypadku nazw katalogów dwa ostatnie spośród ośmiu znaków to XX, a w przypadku nazw plików są to wspomniane numery przypadków zgromadzonych w tym katalogu związanych z wielkością przemieszczenia. Na przykład nazwa pliku P502G418 oznacza przypadek obliczeniowy związany z przemieszczeniem łożyska nr 5 w prawo o wielkość opisaną kodem 02 (tutaj zawsze 02 odpowiada przemieszczeniu 0.25mm) oraz przemieszczeniem łożyska nr 4 w górę o wielkość opisaną kodem 18. Wielkości przemieszczeń poszczególnych łożysk odpowiadające obliczanym przypadkom są wyszczególnione w Tab. 2.3 - Tab. 2.8. (Uwaga: do opracowania [2.19] dołączono tylko pliki danych i wynikowe dla ostatniego z obliczanych przypadków serii, dla którego uzyskano zbieżność procesu iteracyjnego, lub przerwano obliczenia. Są to najczęściej przypadki 18 lub 20).

2.7.2. Tabele zbiorcze

Wyniki obliczeń zostały zebrane w tabelach zbiorczych. Tab.2.1 zawiera wartości dopuszczalnych przemieszczeń łożysk obliczone przy przemieszczaniu jednego tylko łożyska. Środki panwi pozostałych łożysk znajdują się na linii kinetostatycznej. Tab.2.2 zawiera analogiczne wyniki dopuszczalnych przemieszczeń łożysk obliczone przy przemieszczaniu dwóch łożysk jednocześnie. Poszczególne kolumny w obu tabelach zawierają:

Kol. 2 – kod przypadku (serię obliczeń). Np. 0000L2 oznacza, że przemieszczane było tylko jedno łożysko, tzn. łożysko nr 2 w poziomie, w lewo; L502D6 oznacza, że przemieszczane były dwa łożyska, przy czym jedno z nich, łożysko nr 5 w poziomie w lewo, a drugie, łożysko nr 6 w pionie w dół.

Kol. 3 – wielkość i kierunek przemieszczenia pierwszego z łożysk (wielkość zadana).

Kol. 4 – dopuszczalne przemieszczenie drugiego łożyska ze względu na kryterium obciążenia panwi (wielkość obliczona).

Kol. 5 – numer łożyska, w którym nastąpiło przekroczenie dopuszczalnego obciążenia i kierunek reakcji łożyskowej.

Kol. 6 – dopuszczalne przemieszczenie drugiego łożyska ze względu na kryterium drganiowe (wielkość obliczona).

Kol. 7 – numer łożyska, w którym nastąpiło przekroczenie dopuszczalnych drgań i kierunek tych drgań; w przypadku, gdy przekroczone zostały dopuszczalne amplitudy przemieszczeń drgań względnych, mogą to być kierunki u, v , a w przypadku, gdy przekroczone zostały dopuszczalne amplitudy prędkości drgań bezwzględnych, mogą to być kierunki x, y .

Kol. 8 – dopuszczalne przemieszczenie drugiego łożyska ze względu na łączne kryterium dopuszczalnego obciążenia i dopuszczalnych drgań. Jest to mniejsza spośród wartości z kolumn 4 i 6.

Kol. 9 – numer łożyska, w którym nastąpiło przekroczenie któregoś z kryterium, kierunek, w którym to kryterium zostało przekroczone, a także oznaczenie tego kryterium: D – drgania dopuszczalne, Q – obciążenie dopuszczalne.

Tabele 2.1–2.6 zawierają zestawienia amplitud drgań wszystkich łożysk turbozespołu przy maksymalnym dopuszczalnym przemieszczeniu, obliczonych ze względu na kryterium drganiowe. Tabele 2.7–2.8 zawierają zestawienia obliczonych reakcji łożyskowych wszystkich łożysk turbozespołu przy maksymalnym dopuszczalnym przemieszczeniu, obliczonych ze względu na kryterium obciążeń łożysk. Są to wyniki z ostatniego obliczanego przypadku w danej serii obliczeń iteracyjnych. Poszczególne tabele zawierają:

Tab.2.3 – amplitudy drgań względnych w dwóch kierunkach, App_u , App_v obliczone ze względu na kryterium drganiowe przy przemieszczeniach jednego tylko łożyska.

Tab.2.4 – prędkości drgań bezwzględnych w dwóch kierunkach, $Vrms_x$, $Vrms_y$ obliczone ze względu na kryterium drganiowe przy przemieszczeniach jednego tylko łożyska.

Tab.2.5 – amplitudy drgań względnych w dwóch kierunkach, App_u , App_v obliczone ze względu na kryterium drganiowe przy przemieszczeniach dwóch łożysk.

Tab.2.6 – prędkości drgań bezwzględnych w dwóch kierunkach, $Vrms_x$, $Vrms_y$ obliczone ze względu na kryterium drganiowe przy przemieszczeniach dwóch łożysk.

Tab.2.7 – reakcje łożyskowe w dwóch kierunkach, R_x , R_y obliczone ze względu na kryterium obciążeń łożysk, przy przemieszczeniach jednego tylko łożyska.

Tab.2.8 – reakcje łożyskowe w dwóch kierunkach, R_x , R_y obliczone ze względu na kryterium obciążeń łożysk, przy przemieszczeniach dwóch łożysk jednocześnie.

2.7.3. Mapy przemieszczeń

Zakresy dopuszczalnych przemieszczeń łożysk zostały przedstawione na poglądowych wykresach na rysunkach 2.5–2.19. Na osiach współrzędnych wyznaczających kierunki przemieszczeń zaznaczono punkty odpowiadające maksymalnym dopuszczalnym przemieszczeniom łożysk w czterech kierunkach. Wartości maksymalnych przemieszczeń umieszczono obok odpowiednich punktów. Przy każdym z punktów w ramach podano nazwy odpowiednich przypadków obliczeniowych (równoważne nazwom plików danych i plików wynikowych). W sąsiedniej ramce podano numer łożyska, w którym zostały przekroczone graniczne wartości drgań lub obciążeń. Następująca po numerze łożyska litera Q oznacza, że zostało przekroczone dopuszczalne obciążenie łożyska, a litera D – że zostały przekroczone drgania dopuszczalne. Ostatnia litera oznacza kierunek reakcji lub drgań, które zostały przekroczone. Na przykład Ł4 – Du oznacza, że w łożysku nr 4 zostały przekroczone drgania względne w kierunku u . Należy zaznaczyć, że przekroczenie wartości dopuszczalnych następuje niekoniecznie w łożysku przemieszczanym.

Punkty skrajne na czterech osiach połączono liniami ciągłymi w celu uplastycznienia wykresów. Powstałe w ten sposób obszary, przypominające "latawce" nie zamykają rzeczywistych dopuszczalnych przemieszczeń łożysk. Możliwe są bowiem jednoczesne przemieszczenia łożysk w obu kierunkach: w poziomie i w pionie, czyli kombinacja tych przemieszczeń w dwóch kierunkach. Dla wyznaczenia rzeczywistych dopuszczalnych przemieszczeń w dwóch kierunkach

jednocześnie konieczne były by dodatkowe, rozbudowane obliczenia. Można się spodziewać, że tak rozumiany obszar dopuszczalnych przemieszczeń jest zbliżony do elipsy przechodzącej przez cztery punkty graniczne położone na osiach. Można jednak przypuszczać, że określony czterema liniami prostymi obszar jest minimalnym obszarem dopuszczalnych jednoczesnych przemieszczeń łożyska w dwóch kierunkach.

Punkt przecięcia osi wykresu wyznacza początkowe położenie środka panwi, względem którego przemieszczano łożysko dla wyznaczenia obszaru dopuszczalnych przemieszczeń. W przypadku, gdy przemieszczane są jednocześnie dwa łożyska, liniami przerywanymi zaznaczono osie przechodzące przez środek drugiego z łożysk. Obok środka każdego z łożysk umieszczono kółka, w których umieszczono numery odpowiednich łożysk. Np. S_6 oznacza środek łożyska nr 6, S_5 – środek łożyska nr 5. Ponadto linią przerywano-punktową oznaczono oś przechodzącą przez linię geodezyjną, stanowiącą poziom odniesienia dla położenia wszystkich łożysk turbosespołu. Środek osi geodezyjnej oznaczono w kółku jako SG . Na rysunku wymiarowano przemieszczenia składowe środków łożysk względem osi geodezyjnej. Wielkości z symbolem b oznaczają przemieszczenie wynikające z linii kinetostatycznej ($b_{mont}=b_{montb}$ dla przypadku bazowego). Np. $b_6=2.1$ oznacza, że oś łożyska nr 6 jest przesunięta o 2.1mm w górę w stosunku do linii geodezyjnej.

2.7.4. Karty diagnostyczne

Karty diagnostyczne ilustrują w poglądowy sposób stan dynamiczny łożysk turbosespołu. Są one tworzone na podstawie wyników obliczeń maszyny programem NLDW. Zawierają wykresy trajektorii drgań względnych czopów łożyskowych względem panwi i drgań bezwzględnych panwi dla wszystkich siedmiu łożysk turbosespołu. Każdemu wykresowi trajektorii towarzyszy odpowiedni słupkowy wykres widmowy amplitud drgań w kierunku poziomym i pionowym. Na wykresach reprezentowane są trzy pierwsze harmoniczne i dwie podharmoniczne drgań. Obok wykresów podano amplitudy drgań w postaci liczbowej. Wykresy trajektorii i wykresy widmowe tworzone są na podstawie 12 ostatnich obrotów wirnika.

Karty diagnostyczne utworzone zostały dla wszystkich analizowanych przypadków przemieszczeń łożysk, ujętych w tabelach 2.1 i 2.2. Do opracowania dołączono tylko karty dla przemieszczeń granicznych, to znaczy dla ostatniego przypadku obliczanego w danej serii obliczeń iteracyjnych. Ilustrują one zatem stan dynamiczny turbosespołu przy przemieszczeniach granicznych ze względu na oba kryteria: kryterium drganiowe i kryterium dopuszczalnego obciążenia panwi. Karty diagnostyczne stanowią one załącznik do niniejszego opracowania (łącznie 60 kart).

2.8. Analiza wyników badań

Podstawowym materiałem do analizy wyników badań są mapy dopuszczalnych przemieszczeń łożysk prezentowane na Rys.2.5 – Rys.2.20. Obrazują one w plastyczny sposób zakresy dopuszczalnych przemieszczeń, a także wyjściowe położenie środka panwi łożyska (lub dwu łożysk, w przypadku, gdy są przemieszczane jednocześnie dwa łożyska) w stosunku do linii geodezyjnej. Pomocny przy analizie jest Rys.2.4, przedstawiający schematyczny kształt linii wirników oraz położenie poszczególnych łożysk w stosunku do linii kinetostatycznej.

Pomocniczymi materiałami dla analizy wyników są tabele zawierające zestawienie dopuszczalnych przemieszczeń łożysk ze względu na kryterium drganiowe i na kryterium obciążenia łożysk, jak również karty diagnostyczne, zawierające wykresy trajektorii elementów łożysk. Dużą ilość informacji, jednak trudnych do bezpośredniego wykorzystania niosą pliki z wynikami obliczeń.

Należy zauważyć, że w niektórych przypadkach nie udało się obliczyć dopuszczalnych przemieszczeń łożysk. Proces iteracyjny nie był w tych przypadkach zbieżny. Oznacza to, że zanim wystąpiło przekroczenie dopuszczalnych parametrów ze względu na określone kryterium, obliczenia którymś z trzech programów pakietu były przerywane ze względu na brak zbieżności wewnętrznych pętli iteracyjnych programu, co było sygnalizowane błędem. W tych przypadkach w tabelach wynikowych wstawiano wartości przemieszczeń, po których obliczenia zostały przerwane, wyrażając wartości dopuszczalne jako większe bądź mniejsze od obliczonych do chwili wystąpienia błędu. Zawsze dotyczyło to drgań i częściej występowało przy przemieszczeniach jednego tylko łożyska. Zwraca także uwagę, że w niektórych przypadkach, dla których proces iteracyjny był zbieżny i w których zostały obliczone dokładne wartości przemieszczeń maksymalnych, wartości obliczonych reakcji łożyskowych lub drgań odbiegają w znaczący sposób od wartości kryterialnych. Nie świadczy to o błędzie obliczeń. W tych przypadkach turbozespół jest bardzo czuły na niewielkie nawet zmiany przemieszczeń wokół wartości granicznej, a ponadto algorytm obliczeniowy stosowanych programów i błędy numeryczne obliczeń stwarzają pewien obszar nieoznaczoności wyniku wokół wartości dokładnej. W kolejnych iteracjach wyniki oscylują wokół wartości kryterialnej.

2.8.1. Poziome indywidualne przemieszczenia łożysk

Prostsze do analizy są przypadki przemieszczeń indywidualnych poszczególnych łożysk, gdy pozostałe łożyska zachowują bazowe położenie. Mapy dopuszczalnych indywidualnych przemieszczeń łożysk prezentowane są na Rys.2.5 – 2.11. Z rysunków tych wynika, że zakresy poziomych przemieszczeń łożysk są prawie symetryczne względem położenia bazowego dla wszystkich łożysk. Symetria ta jest niemal zupełna w przypadku łożysk skrajnych, nr 1, 2, 7, oddalonych od łożysk sąsiednich. W tych trzech przypadkach zakres dopuszczalnych przemieszczeń w obu kierunkach w poziomie jest bardzo szeroki i wynosi ok. 20mm dla łożyska nr 7, 14mm dla łożyska nr 1 i 5 mm dla łożyska nr 2. W przypadku pozostałych łożysk waha się w zakresie od 1.2mm do 2.1mm.

Interesująca jest, że dwie pary łożysk leżących blisko siebie wykazują symetrię przemieszczeń dopuszczalnych w poziomie. Dotyczy to: pary 3 i 4 oraz pary 5 i 6, mocowanych w jednym korpusie i połączonych sprzęgłami (por. Rys. 2.3). Dopuszczalne przemieszczenie łożyska nr 3 jest o ok. 0,45 mm większe w prawo niż w lewo, podczas gdy dopuszczalne przemieszczenie łożyska nr 4 jest o ok. 0,4 mm większe w lewo niż w prawo. Prawie identyczna zależność występuje w przypadku pary łożysk 5 i 6. Dopuszczalne przemieszczenie łożyska nr 5 jest o ok. 0,52 mm większe w prawo niż w lewo, podczas gdy dopuszczalne przemieszczenie łożyska nr 6 jest o ok. 0,62 mm większe w lewo niż w prawo.

Z porównania rysunków 7 i 8 wynika, że niezależnie od tego, czy przemieszczeniu w poziomie ulega łożysko 3, czy 4 i niezależnie od kierunku tych przemieszczeń, zawsze następuje przekroczenie dopuszczalnych sił w poziomie w łożysku nr 3. Z porównania rysunków 9 i 10 wynika natomiast, że przemieszczenie łożyska nr 5 w prawo daje dokładnie taki sam efekt jak przemieszczenie łożyska nr 6 w lewo. Następuje wówczas przekroczenie amplitudy przemieszczeń drgań względnych w łożysku nr 4 w kierunku u (dwusiecznej dodatnich części osi współrzędnych). Podobnie przemieszczenie łożyska nr 5 w lewo daje dokładnie taki sam efekt jak przemieszczenie łożyska nr 6 w prawo. Następuje wówczas przekroczenie dopuszczalnych obciążeń pionowych łożyska nr 4.

2.8.2. Pionowe indywidualne przemieszczenia łożysk

Pionowe indywidualne przemieszczenia łożysk charakteryzują się tym, że ich dopuszczalne obszary w ramach tego samego łożyska są silnie niesymetryczne względem położenia bazowego. Przemieszczenia w jedną stronę są od 2 do 6 razy większe niż w stronę przeciwną. Stosunkowo najmniejszą asymetrią względem położenia bazowego cechują się pionowe przemieszczenia dopuszczalne łożyska nr 7, natomiast największą symetrią - łożysko nr 3.

Porównanie zakresów dopuszczalnych pionowych przemieszczeń łożysk nr 1, 2 i 3 prowadzi do wniosku, że łożyska te wzajemnie się obciążają. Potwierdza to także miejsce, w którym następuje przekroczenie dopuszczalnych obciążeń łożysk. We wszystkich tych trzech łożyskach mniejsze spośród przemieszczeń dopuszczalnych prowadzą do przekroczenia granicznych obciążeń łożyska nr 3 w kierunku pionowym. Można się spodziewać, że niewielkie nawet przemieszczenie łożyska nr 1 w górę doprowadzić może do przeciążenia także łożyska nr 2, nawet, jeśli nie zostanie wcześniej przeciążone łożysko nr 3. Można postawić hipotezę, że łożysko nr 2 jest zbyt mocno podniesione w stosunku do położenia łożysk nr 1 i 2. Należy się spodziewać, że obniżenie łożyska nr 2 o ok. 1 do 2 mm spowodowałoby większą symetrię wykresów dla łożysk nr 1, 2 i 3 a więc większą tolerancję maszyny na ewentualne awaryjne przemieszczenia tych łożysk.

Charakterystyczne jest, że podobnie jak w przypadku przemieszczeń poziomych, występuje niemal dokładna symetria przemieszczeń par łożysk mieszczących się w tych samych stojakach łożyskowych. Stosunek dopuszczalnych przemieszczeń pionowych pary łożysk 3 i 4 wynosi ok. 5, a stosunek dopuszczalnych przemieszczeń pionowych pary łożysk 5 i 6 wynosi ok. 2, przy czym pierwsze z łożysk w każdej parze (łożyska 3 i 5) mają większe dopuszczalne przemieszczenia w dół, a łożyska nr 4 i 6 mają większe dopuszczalne przemieszczenia w górę. Także bezwzględne wartości odpowiadających sobie przemieszczeń pionowych tych łożysk niewiele się różnią. W każdym przypadku pionowych przemieszczeń łożysk nr 3, 4, 5, 6 granicę przemieszczeń wyznaczają dopuszczalne obciążenia łożysk.

Miejscem przekroczenia obciążeń dopuszczalnych przy pionowych przemieszczeniach łożysk rządzą te same reguły, które obowiązywały przy poziomych przemieszczeniach łożysk. Z porównania rysunków 7 i 8 wynika, że przemieszczenie łożyska nr 3 w górę powoduje taki sam skutek jak przemieszczenie łożyska nr 4 w dół, mianowicie przekroczenie pionowych dopuszczalnych obciążeń łożyska nr 3. Natomiast przemieszczenie łożyska nr 3 w dół powoduje taki sam skutek jak przemieszczenie łożyska nr 4 w górę - przekroczenie pionowych dopuszczalnych obciążeń łożyska nr 4. Analogiczna jest sytuacja w przypadku pary łożysk 5 i 6. Przemieszczenie łożyska nr 5 w górę powoduje taki sam skutek jak przemieszczenie łożyska nr 6 w dół, mianowicie przekroczenie pionowych dopuszczalnych obciążeń łożyska nr 5. Natomiast przemieszczenie łożyska nr 5 w dół powoduje taki sam skutek jak przemieszczenie łożyska nr 6 w górę - przekroczenie pionowych dopuszczalnych obciążeń łożyska nr 6.

Symetria zakresów dopuszczalnych przemieszczeń par łożysk 3 i 4 oraz 5 i 6 prowadzi do podobnych wniosków jak w przypadku układu łożysk nr 1, 2, 3. łożyska w każdej z par wzajemnie się obciążają. Można podejrzewać, że łożysko nr 3 jest zbyt mocno podniesione w stosunku do położenia łożyska nr 4 oraz że łożysko nr 5 jest zbyt mocno podniesione w stosunku do położenia łożyska nr 6. Należy się spodziewać, że obniżenie łożyska nr 3 o ok. 0,5mm, lub podniesienie łożyska nr 4 o ok. 0,5 mm spowodowałoby większą symetrię wykresów. Podobny skutek spowodowałoby obniżenie łożyska nr 5 o ok. 0,2mm, lub podniesienie łożyska nr 6 o ok. 0,2mm. Można by się wówczas spodziewać większej tolerancji maszyny na ewentualne awaryjne przemieszczenia tych łożysk.

2.8.3. Jednoczesne przemieszczenia łożysk nr 5 i 6

Analiza wyników jednoczesnych przemieszczeń dwóch łożysk pozwala lepiej zrozumieć wyniki wcześniejszych obliczeń, gdy przemieszczane były indywidualnie poszczególne łożyska. Potwierdza ona jednocześnie wnioski z tamtych badań.

Badania polegające na jednoczesnym przemieszczaniu dwóch łożysk można podzielić na dwie grupy:

- przemieszczany jest środek łożyska nr 5 w czterech kierunkach o tę samą wartość i badany jest wpływ kierunku tych przemieszczeń na zakresy dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 6 w czterech kierunkach,
- przemieszczany jest środek łożyska nr 6 w czterech kierunkach o tę samą wartość i badany jest wpływ kierunku tych przemieszczeń na zakresy dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 5 w czterech kierunkach.

Wcześniejsze badania, polegające na przemieszczaniu jednego tylko łożyska sugerowały ścisły związek zakresów wzajemnych przemieszczeń tej pary łożysk wskutek ich bliskości. Z tego punktu widzenia powyższe dwie grupy badań powinny stanowić wzajemne dopełnienie.

Z Rys.2.12 wynika, że gdy łożysko nr 5 jest przesunięte w prawo o 0,25mm, to zakresy dopuszczalnych przemieszczeń poziomych łożyska nr 6 są prawie jednakowe w obu kierunkach, w prawo i w lewo. Tymczasem z Rys.2.10, przedstawiającego zakresy dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 6 wynikało, że dopuszczalne przemieszczenie tego łożyska w prawo jest o 0,62mm mniejsze, niż w lewo. Sugerowało to, że łożysko to jest wstępnie (w przypadku bazowym) przesunięte w prawo, a zatem ma wstępnie obciążoną lewą część panwi. Można ten fakt wyjaśnić następująco: przemieszczenie w prawo blisko położonego łożyska nr 5 powoduje przemieszczenie wału (a zatem i czopa łożyska nr 6) w prawo. Dzięki temu możliwe stało się większe przemieszczenie panwi łożyska nr 6 w prawo, ale jednocześnie odpowiednio mniejsze przemieszczenie w lewo. Spowodowało to symetryzację zakresów dopuszczalnych przemieszczeń poziomych łożyska nr 6.

W podobny sposób można wyjaśnić wzrost asymetrii dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 6 gdy łożysko nr 5 zostało przemieszczone w lewo (Rys.2.13). W tym wypadku łożysko nr 6 zostało dodatkowo obciążone, zmniejszając zakres jego dopuszczalnego przemieszczenia w prawo, ale umożliwiając większe przemieszczenia w lewo. Na podobnej zasadzie można tłumaczyć zmiany zakresów dopuszczalnych przemieszczeń poziomych łożyska nr 5, obserwowane na Rys.2.16 i 2.17, a spowodowane przemieszczeniem poziomym łożyska nr 6, w stosunku do sytuacji przy położeniu panwi, przedstawionej na Rys.2.9.

Wzajemne relacje przemieszczeń dwóch blisko położonych łożysk jeszcze lepiej ilustrują badania skutków wzajemnych przemieszczeń łożysk w pionie (Rys.2.14 – 2.19). Z Rys.2.14 wynika, że gdy łożysko nr 5 zostało przemieszczone o 0,25mm w górę, to łożysko nr 6 znalazło się na granicy możliwych przemieszczeń zarówno w dół, jak i w górę. Fakt ten wyjaśnia porównanie z Rys.2.9 i 2.10, z których wynika, że już w przypadku bazowym łożyska nr 5 i 6 miały zakresy dopuszczalnych przemieszczeń pionowych niewiele przewyższające wartość 0,25mm. Z tego samego powodu pionowe przemieszczenia łożyska nr 5 są praktycznie niemożliwe w górę, gdy łożysko nr 6 zostało przemieszczone w dół o 0,25mm. Możliwe są natomiast niewielkie przemieszczenia tego łożyska w lewo. Zachodzi też oczywiście sytuacja odwrotna. Z Rys.2.15 wynika, że przemieszczenie łożyska nr 5 w dół rozszerza zakres możliwych przemieszczeń łożyska nr 6 w dół, ale jednocześnie zmniejsza zakres jego możliwych przemieszczeń w górę. Podobnie z Rys.2.18 wynika, że przemieszczenie łożyska nr 6 w górę rozszerza zakres możliwych przemieszczeń łożyska nr 5 w górę, ale zmniejsza zakres możliwych przemieszczeń tego łożyska w dół.

Ograniczenie pionowych przemieszczeń łożysk nr 5 i 6 wynika zawsze z przekroczenia dopuszczalnych obciążeń łożysk. Dotyczy to zarówno przemieszczeń pionowych dwóch łożysk jednocześnie, jak i indywidualnych przemieszczeń tych łożysk. Co więcej, graniczne przemieszczenie łożyska nr 5 w górę zawsze skutkuje przekroczeniem pionowych obciążeń dopuszczalnych w tymże łożysku nr 5, natomiast przemieszczanie łożyska nr 5 w dół powoduje przekroczenie dopuszczalnych obciążeń w łożysku nr 6. Analogiczna sytuacja ma miejsce w przypadku pionowych przemieszczeń łożyska nr 6. Graniczne przemieszczenie łożyska nr 6 w górę zawsze skutkuje przekroczeniem pionowych obciążeń dopuszczalnych w łożysku nr 6, natomiast przemieszczanie łożyska nr 6 w dół powoduje przekroczenie dopuszczalnych obciążeń w sąsiednim łożysku nr 5.

2.8.4. Analiza kart diagnostycznych

Zbiór kart diagnostycznych ze względu na ich ilość (60 kart) stanowi odrębną całość, dołączoną do opracowania w formie dodatku [2.19]. Trzy spośród nich, najbardziej charakterystyczne, włączono do treści opracowania w formie rysunków. Jako dodatek do niniejszego opracowania dołączono tylko 60 kart diagnostycznych, po jednej dla każdego ostatniego przypadku obliczanego w danej serii obliczeń iteracyjnych, a więc dla przemieszczeń granicznych ze względu na któryś z parametrów kryterialnych. W nagłówku każdej karty podano kod karty, równoważny symbolowi obliczonego przypadku, zgodny z nazwą w Tab.2.1 i Tab.2.2. W opisie defektu podano kryterium, ze względu na które obliczono przemieszczenia dopuszczalne. Kryterium to jest zgodne z opisem w ostatniej kolumnie tabel 2.1 i 2.2 (D – kryterium drganiowe, Q – kryterium dopuszczalnych ciśnień w łożyskach).

W zdecydowanej większości przypadków spośród zestawionych w Tab.2.1 i Tab.2.2, praca łożysk jest stabilna. O stabilnej pracy łożysk świadczy charakter i kształt trajektorii. Trajektorie zarówno środków czopów łożyskowych jak i panwi są wówczas niewielkie, powtarzalne w trakcie kolejnych obrotów wirnika. W widmie drgań dominuje pierwsza harmoniczna. Przykładową kartę diagnostyczną prezentującą stabilną pracę maszyny przedstawia Rys.2.20. W kilku zaledwie przypadkach praca łożysk jest silnie niestabilna. W tych przypadkach kształt trajektorii czopów świadczy o chaotycznych ruchach czopów, niepowtarzalnych w trakcie jednego obrotu wirnika, wypełniających cały luz łożyskowy. W widmie drgań dominują podharmoniczne. Podharmoniczna $1/3X$ jest czasem kilkakrotnie większa niż pierwsza harmoniczna. Może to być efekt zjawiska bicia olejowego łożysk lub rozwiniętej niestabilności wirnika. Podobny kształt prezentują także trajektorie panwi. Ilustracją niestabilnej pracy łożysk jest karta diagnostyczna przedstawiona na Rys.2.21. Pomiędzy dwoma stanami skrajnymi pewna liczba przypadków charakteryzuje się niewielką niestabilnością. Trajektorie czopów nie są wprawdzie powtarzalne w trakcie obrotu wirnika, ale ich rozmiary są niewielkie w porównaniu z luzem łożyskowym. Podharmoniczne $1/3X$ i $1/2X$ mają wówczas wielkość porównywalną z pierwszą harmoniczną. Ten przypadek dobrze ilustruje karta diagnostyczna z Rys.2.22.

Przypadki, dla których dopuszczalne przemieszczenia zostały obliczone ze względu na kryterium maksymalnych ciśnień w łożyskach, charakteryzują się zdecydowanym charakterem wykresów trajektorii. Większość przypadków charakteryzuje stabilna praca łożysk, jednak w kilku przypadkach mamy do czynienia z rozwiniętą, silną niestabilnością. Przypadków pośrednich niemal brak. Fakt ten spowodowany jest tym, że gdy kryterium zbieżności procesu są obciążenia łożysk, obliczenia są kontynuowane aż do osiągnięcia granicznych obciążeń łożysk, mimo pojawienia się wcześniej silnych drgań łożysk. W stanie rozwiniętej niestabilności zawsze największe drgania występują w łożysku nr 4 i są to drgania względne czopa w kierunku u . Niemal zawsze drgania te są spowodowane przemieszczeniem poziomym łożyska nr 5 w prawo lub łożyska nr 6 w lewo. Zawsze wywołuje to przekroczenie ciśnień dopuszczalnych poziomych

w łożysku nr 5.

Gdy dopuszczalne przemieszczenia łożysk zostały obliczone ze względu na kryterium drganiowe, drgania z natury nie mogą mieć amplitud większych niż założone wartości kryterialne. Większość przypadków charakteryzuje się wówczas niewielką niestabilnością pracy łożysk. Wielkość składowych podharmonicznych drgań są porównywalna z pierwszą harmoniczną. Jedynie w dwóch przypadkach ma miejsce silna niestabilność, a mianowicie, gdy łożysko nr 5 jest przemieszczane w dół przy jednoczesnym przemieszczeniu w lewo łożyska nr 6 oraz gdy łożysko 5 jest przemieszczane w prawo przy jednoczesnym przemieszczeniu w górę łożyska nr 6. Obydwa rodzaje przemieszczeń prowadzą do podobnego charakteru wypadkowego obciążenia łożyska, co tłumaczy ten fakt.

Analiza serii kart diagnostycznych wykonanych dla różnych wartości przemieszczeń oscylujących wokół wartości granicznej (nie załączonych do opracowania) prowadzi do wniosku, że niestabilność łożysk pojawia się dość nagle, po przekroczeniu pewnej wartości przemieszczeń. Rozwój tych drgań nie jest zgodny z klasycznymi zasadami rozwoju niestabilnej pracy łożysk. Dlatego można podejrzewać, że obserwowane zjawiska są związane przede wszystkim z niestabilnością wirnika.

Podobna analiza serii kart diagnostycznych pochodzących z obliczeń wykonanych dla wzrastających wartości przemieszczeń (nie będących treścią opracowania) wskazuje, że w niektórych przypadkach przemieszczenie łożyska początkowo powoduje wzrost drgań, a powyżej pewnej wielkości przemieszczeń drgania maleją. Dalszy wzrost przemieszczeń coraz bardziej stabilizuje prace wirnika i łożysk. Jest to szczególnie widoczne w przypadku łożysk oddalonych od innych łożysk, tzn. łożysk nr 1, 2, 7.

2.9. Wnioski

1. Łożyska oddalone od innych łożysk maszyny charakteryzują się dużym zakresem poziomych przemieszczeń dopuszczalnych: 20 mm dla łożyska nr 7, 14 mm dla łożyska nr 1 oraz 5 mm dla łożyska nr 2. Zakresy dopuszczalnych przemieszczeń poziomych w prawo i w lewo są w przybliżeniu jednakowe dla tych łożysk. Oznacza to brak oddziaływania poszczególnych łożysk na siebie w kierunku poziomym.
2. Pary łożysk położonych blisko siebie (łożyska nr 3 i 4 oraz 5 i 6) charakteryzują się tym, że jedno z łożysk pary ma zakres poziomych przemieszczeń dopuszczalnych w określonym kierunku zbliżony do zakresu przemieszczeń dopuszczalnych drugiego łożyska pary w kierunku przeciwnym. Różnica poziomych przemieszczeń dopuszczalnych danego łożyska w prawo i w lewo jest taka sama jak różnica przemieszczeń dopuszczalnych drugiego łożyska pary. Wynika stąd, że dwa łożyska pary wzajemnie się obciążają.
3. Zakresy dopuszczalnych przemieszczeń pionowych wszystkich łożysk są silnie niesymetryczne względem położenia bazowego. Stosunek zakresów dopuszczalnych przemieszczeń pionowych tego samego łożyska (w górę i w dół względem położenia bazowego) wynosi od 2 (dla łożyska nr 7) do 6 (dla łożyska nr 3). Wszystkie łożyska (z wyjątkiem łożyska nr 7) mają naprzemiennie ustawione kierunki zakresów dużych i małych przemieszczeń dopuszczalnych (łożysko nr 1 ma większy zakres przemieszczeń dopuszczalnych w dół, łoż. Nr 2 – większy zakres w górę itp.). Świadczy to, że sąsiednie łożyska silnie obciążają się wzajemnie w pionie.
4. Niesymetria akceptowalnych obszarów indywidualnych przemieszczeń łożysk świadczy, że linia kinetostatyczna wirników nie jest optymalna z punktu widzenia odporności maszyny na przemieszczenia łożysk. Maszyna charakteryzuje się dużym zakresem dopuszczalnych

przemieszczeń niektórych łożysk w pewnych kierunkach i małym zakresem niektórych łożysk w innych kierunkach.

5. Analiza wyników badań przemieszczeń pary łożysk nr 5 i 6 potwierdziła przyczynę asymetrii zakresów poziomych i pionowych przemieszczeń łożysk. Wskazała sposób symetryzacji zakresów dopuszczalnych przemieszczeń i pozwala oszacować wielkość potrzebnej korekty linii kinetostatycznej.
6. Zastosowaną analizę dopuszczalnych przemieszczeń łożysk można zaproponować jako metodę korekty linii kinetostatycznej wirnika w celu optymalizacji wstępnie wyznaczonej teoretycznej linii kinetostatycznej. Symetryzacja akceptowalnych obszarów przemieszczeń łożysk zwiększyłaby odporność maszyny na eksploatacyjne bądź awaryjne zmiany położenia łożysk maszyn wielopodporowych.
7. Z analizy kart diagnostycznych charakteryzujących stan dynamiczny maszyny wynika, że zarówno charakter jak i wielkość drgań łożysk przy granicznych przemieszczeniach łożysk zależne są od tego, czy dopuszczalne przemieszczenia zostały wyznaczone ze względu na kryterium drganiowe, czy ze względu na kryterium obciążenia łożysk.
8. W przypadku, gdy przemieszczenia dopuszczalne zostały wyznaczone ze względu na obciążenia łożysk, stan dynamiczny maszyny przy granicznym przemieszczeniu łożyska charakteryzuje się albo stabilną pracą, albo rozwiniętą niestabilnością (niemal brak stanów pośrednich). W przypadku silnej niestabilności największe są drgania względne w łożysku nr 4 w kierunku u , czemu towarzyszy przekroczenie dopuszczalnych poziomych obciążeń w łożysku nr 5. Drgania te są spowodowane przemieszczeniem łożyska nr 5 w prawo lub przemieszczeniem łożyska nr 6 w lewo. W widmie drgań dominują wówczas podharmoniczne, przewyższające wielkość pierwszej harmonicznej. W pozostałych przypadkach łożyska pracują stabilnie, a drgania nie przekraczają dopuszczalnych.
9. W przypadku, gdy dopuszczalne przemieszczenia łożysk wyznaczone zostały ze względu na kryterium drganiowe, przy granicznym przemieszczeniu łożyska praca maszyny charakteryzuje się niewielką niestabilnością lub jest stabilna. Amplitudy drgań są na granicy dopuszczalnych, a składowe podharmoniczne drgań są na poziomie pierwszej harmonicznej.
10. Przemieszczenie łożysk turbozespołu prowadzi do zmiany obciążeń statycznych i do zmiany poziomu drgań łożysk. Dla łożysk nr 3, 4, 5, 6 (położonych w bliskim sąsiedztwie innych łożysk) istnieje pewna granica przemieszczeń, powyżej której praca niektórych łożysk staje się niestabilna. Niestabilność pojawia się w sposób nagły, a drgania skokowo osiągają duże amplitudy. Niesie to duże ryzyko w przypadku awaryjnego przemieszczenia się łożysk maszyny, szczególnie, że zakresy dopuszczalnych przemieszczeń tych łożysk są małe i niesymetryczne z powodu nieoptymalnej linii kinetostatycznej.

2.10. Załączniki

Struktura katalogów i oznaczenia plików

```

\OBLICZENIA2 \D502D6XX \KIND \DAN \D502D620.*
:
\WYN\ D502D620.*
:
\KINI \DAN \D502D620.*
:
\WYN\ D502D620.*
:
\NLDW\ DAN \D502D620.*
:
\WYN\ D502D620.*
:
\D502G6XX \KIND \DAN \D502D620.*
:
\WYN\ D502D620.*
:
\KINI \DAN \D502D620.*
:
\WYN\ D502D620.*
:
\NLDW\ DAN \D502D620.*
:
\WYN\ D502D620.*

```

gdzie:

D 5 0 2 D 6 1 8

| | | | | |

| | | | | Nr przypadku obliczeniowego równoważny numerowi kolejnej iteracji

| | | | | Nr drugiego z przemieszczanych łożysk

| | | | | Kierunek przemieszczenia drugiego z przemieszczanych łożysk

| | | | | Kod określający wielkość przemieszczenia pierwszego z łożysk

| | | | | Nr pierwszego z przemieszczanych łożysk

| | | | | Kierunek przemieszczenia pierwszego z przemieszczanych łożysk

UWAGI

1. Katalog OBLICZENIA1 ma identyczną strukturę jak OBLICZENIA2, ale w oznaczeniach plików i katalogów cztery pierwsze znaki to 0000, co oznacza, że tylko jedno z łożysk było przemieszczane (indywidualne przemieszczenia łożysk).
2. Do opracowania załączono tylko ostatnie pliki danych i wynikowe w danej serii obliczeń, tzn. tylko pliki dla wyznaczonego przemieszczenia dopuszczalnego (zwykle są to pliki o numerach 20 i 18).
3. * oznacza dowolne rozszerzenie plików danych i wynikowych.

Tab. 2.1: Dopuszczalne przemieszczenia łożysk obliczone przy przemieszczaniu jednego tylko łożyska.

Nr	Przypadek Seria obliczeń	Przemieszczenia innego łożyska delta [mm]	Kryterium obliczeń maksymalnych przemieszczeń					
			ciśnienie dopuszczalne			drżania dopuszczalne		łącznie: ciśn./drż. dop.
			delta [mm]	przechr. w łoż.	delta [mm]	przechr. w łoż.	delta [mm]	przechr. w łoż.
1	0000P1	0	dx1=13.765	2x	dx1>389.239	-	dx1=13.765	2x - Q
2	0000L1	0	dx1=-14.558	2x	dx1=-248.681	4v	dx1=-14.558	2x - Q
3	0000G1	0	dy1=3.943	3y	dy1=83.694	4u	dy1=3.943	3y - Q
4	0000D1	0	dy1=-12.277	2y	dy1<-259.428	-	dy1=-12.277	2y - Q
5	0000P2	0	dx2=5.170	3x	dx2=20.018	4v	dx2=5.170	3x - Q
6	0000L2	0	dx2=-5.392	2x	dx2<-51.258	-	dx2=-5.392	2x - Q
7	0000G2	0	dy2=4.503	2y	dy2>76.887	-	dy2=4.503	2y - Q
8	0000D2	0	dy2=-0.732	3y	dy2>-6.381	4u	dy2=-0.732	3y - Q
9	0000P3	0	dx3=1.860	3x	dx3>17.086	-	dx3=1.860	3x - Q
10	0000L3	0	dx3=-1.409	3x	dx3=-3.387	4v	dx3=-1.409	3x - Q
11	0000G3	0	dy3=0.209	3y	dy3=1.080	4u	dy3=0.209	3y - Q
12	0000D3	0	dy3=-1.229	4y	dy3=-12.981	5u	dy3=-1.229	4y - Q
13	0000P4	0	dx4=1.699	3x	dx4=2.649	5u	dx4=1.699	3x - Q
14	0000L4	0	dx4=-2.101	3x	dx4<-19.222	-	dx4=-2.101	3x - Q
15	0000G4	0	dy4=1.121	4y	dy4=4.127	5u	dy4=1.121	4y - Q
16	0000D4	0	dy4=-0.219	3y	dy4=-0.881	4u	dy4=-0.219	3y - Q
17	0000P5	0	dx5=1.804	5x	dx5=1.689	4u	dx5=1.689	4u - D
18	0000L5	0	dx5=-1.173	5y	dx5=-3.788	5x	dx5=-1.173	5y - Q
19	0000G5	0	dy5=0.255	5y	dy5=1.290	6u	dy5=0.255	5y - Q
20	0000D5	0	dy5=-0.576	6y	dy5=-1.212	5u	dy5=-0.576	6y - Q
21	0000P6	0	dx6=1.395	5y	dx6=3.746	5x	dx6=1.395	5y - Q
22	0000L6	0	dx6=-2.124	5x	dx6=-2.016	4u	dx6=-2.016	4u - D
23	0000G6	0	dy6=0.627	6y	dy6=1.499	5u	dy6=0.627	6y - Q
24	0000D6	0	dy6=-0.296	5y	dy6=-1.338	6u	dy6=-0.296	5y - Q
25	0000P7	0	dx7=19.772	6x	dx7=27.869	5x	dx7=19.772	6x - Q
26	0000L7	0	dx7=-20.662	5y	dx7=-39.445	5x	dx7=-20.662	5y - Q
27	0000G7	0	dy7=3.093	5y	dy7=11.551	6u	dy7=3.093	5y - Q
28	0000D7	0	dy7=-5.358	6y	dy7=-14.854	5u	dy7=-5.358	6y - Q

Tab. 2.2: Dopuszczalne przemieszczenia łożysk obliczone przy przemieszczaniu jednego tylko łożyska.

Nr	Przypadek Seria obliczeń	Przemieszczenia innego łożyska	Kryterium obliczeń maksymalnych przemieszczeń						
			ciśnienie dopuszczalne			drgania dopuszczalne		łącznie: ciśn./drg. dop.	
			delta [mm]	delta [mm]	przekr. w łoż.	delta [mm]	przekr. w łoż.	delta [mm]	przekr. w łoż.
1	P502P6	dx5=0.25	dx6=1.682	5y	dx6=3.988	5x	dx6=1.682	5y - Q	
2	P502L6	dx5=0.25	dx6=-1.837	5x	dx6=-1.700	4u	dx6=-1.700	4u - D	
3	P502G6	dx5=0.25	dy6=0.572	6y	dx6=8.226	7u	dy6=0.572	6y - Q	
4	P502D6	dx5=0.25	dy6=-0.368	5y	dx6=-1.397	6u	dy6=-0.368	5y - Q	
5	L502P6	dx5=-0.25	dx6=1.072	5y	dx6=3.450	5x	dx6=1.072	5y - Q	
6	L502L6	dx5=-0.25	dx6=-2.415	5x	dx6=-2.384	4u	dx6=-2.384	4u - D	
7	L502G6	dx5=-0.25	dy6=0.714	6y	dx6=1.471	5u	dy6=0.714	6y - Q	
8	L502D6	dx5=-0.25	dy6=-0.247	5y	dx6=-1.684	6v	dy6=-0.247	5y - Q	
9	G502P6	dy5=0.25	dx6=0.081	5y	dx6=3.784	5x	dx6=0.081	5y - Q	
10	G502L6	dy5=0.25	dx6=-2.055	5x	dx6=-2.343	4u	dx6=-2.055	5x - Q	
11	G502G6	dy5=0.25	dy6=0.894	6y	dx6=1.772	5u	dy6=0.894	6y - Q	
12	G502D6	dy5=0.25	dy6=-0.006	5y	dx6=-1.069	6u	dy6=-0.006	5y - Q	
13	D502P6	dy5=-0.25	dx6=1.973	5x	dx6=3.513	5x	dx6=1.973	5x - Q	
14	D502L6	dy5=-0.25	dx6=-2.252	5x	dx6=-1.789	4u	dx6=-1.789	4u - D	
15	D502G6	dy5=-0.25	dy6=0.348	6y	dx6=1.186	5u	dy6=0.348	6y - Q	
16	D502D6	dy5=-0.25	dy6=-0.586	5y	dx6=-1.585	6u	dy6=-0.586	5y - Q	
17	P602P5	dx6=0.25	dx5=2.059	5x	dx5=1.819	4u	dx5=1.819	4u - D	
18	P602L5	dx6=0.25	dx5=-0.958	5y	dx5=-3.502	5x	dx5=-0.958	5y - Q	
19	P602G5	dx6=0.25	dy5=0.221	5y	dx5<3.038	-	dy5=0.221	5y - Q	
20	P602D5	dx6=0.25	dy5=-0.654	6y	dx5=-1.226	5u	dy5=-0.654	6y - Q	
21	L602P5	dx6=-0.25	dx5=1.624	5x	dx5=1.438	4u	dx5=1.438	4u - D	
22	L602L5	dx6=-0.25	dx5=-1.398	5y	dx5=-4.110	5x	dx5=-1.398	5y - Q	
23	L602G5	dx6=-0.25	dy5=0.303	5y	dx5=1.301	6u	dy5=0.303	5y - Q	
24	L602D5	dx6=-0.25	dy5=-0.537	6y	dx5=-8.530	7u	dy5=-0.537	6y - Q	
25	G602P5	dy6=0.25	dx5=1.941	5x	dx5=1.477	4u	dx5=1.477	4u - D	
26	G602L5	dy6=0.25	dx5=-1.668	5x	dx5<-3.417	-	dx5=-1.668	5x - Q	
27	G602G5	dy6=0.25	dy5=0.470	5y	dx5=1.526	6u	dy5=0.470	5y - Q	
28	G602D5	dy6=0.25	dy5=-0.354	6y	dx5=-1.024	5u	dy5=-0.354	6y - Q	
29	D602P5	dy6=-0.25	dx5=1.832	5x	dx5=1.735	4u	dx5=1.735	4u - D	
30	D602L5	dy6=-0.25	dx5=-0.241	5y	dx5=-3.517	5x	dx5=-0.241	5y - Q	
31	D602G5	dy6=-0.25	dy5=0.039	5y	dx5=1.058	6u	dy5=0.039	5y - Q	
32	D602D5	dy6=-0.25	dy5=-0.815	6y	dx5=-1.407	5u	dy5=-0.815	6y - Q	

Tab. 2.3: Amplitudy drgań względnych Appu, Appv obliczone ze względu na kryterium drganiowe przy przemieszczeniach jednego tylko łożyska.

Przypadek (plik)	Przemieszczenie		Łożysko nr 1		Łożysko nr 2		Łożysko nr 3		Łożysko nr 4		Łożysko nr 5		Łożysko nr 6		Łożysko nr 7	
	Delta X [mm]	Delta Y [mm]	Appu [μm]	Appv [μm]	Appu [μm]	Appv [μm]	Appu [μm]	Appv [μm]	Appu [μm]	Appv [μm]	Appu [μm]	Appv [μm]	Appu [μm]	Appv [μm]	Appu [μm]	Appv [μm]
0000P115	389.2390	0.0000	6.878	6.981	2.791	2.770	6.447	6.897	3.967	5.675	12.375	7.370	28.557	10.411	14.683	15.224
0000L118	-248.6805	0.0000	7.094	7.515	3.578	5.352	7.978	11.819	42.139	171.607	146.537	63.023	73.570	25.126	28.651	21.094
0000G118	0.0000	83.6944	7.080	5.428	25.456	18.219	27.727	12.368	178.969	58.185	92.242	27.073	57.528	17.980	18.861	17.828
0000D114	0.0000	-259.4927	5.399	5.088	8.082	6.604	3.023	6.238	19.871	10.235	34.852	12.797	42.052	13.236	20.291	17.054
0000P218	20.0176	0.0000	5.953	5.650	4.949	7.442	7.466	10.415	37.066	158.687	138.778	60.313	71.075	24.365	29.011	20.165
0000L210	-51.2578	0.0000	6.578	6.537	2.944	3.353	6.556	6.786	1.203	2.820	9.713	6.870	28.636	10.829	14.476	15.220
0000G211	0.0000	76.8867	5.714	4.779	8.842	6.482	7.962	3.617	13.747	9.357	31.695	16.476	36.495	13.957	18.589	16.078
0000D218	0.0000	-6.3813	56.027	21.958	82.067	60.149	53.933	20.783	155.601	49.451	78.038	23.184	53.499	15.959	19.519	17.765
0000P309	17.0859	0.0000	3.963	2.184	3.541	4.862	6.531	6.381	1.008	1.088	5.895	11.952	26.249	13.650	14.342	14.594
0000L318	-3.3874	0.0000	51.844	14.191	103.170	173.490	9.775	20.084	47.992	182.677	163.537	57.750	74.300	23.971	31.192	23.456
0000G318	0.0000	1.0798	87.086	36.595	92.975	65.488	64.017	24.279	151.437	42.676	86.080	25.752	56.802	16.400	20.221	17.666
0000D318	0.0000	-12.9813	26.190	22.293	21.314	12.686	10.581	2.748	29.028	24.454	365.212	168.113	257.902	56.883	26.969	26.837
0000P418	2.6493	0.0000	128.064	64.582	197.102	221.622	14.668	20.040	95.907	234.108	280.342	64.113	92.686	34.532	47.053	37.551
0000L411	-19.2217	0.0000	30.442	49.815	4.619	6.700	6.416	6.014	1.131	0.654	3.025	5.912	8.631	6.103	6.131	12.981
0000G418	0.0000	4.1269	59.054	21.296	64.357	31.895	25.881	20.675	32.678	19.245	154.590	62.532	83.731	24.735	22.320	19.195
0000D418	0.0000	-0.8814	85.261	35.287	87.854	50.697	60.482	23.736	176.009	42.081	89.953	27.516	62.283	19.463	21.404	18.684
0000P518	1.6885	0.0000	77.939	31.288	91.263	43.860	181.999	49.712	575.477	188.346	128.688	330.196	155.480	56.366	32.948	27.043
0000L518	-3.7878	0.0000	62.445	25.725	56.826	28.751	54.448	16.909	34.756	43.874	10.101	10.372	7.779	75.979	15.103	22.174
0000G518	0.0000	1.2904	80.159	32.691	79.823	41.217	37.830	15.535	69.939	11.683	76.521	28.895	187.879	57.404	26.510	23.026
0000D518	0.0000	-1.2117	90.042	37.204	89.468	43.060	68.275	25.412	82.713	24.184	164.352	55.731	66.387	20.571	20.280	17.616
0000P618	3.7462	0.0000	58.201	22.894	55.794	30.904	25.775	9.150	56.910	29.484	35.646	7.405	15.057	71.044	17.363	20.106
0000L618	-2.0162	0.0000	66.691	26.634	69.950	39.190	46.340	9.342	157.163	39.804	45.530	78.997	75.945	23.831	24.803	22.775
0000G618	0.0000	1.4985	88.745	36.791	88.676	43.247	64.148	24.020	77.402	22.497	165.416	63.714	65.883	20.516	19.993	17.271
0000D618	0.0000	-1.3383	79.478	32.325	78.616	40.311	37.955	14.924	56.204	11.165	72.729	24.793	155.888	52.619	25.079	22.634
0000P718	27.8685	0.0000	67.586	26.984	71.690	42.099	26.841	12.455	132.337	51.517	33.221	70.941	42.780	22.824	10.353	15.936
0000L718	-39.4445	0.0000	61.527	24.493	64.316	37.275	4.716	1.514	76.753	31.109	46.505	18.652	18.825	54.230	7.520	19.672
0000G718	0.0000	11.5505	79.456	32.261	78.608	40.302	36.111	14.801	56.485	13.009	73.731	23.363	153.212	52.428	24.725	21.853
0000D718	0.0000	-14.8538	86.478	35.895	86.314	42.984	61.019	22.622	73.670	18.505	137.120	46.744	58.961	17.632	19.767	16.687

Tab. 2.4: Prędkości drgań bezwzględnych V_{rmsx} , V_{rmsy} obliczone ze względu na kryterium drganiowe przy przemieszczeniach jednego tylko łożyska

Przypadek (plik)	Przemieszczenie		Łożysko nr 1		Łożysko nr 2		Łożysko nr 3		Łożysko nr 4		Łożysko nr 5		Łożysko nr 6		Łożysko nr 7	
	Delta X [mm]	Delta Y [mm]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]
0000P115	389.2390	0.0000	0.441	0.436	2.184	2.112	1.207	0.564	1.278	1.456	0.314	1.274	1.689	2.062	1.104	1.101
0000L118	-248.6805	0.0000	0.448	0.442	2.265	2.206	1.815	1.149	3.582	2.440	3.649	6.159	1.772	2.566	1.491	1.110
0000G118	0.0000	83.6944	0.249	0.421	1.478	2.157	0.434	0.827	0.332	0.965	0.829	2.705	1.771	2.063	1.131	1.117
0000D114	0.0000	-259.4927	0.353	0.434	1.883	2.135	0.473	0.608	0.674	1.484	0.745	0.867	1.870	2.070	1.221	1.125
0000P218	20.0176	0.0000	0.413	0.415	2.161	2.129	1.698	1.099	3.577	2.411	3.560	6.161	1.776	2.576	1.501	1.111
0000L210	-51.2578	0.0000	0.433	0.431	2.160	2.095	1.160	0.501	1.331	1.412	0.344	1.117	1.724	2.082	1.107	1.105
0000G211	0.0000	76.8867	0.351	0.431	1.862	2.113	0.776	0.492	1.639	2.037	0.643	0.687	1.741	2.094	1.241	1.075
0000D218	0.0000	-6.3813	0.716	0.251	1.065	2.081	1.293	0.676	0.304	0.956	0.702	2.934	1.797	2.053	1.161	1.123
0000P309	17.0859	0.0000	0.398	0.413	2.030	2.039	1.009	0.484	1.557	1.120	0.893	0.922	1.722	2.153	1.129	1.114
0000L318	-3.3874	0.0000	0.631	0.500	1.509	1.761	1.694	1.183	3.378	2.470	3.660	5.754	1.852	2.559	1.525	1.093
0000G318	0.0000	1.0798	0.709	0.413	1.050	1.754	1.224	1.059	0.305	0.962	0.698	2.802	1.858	2.084	1.189	1.127
0000D318	0.0000	-12.9813	0.126	0.368	1.231	1.991	0.536	0.557	2.243	2.676	1.129	0.992	2.282	2.386	1.308	1.132
0000P418	2.6493	0.0000	0.622	0.588	1.207	1.854	1.508	1.239	3.252	2.805	4.488	4.886	2.119	2.551	1.589	1.130
0000L411	-19.2217	0.0000	0.240	0.379	1.299	1.872	0.544	0.612	1.502	1.362	1.266	1.023	3.018	1.861	0.983	1.024
0000G418	0.0000	4.1269	0.490	0.137	1.280	1.825	0.601	0.338	0.739	1.805	0.510	0.511	2.224	2.208	1.274	1.103
0000D418	0.0000	-0.8814	0.660	0.297	1.010	1.735	1.053	0.834	0.344	1.028	0.942	2.847	1.758	2.022	1.153	1.146
0000P518	1.6885	0.0000	0.516	0.186	0.834	1.675	0.849	1.018	2.594	2.284	5.401	4.044	2.828	1.982	1.253	1.233
0000L518	-3.7878	0.0000	0.494	0.285	0.543	1.762	0.974	0.541	1.303	1.567	7.643	1.589	3.386	2.083	1.349	1.414
0000G518	0.0000	1.2904	0.628	0.224	0.972	1.736	0.739	0.686	0.390	1.114	1.601	2.762	1.347	1.589	1.111	1.185
0000D518	0.0000	-1.2117	0.709	0.253	1.069	1.831	0.917	0.534	0.383	1.204	0.485	0.751	2.221	2.233	1.189	1.087
0000P618	3.7462	0.0000	0.438	0.205	0.657	1.641	0.467	0.680	0.969	1.656	7.423	2.040	3.641	1.934	1.312	1.407
0000L618	-2.0162	0.0000	0.527	0.172	0.844	1.653	0.341	0.420	1.003	1.192	4.918	3.648	2.714	1.738	1.251	1.225
0000G618	0.0000	1.4985	0.712	0.255	1.078	1.819	0.967	0.563	0.329	1.191	0.375	0.628	2.231	2.251	1.173	1.078
0000D618	0.0000	-1.3383	0.626	0.222	0.961	1.745	0.700	0.643	0.396	1.157	1.522	2.437	1.407	1.624	1.152	1.169
0000P718	27.8685	0.0000	0.526	0.147	0.958	1.605	0.234	0.338	1.295	1.478	7.424	4.342	4.279	1.783	1.031	1.079
0000L718	-39.4445	0.0000	0.484	0.171	0.860	1.675	0.215	0.465	0.523	1.772	7.694	3.606	4.286	2.235	1.103	1.034
0000G718	0.0000	11.5505	0.625	0.220	0.963	1.739	0.689	0.617	0.436	1.161	1.496	2.255	1.414	1.626	1.152	1.190
0000D718	0.0000	-14.8538	0.693	0.251	1.090	1.822	0.945	0.557	0.281	1.148	0.335	0.766	2.184	2.230	1.127	1.061

Tab. 2.5: Amplitudy drgań względnych Appu, Appv obliczone ze względu na kryterium drganiowe przy przemieszczeniach dwóch łożysk jednocześnie.

Przypadek (plik)	Przemieszczenie		Łożyisko nr 1		Łożyisko nr 2		Łożyisko nr 3		Łożyisko nr 4		Łożyisko nr 5		Łożyisko nr 6		Łożyisko nr 7	
	Delta X [mm]	Delta Y [mm]	Appu [μm]	Appv [μm]	Appu [μm]	Appv [μm]	Appu [μm]	Appv [μm]	Appu [μm]	Appv [μm]	Appu [μm]	Appv [μm]	Appu [μm]	Appv [μm]	Appu [μm]	Appv [μm]
P502P618	3.9878	0.0000	57.847	22.895	58.522	32.464	20.568	7.313	55.667	28.291	36.501	8.278	16.709	73.697	18.026	20.432
P502L618	-1.7001	0.0000	66.451	26.409	69.802	39.076	45.284	9.321	162.564	40.352	47.769	84.027	78.257	24.034	25.490	23.114
P502G618	0.0000	8.2259	76.608	31.131	77.835	42.112	25.156	11.134	62.991	25.461	43.126	31.458	48.770	30.737	157.006	119.907
P502D618	0.0000	-1.3973	77.886	31.768	77.404	39.827	33.098	13.455	52.480	10.084	62.879	24.079	158.912	60.257	25.480	21.094
L502P618	3.4502	0.0000	54.090	21.356	54.317	30.548	26.175	9.133	58.151	31.877	36.507	7.986	15.299	73.740	17.314	21.190
L502L618	-2.3836	0.0000	66.862	26.685	70.817	39.839	47.330	8.976	166.754	44.823	47.658	85.961	73.864	26.369	24.342	23.116
L502G618	0.0000	1.4706	91.043	37.644	91.213	44.761	70.509	26.196	84.113	24.113	176.015	70.984	67.254	20.171	19.590	17.226
L502D618	0.0000	-1.6844	81.155	32.996	80.787	40.429	41.332	16.908	48.939	11.450	70.491	29.907	121.411	143.586	17.132	26.100
G502P618	3.7839	0.0000	59.109	23.421	61.358	35.529	8.707	2.404	59.166	34.602	45.192	13.894	18.132	68.013	11.595	21.290
G502L618	-2.3428	0.0000	68.745	27.373	73.805	41.114	57.900	13.363	223.781	49.329	42.885	86.371	65.948	29.084	21.174	22.372
G502G618	0.0000	1.7718	92.342	37.990	88.487	43.148	61.278	23.034	64.958	18.421	139.993	48.900	59.556	18.098	19.708	17.063
G502D618	0.0000	-1.0693	79.255	32.253	78.487	40.334	38.080	14.789	56.523	10.295	67.573	24.251	144.042	46.473	24.310	21.522
D502P618	3.5132	0.0000	54.362	21.612	52.094	27.479	38.107	14.545	58.952	29.795	30.012	6.719	20.083	88.293	23.891	23.096
D502L618	-1.7891	0.0000	67.671	27.041	69.975	38.733	48.137	10.223	160.309	41.662	57.782	92.829	92.536	24.816	27.775	23.180
D502G618	0.0000	1.1863	85.887	35.423	85.767	42.285	60.088	22.866	65.010	18.046	136.374	53.653	61.187	18.553	19.804	16.823
D502D618	0.0000	-1.5851	78.022	31.651	77.611	39.811	14.120	14.120	50.244	10.412	54.707	22.079	146.577	45.585	24.530	20.546
P602P518	1.8187	0.0000	65.361	25.903	69.445	38.182	35.741	8.970	152.945	30.659	48.670	77.023	80.106	20.778	27.199	22.563
P602L518	-3.5021	0.0000	63.615	26.179	58.118	29.461	53.736	16.369	33.929	40.948	10.910	10.120	9.057	75.817	15.311	21.969
P602G508	0.0000	1.5188	80.473	32.869	79.695	41.453	33.893	15.345	42.477	4.590	36.244	13.857	33.318	37.090	14.904	15.012
P602D518	0.0000	-1.2259	88.234	36.616	87.464	42.034	59.971	23.772	50.397	13.700	113.999	37.412	53.595	15.532	18.610	16.499
L602P518	1.4380	0.0000	66.076	26.277	67.674	37.498	17.949	4.532	78.037	21.545	31.336	42.267	62.118	15.800	25.397	21.540
L602L518	-4.1102	0.0000	62.727	25.896	57.129	28.977	54.940	17.188	32.954	45.291	8.858	11.257	8.158	78.237	14.154	23.320
L602G518	0.0000	1.3008	77.938	31.514	78.066	40.712	32.183	13.129	50.964	8.640	54.020	22.789	159.483	47.013	26.587	20.091
L602D518	0.0000	-8.5296	53.626	19.870	56.206	32.425	28.785	11.504	90.731	42.816	55.606	41.059	57.074	34.995	202.693	159.302
G602P518	1.4776	0.0000	313.225	356.934	302.101	363.699	364.367	418.334	878.176	669.012	465.485	688.653	373.205	140.161	74.904	65.035
G602L508	-3.4172	0.0000	68.734	28.503	62.099	29.491	62.253	19.382	36.250	34.897	12.863	7.757	13.505	82.160	21.753	21.354
G602G518	0.0000	1.5262	83.652	33.760	80.380	41.285	40.230	15.870	77.244	10.270	72.440	27.374	165.063	50.131	25.078	22.095
G602D518	0.0000	-1.0241	89.186	36.916	88.886	42.859	65.767	24.892	75.380	21.748	146.478	54.565	66.411	20.212	20.141	17.268
D602P518	1.7347	0.0000	64.770	25.529	70.036	38.414	38.278	8.495	166.442	32.013	45.780	75.573	75.174	23.288	25.586	23.039
D602L518	-3.5169	0.0000	58.721	23.952	54.205	28.843	48.807	15.538	37.176	46.554	21.973	9.694	10.420	77.879	15.304	22.787
D602G518	0.0000	1.0578	80.139	32.668	79.701	41.183	37.774	15.538	68.652	12.035	77.966	28.818	188.069	58.985	26.443	23.130
D602D518	0.0000	-1.4067	89.381	36.867	88.589	42.649	65.914	25.153	76.772	22.191	158.341	55.639	70.726	20.854	20.041	17.531

Tab. 2.6: Prędkości drgań bezwzględnych V_{rmsx} , V_{rmsy} obliczone ze względu na kryterium drganiowe przy przemieszczeniach dwóch łożysk jednocześnie

Przypadek (plik)	Przemieszczenie		Łożyisko nr 1		Łożyisko nr 2		Łożyisko nr 3		Łożyisko nr 4		Łożyisko nr 5		Łożyisko nr 6		Łożyisko nr 7	
	Delta X [mm]	Delta Y [mm]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]
P502P618	3.9878	0.0000	0.455	0.194	1.651	0.637	0.408	0.637	0.891	1.571	7.092	2.057	3.713	1.932	1.338	1.430
P502L618	-1.7001	0.0000	0.521	0.168	1.655	0.433	0.332	0.433	1.059	1.240	4.935	3.740	2.699	1.749	1.263	1.233
P502G618	0.0000	8.2259	0.601	0.196	1.015	1.658	0.509	0.547	1.242	1.568	3.296	2.998	3.803	2.724	1.103	0.958
P502D618	0.0000	-1.3973	0.620	0.211	0.956	1.733	0.655	0.637	0.449	1.083	1.819	2.648	1.605	1.529	1.142	1.169
L502P618	3.4502	0.0000	0.425	0.197	0.644	1.631	0.453	0.653	1.031	1.695	7.611	2.057	3.683	1.940	1.309	1.409
L502L618	-2.3836	0.0000	0.525	0.171	0.849	1.652	0.408	0.408	1.103	1.330	4.982	3.621	2.750	1.744	1.240	1.227
L502G618	0.0000	1.4706	0.715	0.260	1.085	1.829	0.988	0.573	0.342	1.455	0.466	0.546	2.189	2.277	1.161	1.083
L502D618	0.0000	-1.6844	0.636	0.235	0.979	1.820	0.760	0.884	0.449	1.512	1.475	2.470	1.851	1.276	0.932	1.090
G502P618	3.7839	0.0000	0.464	0.176	1.652	0.236	0.409	0.409	0.951	1.882	7.462	2.235	4.321	2.133	1.277	1.322
G502L618	-2.3428	0.0000	0.534	0.163	0.882	1.649	0.366	0.479	1.188	1.438	5.463	4.071	3.074	1.660	1.211	1.167
G502G618	0.0000	1.7718	0.714	0.269	1.833	0.984	0.571	0.260	0.260	1.176	0.308	0.642	2.206	2.244	1.168	1.077
G502D618	0.0000	-1.0693	0.627	0.223	0.961	1.742	0.707	0.648	0.389	1.144	1.506	2.488	1.367	1.611	1.145	1.169
D502P618	3.5132	0.0000	0.427	0.221	0.555	1.627	0.650	0.816	0.998	1.684	7.520	2.026	3.314	1.870	1.406	1.425
D502L618	-1.7891	0.0000	0.525	0.177	0.830	1.664	0.367	0.392	1.015	1.157	4.529	3.325	2.608	1.867	1.287	1.217
D502G618	0.0000	1.1863	0.691	0.252	1.081	1.824	0.927	0.553	0.277	1.239	0.320	0.655	2.203	2.242	1.173	1.080
D502D618	0.0000	-1.5851	0.627	0.223	0.960	1.750	0.690	0.631	0.412	1.154	1.539	2.374	1.391	1.625	1.151	1.175
P602P518	1.8187	0.0000	0.516	0.162	0.851	1.649	0.333	0.505	0.992	1.069	4.855	4.110	2.525	1.788	1.305	1.248
P602L518	-3.5021	0.0000	0.504	0.286	0.555	1.779	0.617	0.617	1.277	1.565	7.375	1.513	3.339	2.091	1.371	1.443
P602G508	0.0000	1.5188	0.640	0.241	1.007	1.816	0.837	0.928	0.393	1.335	1.183	3.006	1.546	1.209	0.940	1.069
P602D518	0.0000	-1.2259	0.715	0.255	1.081	1.827	0.934	0.556	0.248	1.370	0.264	0.565	2.123	2.250	1.167	1.093
L602P518	1.4380	0.0000	0.531	0.164	0.864	1.651	0.327	0.461	0.883	0.898	4.517	3.883	2.515	1.756	1.277	1.235
L602L518	-4.1102	0.0000	0.496	0.288	0.540	1.776	1.003	0.506	1.370	1.520	7.589	1.870	3.415	2.083	1.348	1.400
L602G518	0.0000	1.3008	0.624	0.215	0.967	1.727	0.698	0.662	0.401	1.042	1.792	2.750	1.548	1.555	1.112	1.182
L602D518	0.0000	-8.5296	0.372	0.144	0.826	1.520	0.204	0.330	2.818	1.548	6.145	3.739	4.862	2.845	1.172	1.083
G602P518	1.4776	0.0000	1.747	1.475	2.778	1.956	3.229	5.004	6.329	10.288	6.815	4.575	2.950	1.392	1.392	1.305
G602L508	-3.4172	0.0000	0.544	0.306	0.581	1.823	1.112	0.783	1.249	1.799	6.387	1.290	2.922	1.915	1.466	1.450
G602G518	0.0000	1.5262	0.629	0.233	0.972	1.749	0.756	0.703	0.375	1.108	1.553	2.828	1.302	1.567	1.125	1.165
G602D518	0.0000	-1.0241	0.711	0.253	1.074	1.827	0.927	0.542	0.368	1.231	0.391	0.666	2.228	2.232	1.188	1.086
D602P518	1.7347	0.0000	0.513	0.156	0.861	1.643	0.305	0.533	1.061	1.140	5.096	4.418	2.625	1.665	1.263	1.252
D602L518	-3.5169	0.0000	0.465	0.270	0.510	1.746	0.894	0.543	1.302	1.593	7.569	2.016	3.476	2.095	1.378	1.457
D602G518	0.0000	1.0578	0.628	0.224	0.969	1.736	0.726	0.675	0.398	1.124	1.608	2.707	1.370	1.597	1.120	1.188
D602D518	0.0000	-1.4067	0.710	0.254	1.070	1.832	0.912	0.544	0.404	1.311	0.451	0.745	2.226	2.232	1.191	1.088

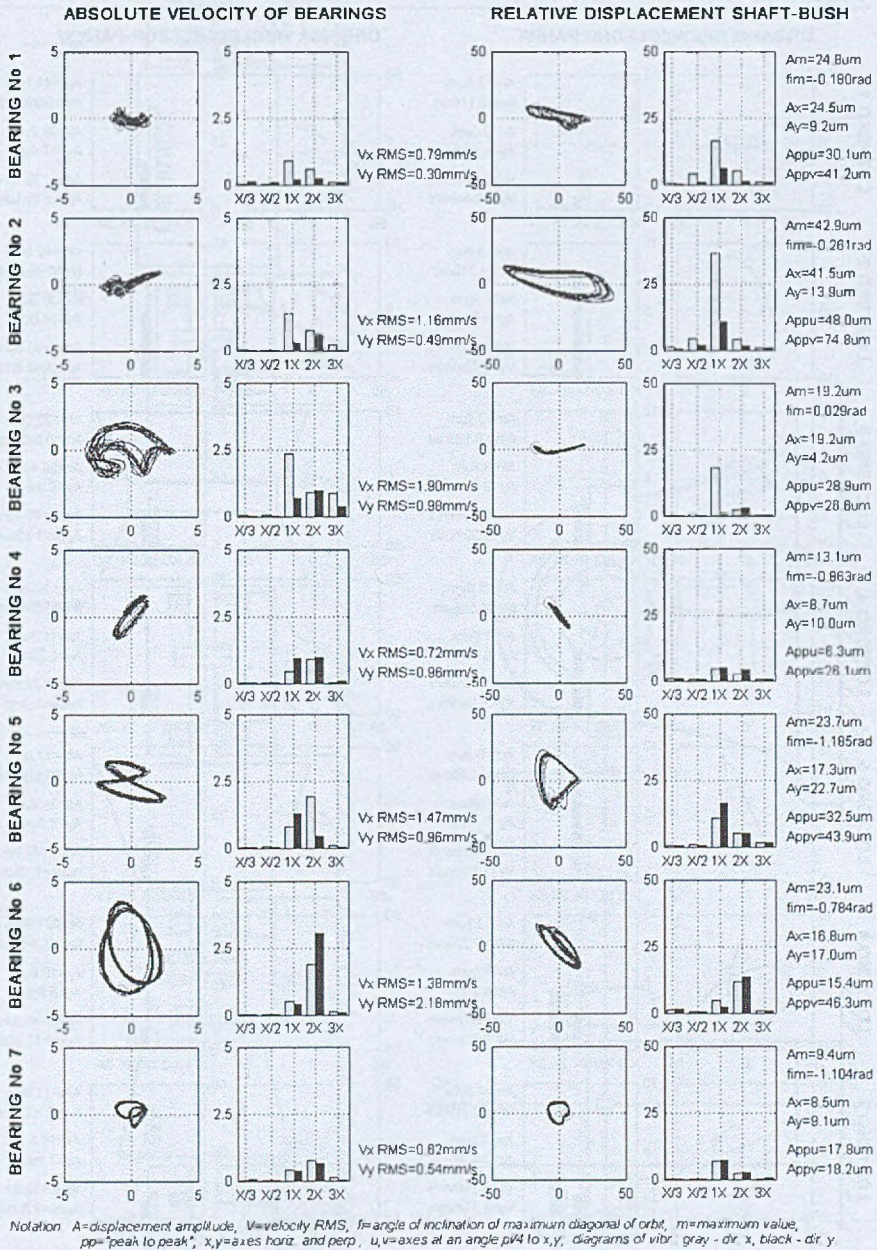
Tab. 2.7: Reakcje łożyskowe Rx, Ry obliczone ze względu na kryterium dopuszczalnych obciążeń przy przemieszczeniach jednego tylko łożyska.

Przypadek (plik)	Przemieszczenie		Łożysko nr 1		Łożysko nr 2		Łożysko nr 3		Łożysko nr 4		Łożysko nr 5		Łożysko nr 6		Łożysko nr 7	
	Delta X [mm]	Delta Y [mm]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]
0000P120	13.7649	0.0000	50.308	40.383	-111.200	65.301	59.391	159.110	706	190.170	-5.967	257.500	4.861	290.550	-733	254.340
0000L120	-14.5584	0.0000	-53.633	41.822	110.390	59.391	-64.680	176.050	5.820	175.280	-4.136	260.330	4.327	290.140	-719	254.350
0000G120	0.0000	3.9425	-1.108	57.171	-1.039	26.294	-3.725	195.800	4.718	173.550	-6.726	259.080	6.148	291.240	-900	254.220
0000D120	0.0000	-12.2768	-982	-7.047	-1.475	167.610	-2.704	97.287	3.849	197.190	-6.419	256.770	5.983	291.340	-883	254.210
0000P220	5.1698	0.0000	-40.796	42.059	104.410	57.467	-131.990	184.800	70.537	166.130	-5.556	268.270	1.327	288.190	-563	254.450
0000L220	-5.3921	0.0000	41.436	40.371	-111.200	66.097	116.620	153.770	-49.353	196.490	-6.600	253.870	7.285	292.480	-815	254.280
0000G220	0.0000	4.5032	-910	2.502	-1.868	167.610	-1.211	26.121	2.173	265.140	-4.888	250.890	4.854	290.830	-781	254.270
0000D220	0.0000	-0.7318	-1.098	47.938	-1.052	43.156	-3.776	195.800	4.794	165.110	-6.772	259.930	6.173	291.210	-901	254.220
0000P320	1.8600	0.0000	6.306	40.501	-40.491	67.058	130.190	145.290	-113.680	207.140	4.402	245.970	11.772	297.400	-1.126	254.000
0000L320	-1.4093	0.0000	-7.815	42.502	35.805	55.875	-132.000	188.740	118.860	162.400	-15.996	266.620	-1.127	286.670	-358	254.550
0000G320	0.0000	0.2093	-1.089	42.835	-1.069	53.784	-3.779	195.800	4.813	157.460	-6.787	262.190	6.181	291.070	-902	254.230
0000D320	0.0000	-1.2288	-975	34.207	-1.792	100.300	-800	33.391	1.542	305.340	-4.347	238.530	4.497	291.330	-756	254.260
0000P420	1.6989	0.0000	-1.770	42.326	20.537	56.396	-133.540	188.130	146.580	159.890	-58.864	281.130	24.857	273.570	-429	255.920
0000L420	-2.1006	0.0000	-1.732	40.675	-19.876	67.578	130.200	139.310	-148.880	216.840	63.831	228.860	-25.471	311.440	-697	252.640
0000G420	0.0000	1.1206	-999	39.982	-1.732	82.043	-813	56.552	1.227	306.000	-2.911	197.870	3.224	321.940	-627	252.970
0000D420	0.0000	-0.2190	-1.067	41.948	-1.186	56.061	-3.383	195.800	4.560	153.170	-7.310	270.850	6.714	285.040	-961	254.480
0000P520	1.8403	0.0000	-1.297	41.071	-314	64.169	4.220	156.250	-50.226	201.990	208.010	215.680	-179.420	327.940	16.397	250.260
0000L520	-1.1731	0.0000	-1.083	41.434	-817	60.402	-12.166	176.550	44.836	164.670	-151.890	306.280	130.950	249.640	-12.458	258.380
0000G520	0.0000	0.2548	-1.062	41.657	-1.203	59.872	-3.347	177.180	4.638	164.100	-7.857	306.000	7.214	250.420	-1.014	258.120
0000D520	0.0000	-0.5756	-1.099	41.374	-1.091	62.218	-3.386	160.550	3.429	212.220	-1.891	154.950	1.866	380.340	-460	245.710
0000P620	1.3953	0.0000	-1.127	41.332	-1.578	61.150	1.141	173.320	25.102	167.830	-157.770	305.750	149.670	249.560	-18.068	258.420
0000L620	-2.1242	0.0000	-1.182	41.310	547	62.340	-15.240	164.380	-18.991	194.300	208.010	214.800	-199.940	330.360	24.161	249.860
0000G620	0.0000	0.6267	-1.130	41.382	-924	61.464	-3.976	169.090	3.771	198.640	-891	162.770	868	380.010	-349	244.010
0000D620	0.0000	-0.2957	-1.060	41.622	-1.222	60.347	-3.263	172.990	4.554	169.840	-7.828	306.000	7.198	247.330	-1.012	259.240
0000P720	19.7723	0.0000	-1.155	41.305	-221	61.933	-10.543	166.840	7.784	193.590	188.550	205.450	-234.910	339.390	47.862	248.850
0000L720	-20.6622	0.0000	-1.172	41.263	-1.025	61.706	-872	171.240	1.798	169.380	-186.610	305.830	234.100	249.700	-48.851	258.240
0000G720	0.0000	3.0926	-1.060	41.620	-1.222	60.371	-3.264	172.790	4.580	174.530	-7.965	306.000	7.325	238.670	-1.026	263.370
0000D720	0.0000	-5.3581	-1.112	41.433	-995	61.221	-3.834	170.010	3.992	187.180	-2.505	178.930	2.316	380.000	-494	238.580

Tab. 2.8: Reakcje łożyskowe Rx, Ry obliczone ze względu na kryterium dopuszczalnych obciążeń przy przemieszczeniach dwóch łożysk jednocześnie

Przypadek (plik)	Przemieszczenie Delta X [mm]	Delta Y [mm]	Łożyisko nr 1		Łożyisko nr 2		Łożyisko nr 3		Łożyisko nr 4		Łożyisko nr 5		Łożyisko nr 6		Łożyisko nr 7	
			Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]
P502P620	1.6821	0.0000	-1.153	41.272	-1.676	61.485	3.891	172.110	19.875	168.790	-153.230	306.370	148.330	248.830	-18.674	258.490
P502L620	-1.8365	0.0000	-1.197	41.275	423	62.591	-12.573	163.300	-23.244	195.340	207.970	214.800	-197.110	380.160	23.104	249.900
P502G620	0.0000	0.5723	-1.136	41.339	-844	61.455	-5.694	170.130	11.604	197.090	-29.001	163.140	25.024	380.420	-2.586	243.790
P502D620	0.0000	-0.3679	-1.168	41.288	-715	62.124	-3.454	166.300	-2.334	176.270	23.841	305.510	-20.367	246.370	1.566	259.490
L502P620	1.0715	0.0000	-1.137	41.315	-1.351	61.148	-1.779	173.580	28.234	167.420	-150.350	306.340	139.980	249.090	-16.232	258.460
L502L620	-2.4146	0.0000	-1.175	41.334	733	62.161	-18.210	165.160	-14.417	193.600	207.970	214.550	-202.760	330.750	25.228	249.810
L502G620	0.0000	0.7138	-1.136	41.339	-844	61.455	-5.694	170.130	11.604	197.090	-29.001	163.140	25.024	380.420	-2.586	243.790
L502D620	0.0000	-0.2465	-1.130	41.370	-790	61.373	-6.453	170.250	14.474	171.960	-39.231	306.140	33.973	247.050	-3.476	259.210
G502P620	0.0808	0.0000	-1.089	41.559	-1.084	60.335	-3.692	175.670	6.799	165.460	-18.604	305.970	17.217	250.200	-2.178	258.160
G502L620	-2.0546	0.0000	-1.187	41.310	549	62.149	-14.679	167.090	-20.090	184.100	208.310	249.390	-199.420	300.680	23.879	252.630
G502G620	0.0000	0.8937	-1.128	41.443	-924	60.903	-4.016	173.430	3.951	192.340	-1.593	165.550	1.492	380.480	-4.14	243.210
G502D620	0.0000	-0.0057	-1.062	41.657	-1.203	59.882	-3.347	177.100	4.638	164.210	-7.857	306.020	7.214	250.340	-1.014	258.150
D502P620	1.9734	0.0000	-1.144	41.248	-1.818	61.522	3.488	171.360	31.278	174.630	-209.850	281.650	199.520	270.600	-24.107	256.350
D502L620	-2.2521	0.0000	-1.180	41.303	621	62.565	-16.555	161.630	-16.925	204.230	208.060	181.330	-201.320	359.150	24.673	247.150
D502G620	0.0000	0.3477	-1.123	41.356	-966	61.883	-3.804	165.140	3.614	204.430	-903	160.950	906	378.690	-354	244.910
D502D620	0.0000	-0.5855	-1.060	41.583	-1.222	60.842	-3.261	168.750	4.555	175.600	-7.912	306.010	7.281	244.220	-1.023	260.350
P602P520	2.0593	0.0000	-1.312	41.041	-391	64.412	6.376	155.140	-53.776	203.080	208.060	215.400	-177.090	328.030	15.496	250.250
P602L520	-0.9575	0.0000	-1.095	41.412	-940	60.558	-9.784	175.880	41.103	165.320	-152.030	306.210	133.500	249.580	-13.385	258.390
P602G520	0.0000	0.2208	-1.139	41.387	-911	61.129	-3.928	173.000	9.765	167.920	-35.557	306.000	33.238	249.650	-4.101	258.280
P602D520	0.0000	-0.6539	-1.130	41.249	-1.097	62.714	-2.532	159.050	6.101	213.580	-24.417	155.190	23.588	379.730	-3.145	245.850
L602P520	1.6242	0.0000	-1.282	41.096	-203	63.972	1.836	157.120	-46.423	201.190	207.890	215.310	-181.750	328.490	17.305	250.170
L602L520	-1.3977	0.0000	-1.061	41.470	-725	60.145	-14.610	177.620	49.518	163.790	-156.210	305.590	132.420	250.480	-11.958	258.270
L602G520	0.0000	0.3028	-1.143	41.415	-674	61.062	-5.678	173.270	1.837	167.460	21.524	306.000	-20.810	250.020	2.313	258.130
L602D520	0.0000	-0.5374	-1.109	41.374	-973	62.221	-4.132	160.630	-1.052	211.950	28.687	155.470	-27.003	380.000	2.952	245.700
G602P520	1.9412	0.0000	-1.294	41.074	-296	64.069	3.920	157.090	-49.352	205.790	205.550	187.500	-177.390	354.820	16.228	247.010
G602L520	-1.6681	0.0000	-1.055	41.488	-837	59.807	-15.279	180.310	60.897	163.230	-210.520	289.230	181.230	267.330	-17.059	255.960
G602G520	0.0000	0.4698	-1.064	41.686	-1.193	59.467	-3.376	180.770	4.630	159.190	-7.661	306.000	7.025	253.070	-991	257.170
G602D520	0.0000	-0.3541	-1.121	41.342	-993	62.056	-3.655	163.550	3.394	207.240	-536	157.640	605	380.530	-325	245.000
D602P520	1.8319	0.0000	-1.296	41.053	-286	64.593	4.259	155.280	-51.010	197.710	211.070	245.840	-181.960	299.550	16.595	253.580
D602L520	-0.2411	0.0000	-1.122	41.392	-809	61.293	-6.408	170.440	14.320	171.840	-38.689	306.040	33.512	247.160	-3.435	259.200
D602G520	0.0000	0.0394	-1.060	41.628	-1.222	60.269	-3.263	173.660	4.554	168.930	-7.798	306.000	7.198	247.810	-1.012	259.060
D602D520	0.0000	-0.8152	-1.107	41.297	-1.080	62.824	-3.309	156.250	3.022	218.290	-297	152.500	452	379.710	-314	246.490

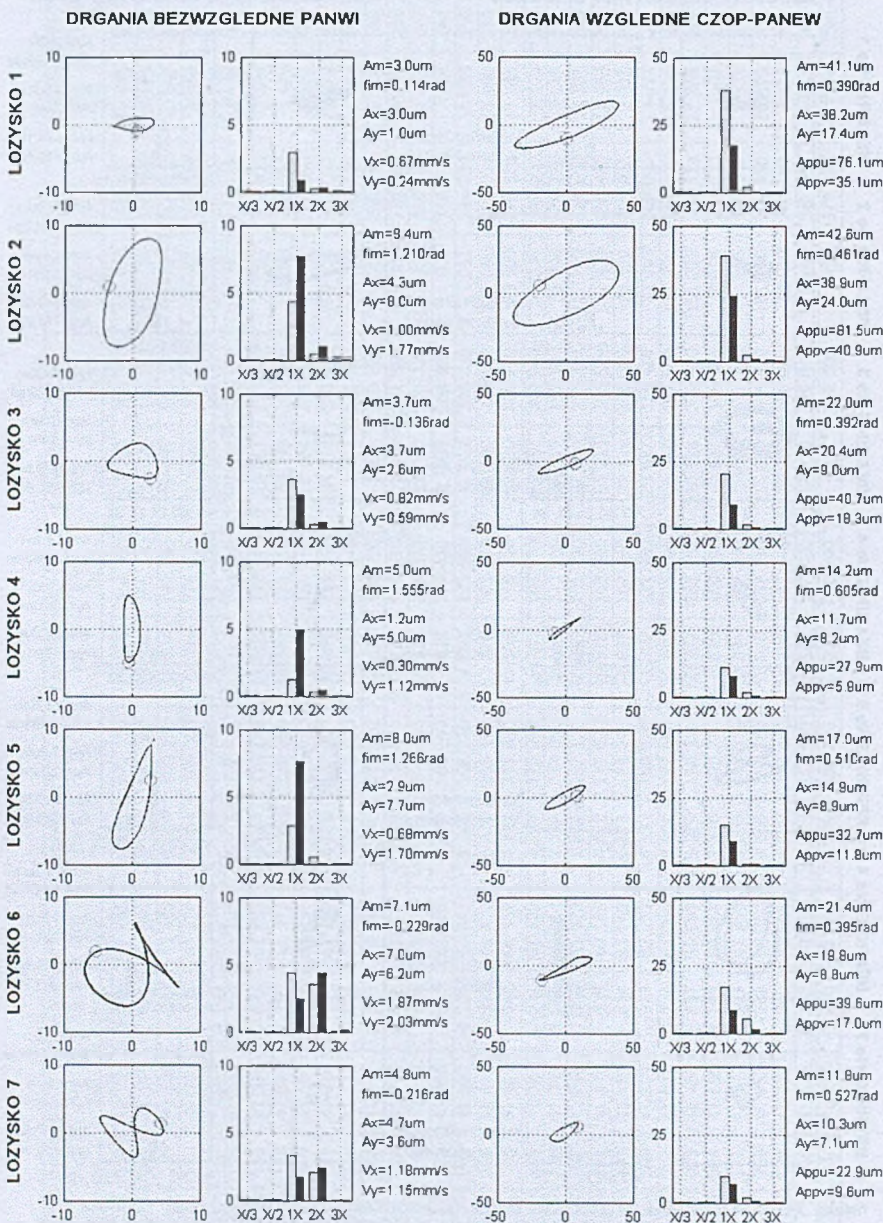
Card code: BAZA-eksperyment	Object: 13K215	Date: 2000-04-12 09:51
Defect description: EI. KOZIENICE, blok nr 7		
Variable data: NomObcPelne, ngenc=211.25 MW, ngenb=73.75 MVA, rpm=3000 obr/min.		



System DT200-1

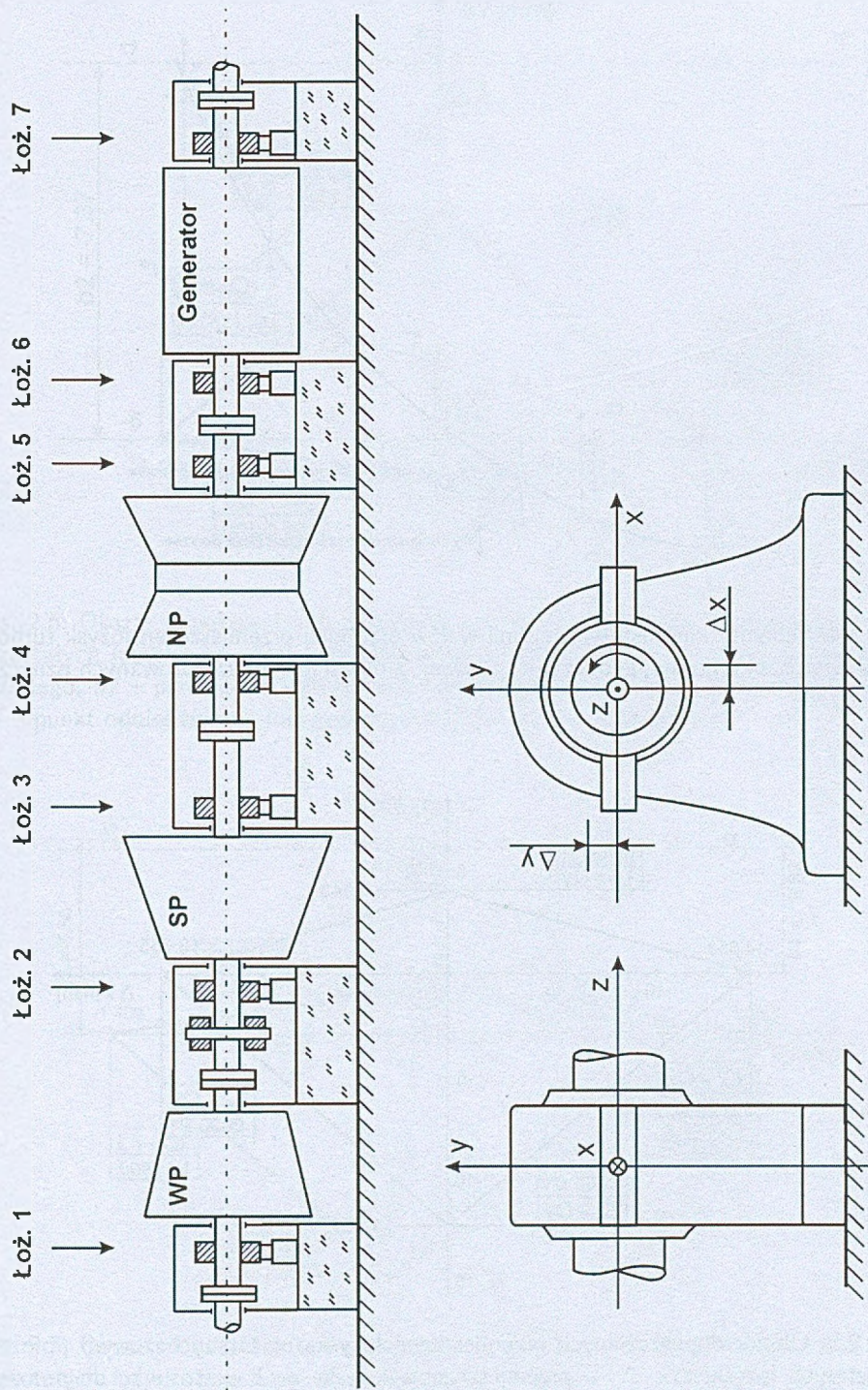
Rys. 2.1: Eksperymentalna karta diagnostyczna. Wyniki pomiarów stanu dynamicznego turbos zespołu 13K215 blok 7 w Elektrowni Kozienice za pomocą systemu DT200 przy $n=3000$ obr/min., $N_c=211.25$ MW, $N_b=73.75$ MW, $\cos\varphi = 0.94$ (karta nr K7G012).

Kod karty: BAZA-gen-aerodynMAX	Objekt: 13K215	Data: 13.02.2004
Opis defektu:		
Dane zmienna:		

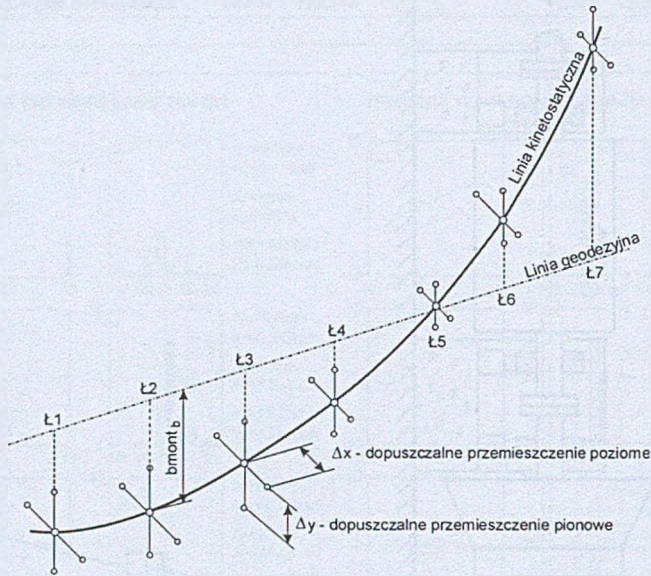


Oznaczenia: A=amplituda przemieszczeń, V=prędkość RMS, f=kat pochylenia maksymalnej przekątnej trajektorii, m=wartość maksymalna, pp="peak to peak", x,y=osię pozioma i pionowa, u,v=osię pod kątem π/4 do x,y, wykresy wdm: szary - kier x, czarny - kier y.

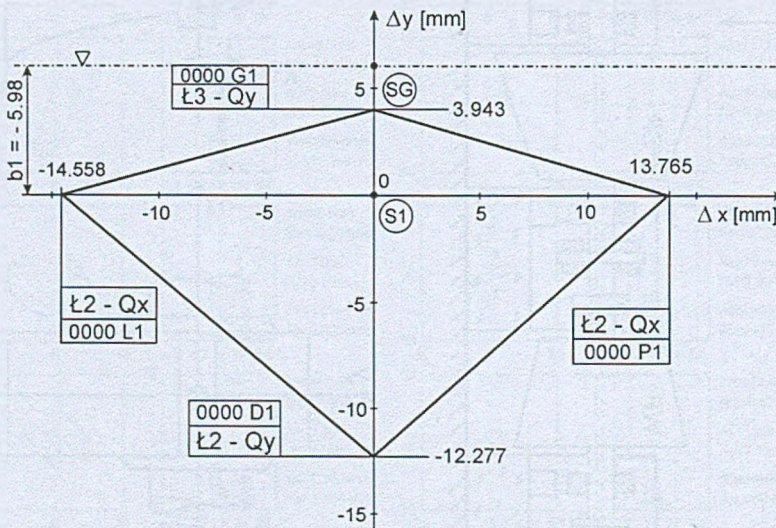
Rys. 2.2: Karta diagnostyczna dla przypadku bazowego dla turbosespołu 13K215



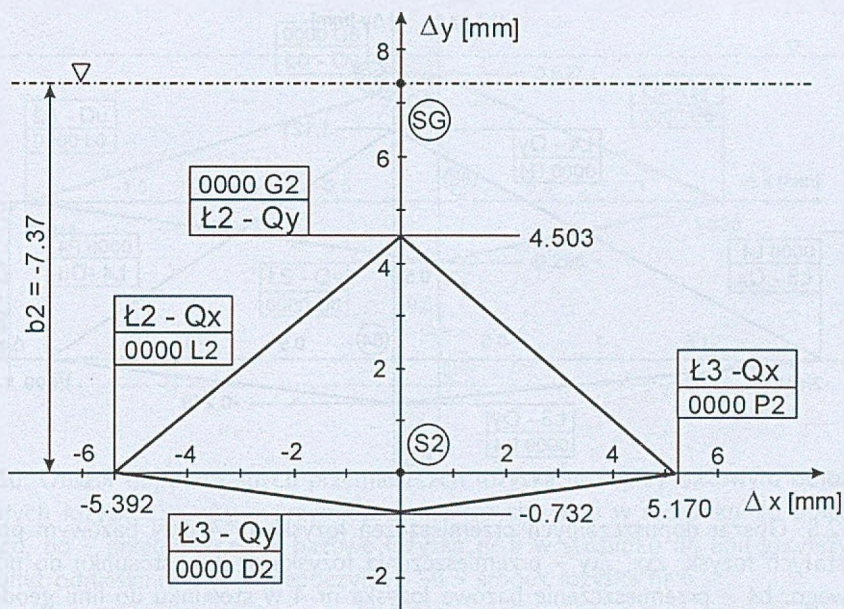
Rys. 2.3: Schemat rozmieszczenia łożysk turbosespołu 13K215 i orientacja w przyjętym układzie współrzędnych.



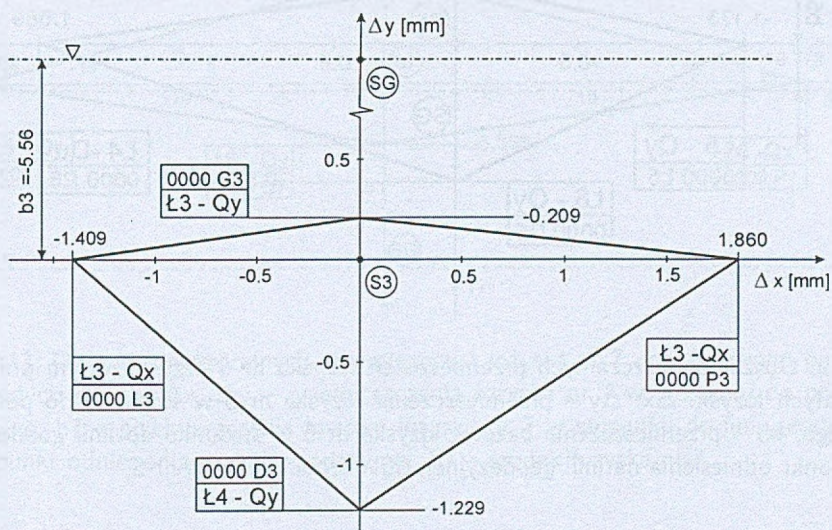
Rys. 2.4: Schemat kinostatycznej linii wałów oraz idea przemieszczeń łożysk turbospołu w stosunku do linii geodezyjnej zerowej, z objaśnieniem zastosowanych oznaczeń.



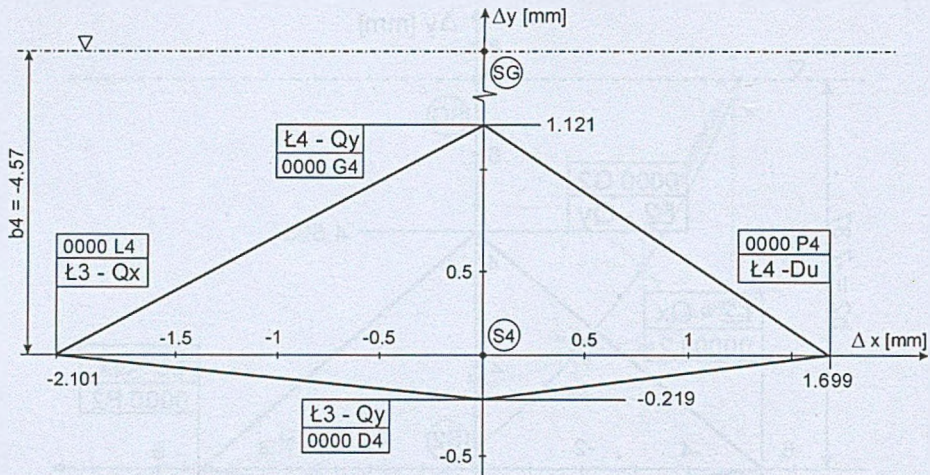
Rys. 2.5: Obszar dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 1 przy bazowym położeniu pozostałych łożysk. Δx , Δy – przemieszczenia łożyska nr 1 w stosunku do położenia bazowego, b_1 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 1 w stosunku do linii geodezyjnej, SG – punkt odniesienia na linii geodezyjnej, S1 – środek łożyska nr 1.



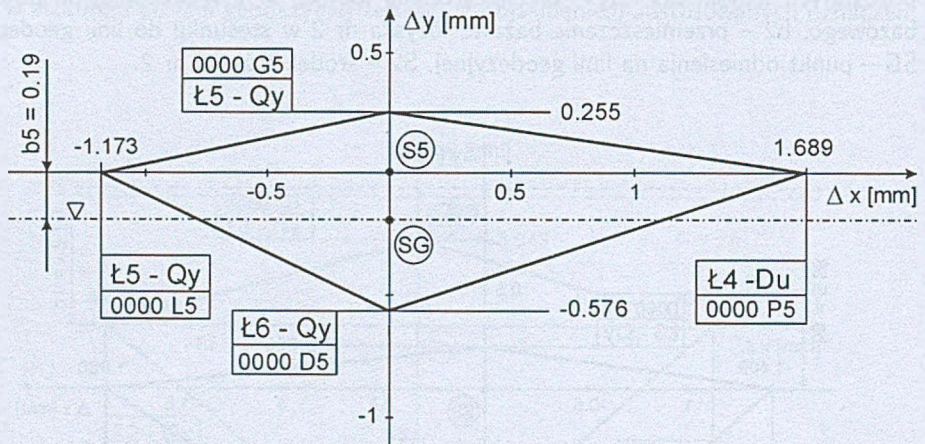
Rys. 2.6: Obszar dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 2 przy bazowym położeniu pozostałych łożysk. Δx , Δy – przemieszczenia łożyska nr 2 w stosunku do położenia bazowego, b_2 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 2 w stosunku do linii geodezyjnej, SG – punkt odniesienia na linii geodezyjnej, S2 – środek łożyska nr 2.



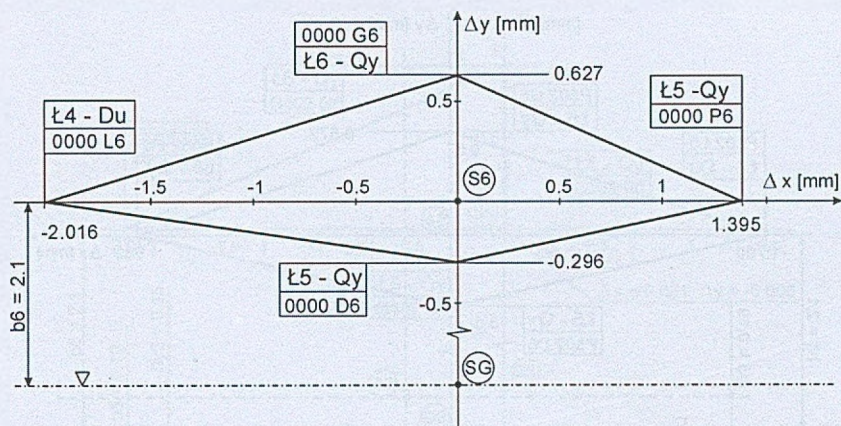
Rys. 2.7: Obszar dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 3 przy bazowym położeniu pozostałych łożysk. Δx , Δy – przemieszczenia łożyska nr 3 w stosunku do położenia bazowego, b_3 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 3 w stosunku do linii geodezyjnej, SG – punkt odniesienia na linii geodezyjnej, S3 – środek łożyska nr 3.



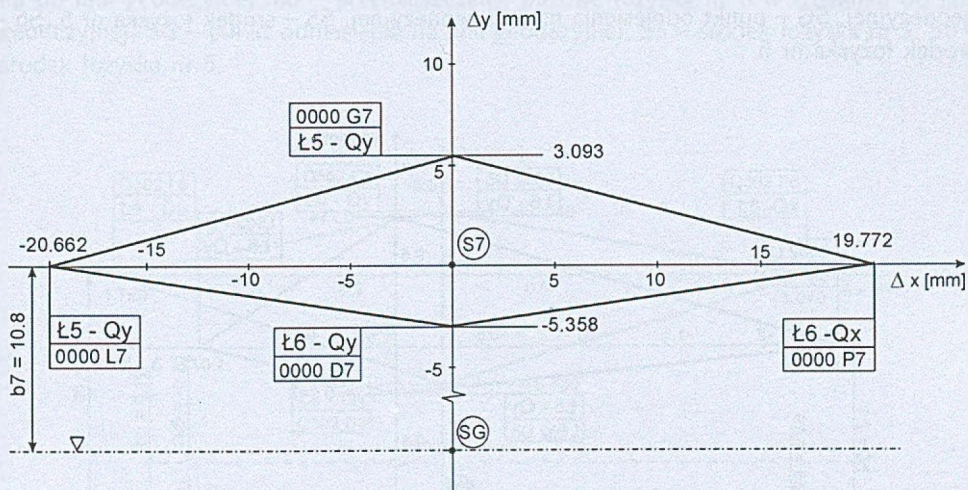
Rys. 2.8: Obszar dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 4 przy bazowym położeniu pozostałych łożysk. Δx , Δy – przemieszczenia łożyska nr 4 w stosunku do położenia bazowego, b_4 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 4 w stosunku do linii geodezyjnej, SG – punkt odniesienia na linii geodezyjnej, S4 – środek łożyska nr 4.



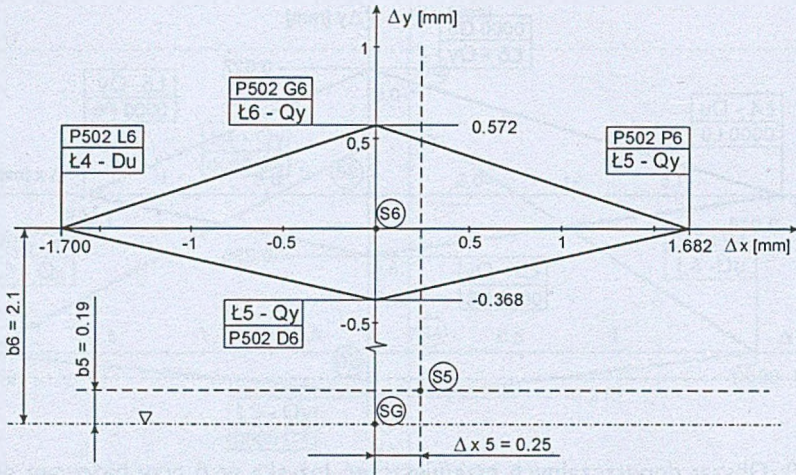
Rys. 2.9: Obszar dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 5 przy bazowym położeniu pozostałych łożysk. Δx , Δy – przemieszczenia łożyska nr 5 w stosunku do położenia bazowego, b_5 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 5 w stosunku do linii geodezyjnej, SG – punkt odniesienia na linii geodezyjnej, S5 – środek łożyska nr 5.



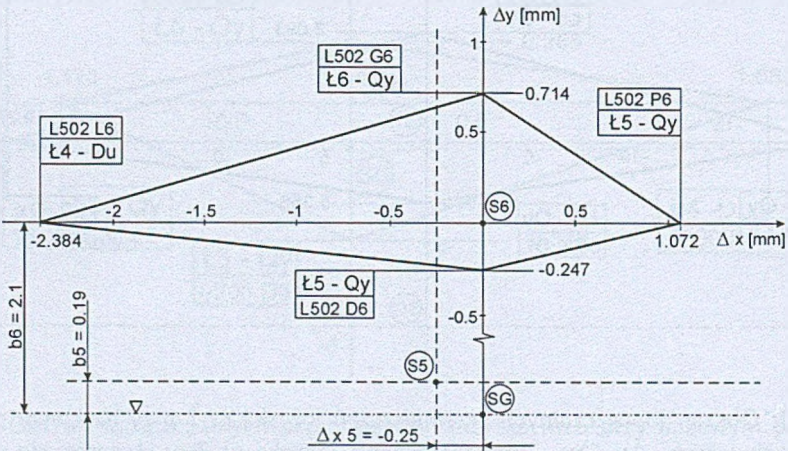
Rys. 2.10: Obszar dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 6 przy bazowym położeniu pozostałych łożysk. Δx , Δy – przemieszczenia łożyska nr 6 w stosunku do położenia bazowego, b_6 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 6 w stosunku do linii geodezyjnej, SG – punkt odniesienia na linii geodezyjnej, S6 – środek łożyska nr 6.



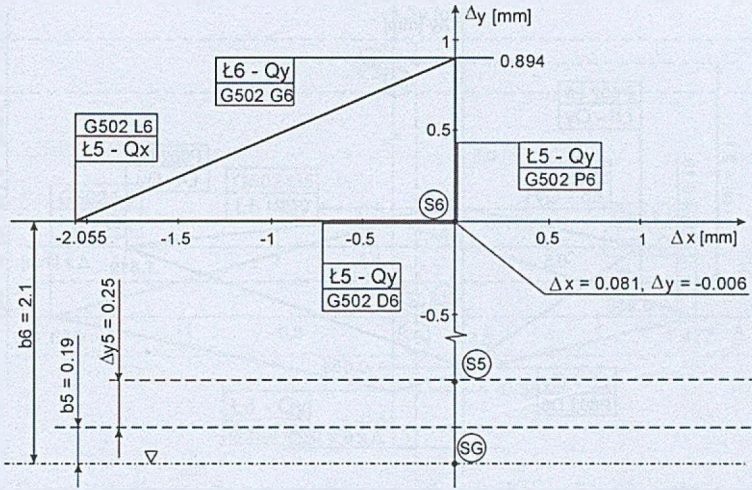
Rys. 2.11: Obszar dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 7 przy bazowym położeniu pozostałych łożysk. Δx , Δy – przemieszczenia łożyska nr 7 w stosunku do położenia bazowego, b_7 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 7 w stosunku do linii geodezyjnej, SG – punkt odniesienia na linii geodezyjnej, S7 – środek łożyska nr 7.



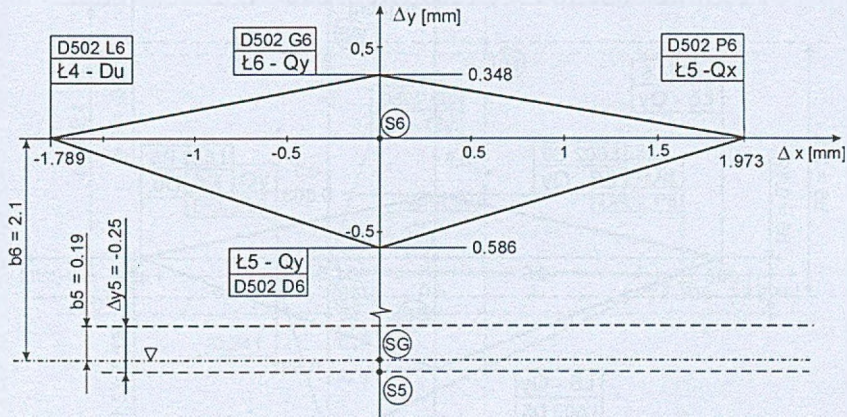
Rys. 2.12: Obszar dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 6 przy jednoczesnym przemieszczeniu łożyska nr 5 o $\Delta x_5 = 0.25$ mm. Δx , Δy – przemieszczenia łożyska nr 6 w stosunku do położenia bazowego, b_5 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 5 w stosunku do linii geodezyjnej, b_6 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 6 w stosunku do linii geodezyjnej, SG – punkt odniesienia na linii geodezyjnej, S5 – środek łożyska nr 5, S6 – środek łożyska nr 6.



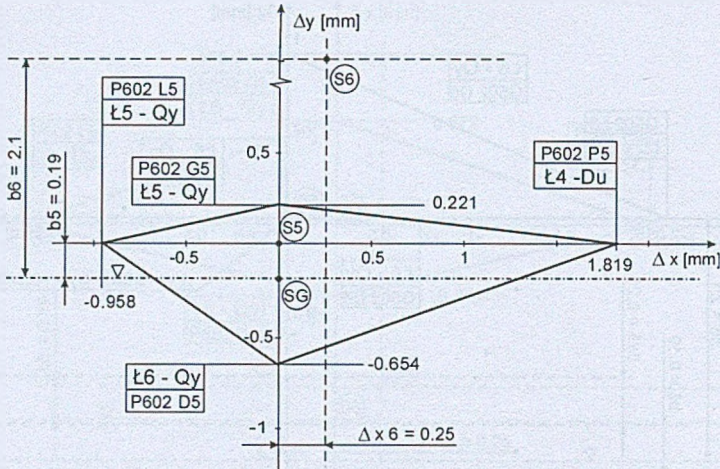
Rys. 2.13: Obszar dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 6 przy jednoczesnym przemieszczeniu łożyska nr 5 o $\Delta x_5 = -0.25$ mm. Δx , Δy – przemieszczenia łożyska nr 6 w stosunku do położenia bazowego, b_5 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 5 w stosunku do linii geodezyjnej, b_6 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 6 w stosunku do linii geodezyjnej, SG – punkt odniesienia na linii geodezyjnej, S5 – środek łożyska nr 5, S6 – środek łożyska nr 6.



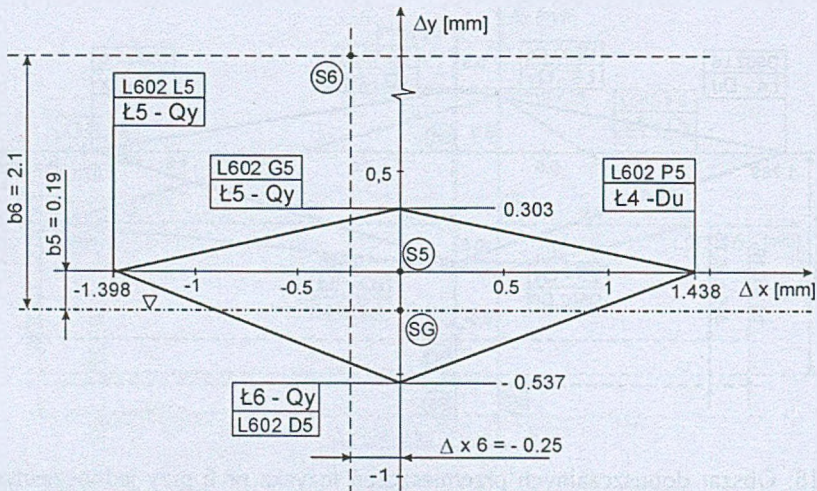
Rys. 2.14: Obszar dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 6 przy jednoczesnym przemieszczeniu łożyska nr 5 o $\Delta y_5 = 0.25 \text{ mm}$. Δx , Δy – przemieszczenia łożyska nr 6 w stosunku do położenia bazowego, b_5 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 5 w stosunku do linii geodezyjnej, b_6 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 6 w stosunku do linii geodezyjnej, SG – punkt odniesienia na linii geodezyjnej, S5 – środek łożyska nr 5, S6 – środek łożyska nr 6.



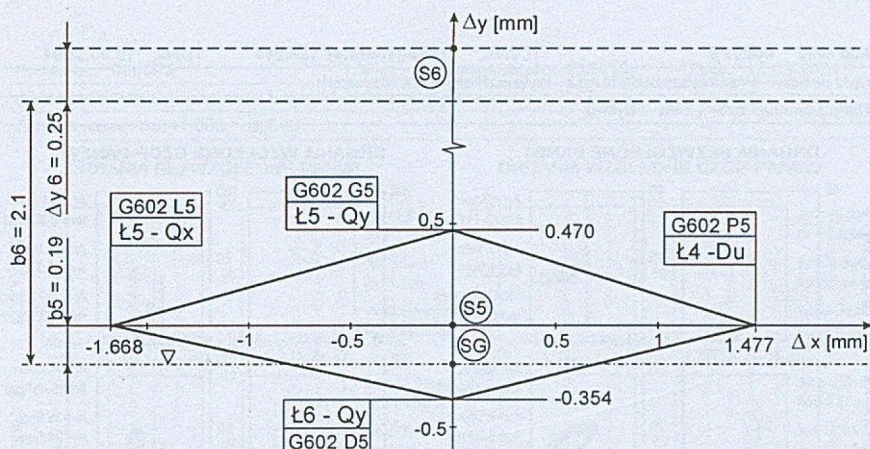
Rys. 2.15: Obszar dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 6 przy jednoczesnym przemieszczeniu łożyska nr 5 o $\Delta y_5 = -0.25 \text{ mm}$. Δx , Δy – przemieszczenia łożyska nr 6 w stosunku do położenia bazowego, b_5 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 5 w stosunku do linii geodezyjnej, b_6 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 6 w stosunku do linii geodezyjnej, SG – punkt odniesienia na linii geodezyjnej, S5 – środek łożyska nr 5, S6 – środek łożyska nr 6.



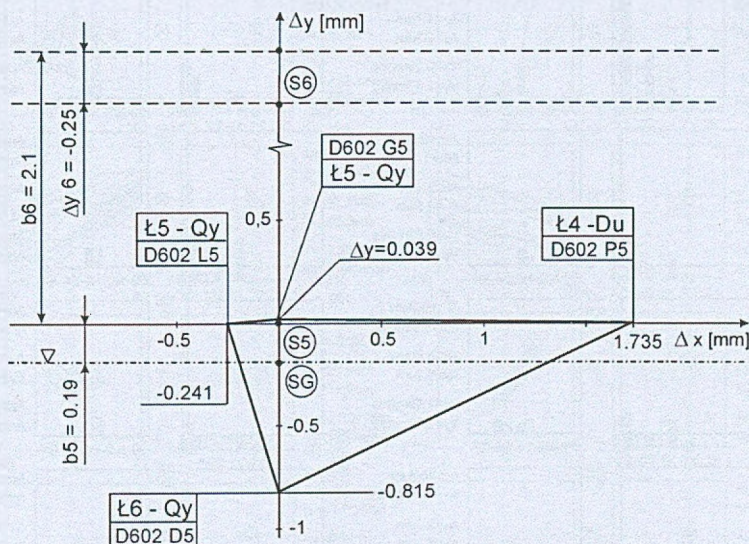
Rys. 2.16: Obszar dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 5 przy jednoczesnym przemieszczeniu łożyska nr 6 o $\Delta x_6 = 0.25$ mm. Δx , Δy – przemieszczenia łożyska nr 5 stosunku do położenia bazowego, b_5 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 5 w stosunku do linii geodezyjnej, b_6 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 6 w stosunku do linii geodezyjnej, SG – punkt odniesienia na linii geodezyjnej, S5 – środek łożyska nr 5, S6 – środek łożyska nr 6.



Rys. 2.17: Obszar dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 5 przy jednoczesnym przemieszczeniu łożyska nr 6 o $\Delta x_6 = -0.25$ mm. Δx , Δy – przemieszczenia łożyska nr 5 stosunku do położenia bazowego, b_5 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 5 w stosunku do linii geodezyjnej, b_6 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 6 w stosunku do linii geodezyjnej, SG – punkt odniesienia na linii geodezyjnej, S5 – środek łożyska nr 5, S6 – środek łożyska nr 6.

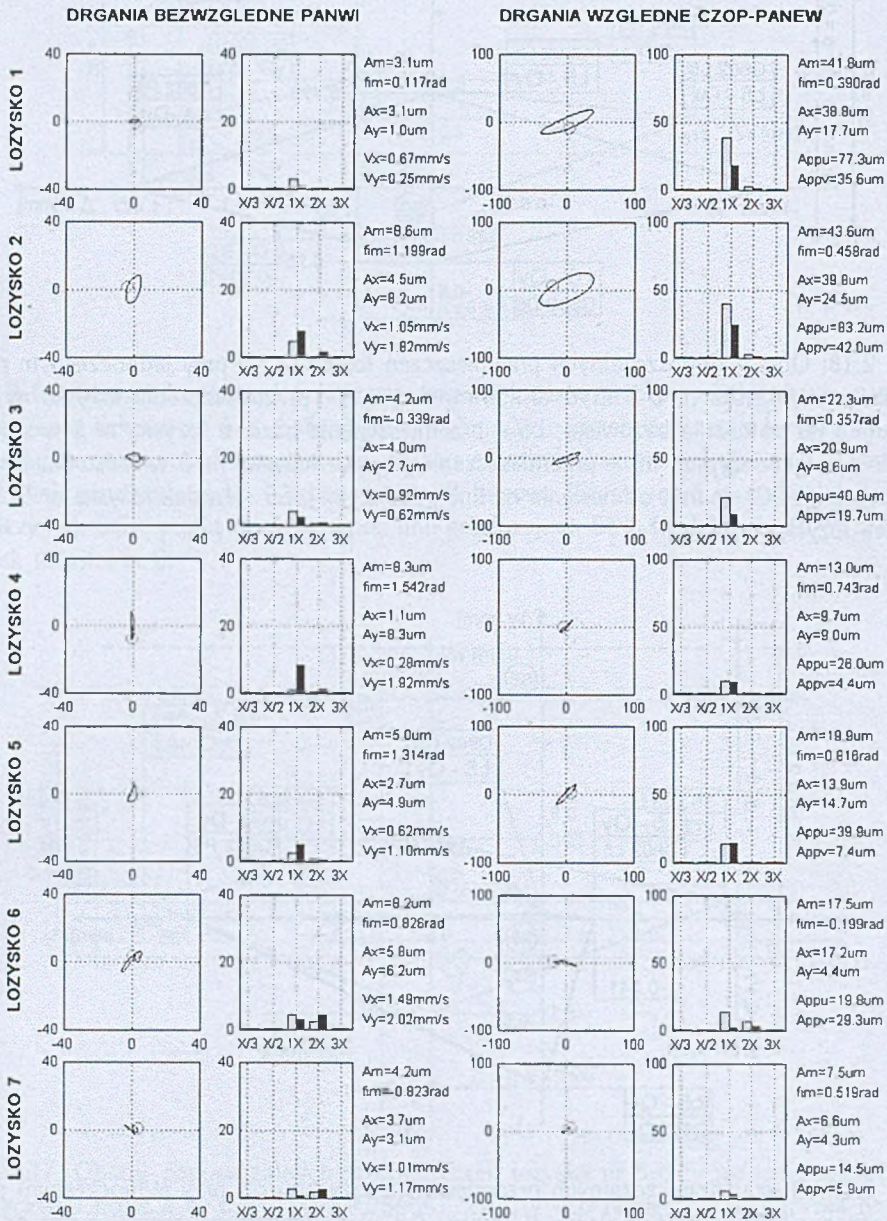


Rys. 2.18: Obszar dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 5 przy jednoczesnym przemieszczeniu łożyska nr 6 o $\Delta y_6 = 0.25 \text{ mm}$. Δx , Δy – przemieszczenia łożyska nr 5 w stosunku do położenia bazowego, b_5 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 5 w stosunku do linii geodezyjnej, b_6 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 6 w stosunku do linii geodezyjnej, SG – punkt odniesienia na linii geodezyjnej, S5 – środek łożyska nr 5, S6 – środek łożyska nr 6.



Rys. 2.19: Obszar dopuszczalnych przemieszczeń łożyska nr 5 przy jednoczesnym przemieszczeniu łożyska nr 6 o $\Delta y_6 = -0.25 \text{ mm}$. Δx , Δy – przemieszczenia łożyska nr 5 w stosunku do położenia bazowego, b_5 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 5 w stosunku do linii geodezyjnej, b_6 – przemieszczenie bazowe łożyska nr 6 w stosunku do linii geodezyjnej, SG – punkt odniesienia na linii geodezyjnej, S5 – środek łożyska nr 5, S6 – środek łożyska nr 6.

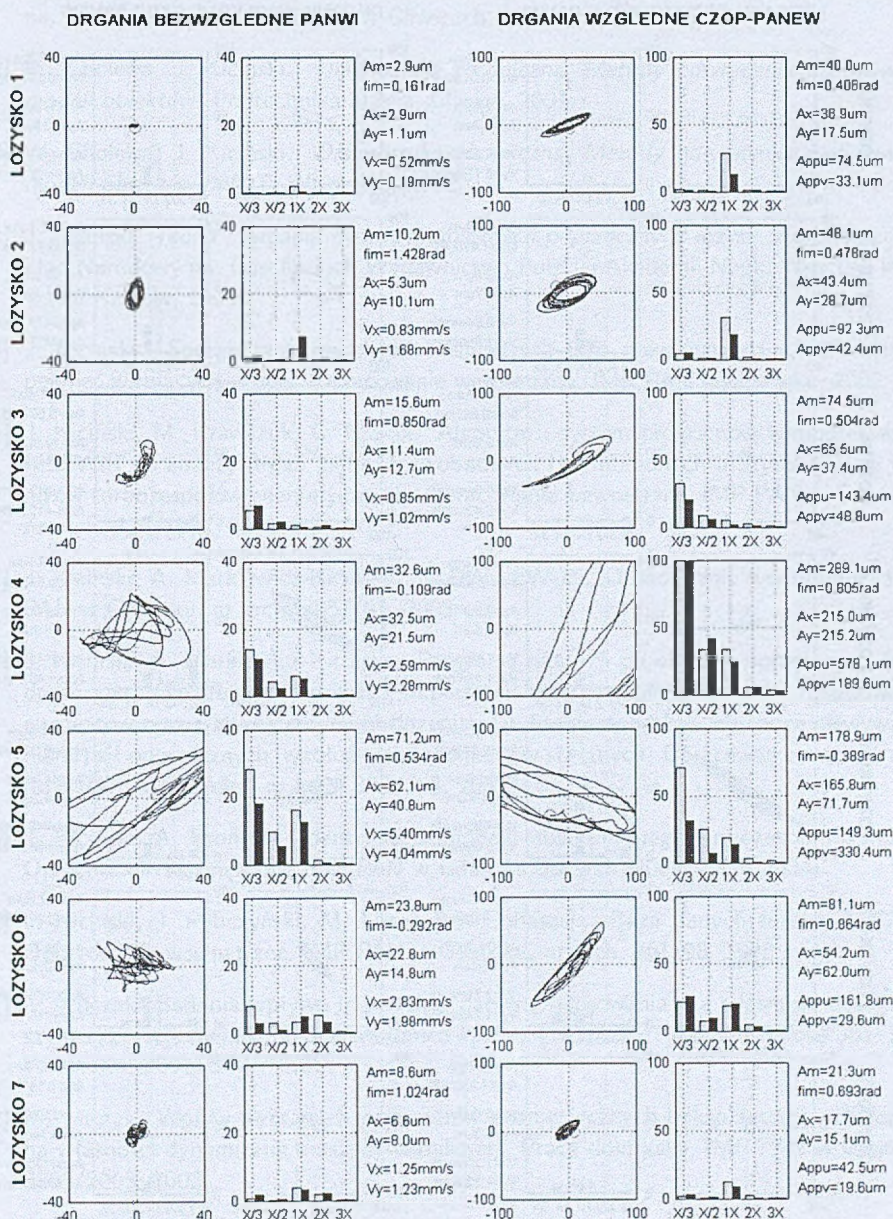
Kod karty: 0000P6 Obiekt: Turbogenerator 13K215 Data: 18.03.2004
 Opis defektu: Przemieszczenia łożysk - kryterium cisien w łożyskach
 Dane zmienne: dx6=1.395 dy6=0



Oznaczenia: A=amplituda przemieszczen, V=predkosc RMS, f=kat pochylenia maksymalnej przekatnej trajektorii, m=wartosc maksymalna, pp="peak to peak", x,y=osie pozioma i pionowa, u,v=osie pod katem pi/4 do x,y, wykresy wdm: szary - kier. x, czarny - kier. y

Rys. 2.20: Karta diagnostyczna jako przyklad stabilnej pracy łożysk.

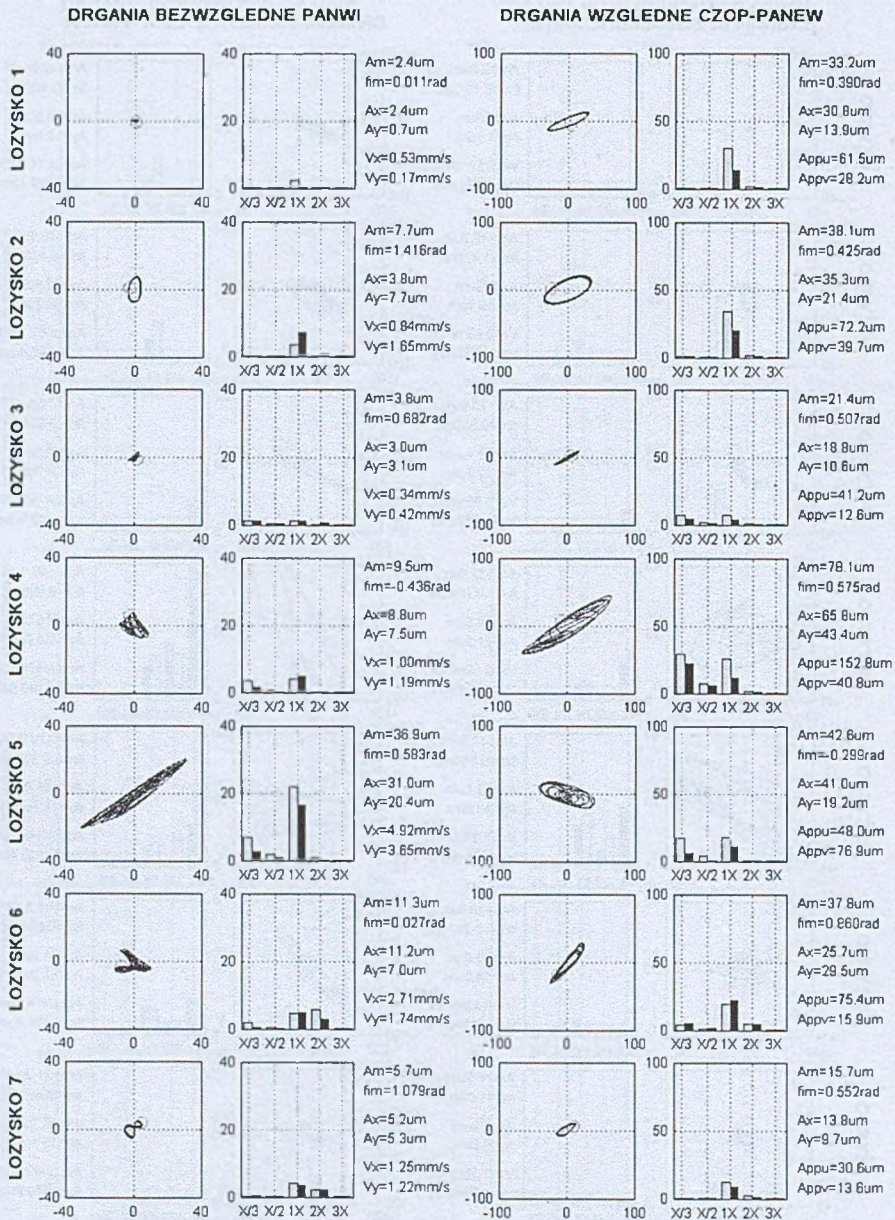
Kod karty: 0000P5	Obiekt: Turbogenerator 13K215	Data: 12.03.2004
Opis defektu: Przemieszczenia łożysk - kryterium drganiowe		
Dane zmienne: dx5=1.689 dy5=0		



Oznaczenia: A=amplituda przemieszczeń, V=prędkość RMS, fim=kąt pochYLENIA maksymalnej przekątnej trajektorii, m=wartość maksymalna, pp="peak to peak", x,y=osię pozioma i pionowa, u,v=osię pod kątem 45° do x,y, wykresy widm: szary - kier x, czarny - kier y.

Rys. 2.21: Karta diagnostyczna jako przykład silnej niestabilności łożysk.

Kod karty: 0000L6	Obiekt: Turbogenerator 13K215	Data: 12.03.2004
Opis defektu: Przemieszczenia łożysk - kryterium drganiowe		
Dane zmienne: dx6=-2.016 dy6=0		



Oznaczenia: A=amplituda przemieszczeń, V=prędkość RMS, f=kał pochylenia maksymalnej przekalnej trajektorii, m=wartość maksymalna, pp="peak to peak", x,y=osię pozioma i pionowa, u,v=osię pod kątem pi/4 do x,y, wykresy widm: szary - kier x, czarny - kier y

Rys. 2.22: Karta diagnostyczna jako przykład początku stabilności łożysk.

Bibliografia

- [2.1] W. Cholewa, A. Cholewa, P. Chrzanoski, K. Psiuk. Karty diagnostyczne obejmujące wybrane dane z systemu DT200 dla różnych stanów obciążenia. Opracowanie wewnętrzne, KPKM, Politechnika Śląska w Gliwicach, 2004.
- [2.2] W. Cholewa, J. Kiciński. *Diagnostyka techniczna. Metody odwracania nieliniowych modeli obiektów*. Politechnika Śląska, Gliwice, 2001.
- [2.3] W. Cholewa, J. Kiciński. *Diagnostyka techniczna. Metody odwracania nieliniowych modeli obiektów*. WNT, Warszawa, 2002.
- [2.4] J. Kiciński. *Teoria i badania hydrodynamicznych poprzecznych łożysk ślizgowych*. Zakład Narodowy im. Ossolińskich Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, Wrocław Warszawa Kraków, 1994.
- [2.5] J. Kiciński. Sprzężone formy drgań nieliniowych jako nowe narzędzie w badaniach pęknięć wirujących wałów. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, 2002.
- [2.6] J. Kiciński, M. Krawczuk, G. Nowak. Algorytm i system programów komputerowych MESWIR do analizy drgań giętnych swobodnych i wymuszonych ułożyskowanych wirników turbozespołów energetycznych. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 326/1277/91, 1991.
- [2.7] J. Kiciński, A. Markiewicz-Kicińska. NLDW-LEW-75. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 3857/03, 2003.
- [2.8] J. Kiciński, A. Markiewicz-Kicińska. Programy nldw-75 do obliczeń sprzężonych form drgań gietno-wzdłużno-skrętnych z imperfekcjami typu pęknięcia wału i rozosiowania elementów oraz z zewnętrznymi obciążeniami w formie dodatkowych (poza niewyważeniami) sił poprzecznych, wzdłużnych i momentów skrętnych. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 3094/03, 2003.
- [2.9] J. Kiciński, A. Prońska. Identyfikacja modelu obliczeniowego turbozespołu 13K215. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 4068/2004, 2004.
- [2.10] J. Kiciński, J. Rybczyński, M. Łuczak, S. Banaszek. Baza danych turbiny 13K215. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 361/98, 1998.
- [2.11] M. Łuczak. Badania wpływu imperfekcji panwi (zukosowania) na własności dużej maszyny energetycznej. *Tribologia*, wolumen 1/2002 (181) serii *Tribologia*, strony 351–364, Warszawa, 2002. SIMPRESS.
- [2.12] M. Łuczak. Wpływ wybranych parametrów geometrycznych i eksploatacyjnych łożysk na własności dynamiczne maszyny wirnikowej. Praca doktorska, IMP PAN w Gdańsku 3252/2003, 2002.
- [2.13] M. Łuczak. *Wpływ defektu w postaci zukosowania panwi na własności dynamiczne turbozespołu 200MW*, wolumen Nr 4/2004 (196) serii *Tribologia ISSN 0208 7774 Rok XXXV*. 2004.
- [2.14] J. Rybczyński. Oprogramowanie RMAT47 do analizy wyników obliczeń dynamiki wirników programem NLDW. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 366/99, 1999.

- [2.15] J. Rybczyński. Program komputerowy RMAT 55 do tworzenia kart diagnostycznych maszyn wirnikowych. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 171/2000, 2000.
- [2.16] J. Rybczyński. Oprogramowanie do analizy wyników obliczeń programami NLDW. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 3487/2003, 2003.
- [2.17] J. Rybczyński. Analysis of acceptable nonalignment of bearings of large power turboset. wolumen 30/2 2004, strony 97–100, 2004.
- [2.18] J. Rybczyński. Dopuszczalne przemieszczenia pary sąsiadujących łożysk turbozespołu w stosunku do konstrukcyjnej linii wałów. (acceptable displacements of the pair of neighboring bearings of turboset in relation to constructional shaft line.). *Tribologia*, wolumen Vol. 4 serii *Tribologia*, strony 142–150, 2004.
- [2.19] J. Rybczyński. Przemieszczenia termiczne i montażowe podpór łożyskowych. klasa defektu I. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 4155/2004, 2004.
- [2.20] J. Rybczyński, S. Banaszek. Generowanie przypadku bazowego dla turbiny 13K215. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 3718/2003, 2003.

Rozdział 3

Przemieszczenia termiczne i montażowe podpór łożyskowych. Obliczenia uzupełniające

Józef Rybczyński

W ramach PBZ-K015/T10/2001 wykonane zostały dodatkowe, uzupełniające obliczenia turbos zespołu 13K215 [3.2] ze względu na potrzeby, które wyniknęły po analizie materiału zawartego w opracowaniu [3.1].

Obliczenia będące przedmiotem niniejszego opracowania zostały wykonane dla maszyny z łożyskami przemieszczonymi o wielkość równą trzeciej części przemieszczeń dopuszczalnych, obliczonych uprzednio i przedstawionych w opracowaniu [3.1]. Obliczono razem 28 przypadków dla indywidualnych przemieszczeń łożysk (4 kierunki przemieszczeń x 7 łożysk).

Wszystkie materiały związane z tymi obliczeniami znajdują się na dysku CDROM. W katalogu OBL_UZUP zawarte są następujące elementy pracy:

- katalogi typu 0000D1XX z danymi do obliczeń i wynikami obliczeń (28 katalogów),
- katalog KAR_DIAG_3 z kartami diagnostycznymi (po 28 kart w formacie *.fig i *.tif),
- tabele: tab1a.xls, tab3a.xls, tab4a.xls, tab7a.xls,
- plik obl_uzup.doc z krótkim opracowaniem uzupełniającym.

Do niniejszych obliczeń mają zastosowanie oznaczenia i objaśnienia zawarte w tamtym opracowaniu. System oznaczeń katalogów jest identyczny jak w obliczeniach poprzednich, natomiast nazwy plików różnią się od nazw katalogów dodaną na końcu liczbą 11 ze względu na wymóg ośmioznakowych nazw plików w używanych programach obliczeniowych. Np. w katalogu 0000D1 znajdują się pliki 0000D111.*

Tabele: Tab.3.1, Tab.3.2, Tab.3.3, Tab.3.4 są odpowiednikami tabel Tab.2.1, Tab.2.3, Tab.2.4, Tab.2.7 zawartych w rozdziale 2, nie wymagają zatem szczegółowych objaśnień.

Tab. 3.1: Dopuszczalne przemieszczenia łożysk obliczone przy przemieszczaniu jednego łożyska

Nr	Seria	Delta max	1/3*Delta max
1	0000P1	dx1= 13.765	4,588
2	0000L1	dx1= -14.558	-4,853
3	0000G1	dy1= 3.943	1,314
4	0000D1	dy1= -12.277	-4,092
5	0000P2	dx2= 5.170	1,723
6	0000L2	dx2= -5.392	-1,797
7	0000G2	dy2= 4.503	1,501
8	0000D2	dy2= -0.732	-0,244
9	0000P3	dx3= 1.860	0,620
10	0000L3	dx3= -1.409	-0,470
11	0000G3	dy3= 0.209	0,070
12	0000D3	dy3= -1.229	-0,410
13	0000P4	dx4= 1.699	0,566
14	0000L4	dx4= -2.101	-0,700
15	0000G4	dy4= 1.121	0,374
16	0000D4	dy4= -0.219	-0,073
17	0000P5	dx5= 1.689	0,563
18	0000L5	dx5= -1.173	-0,391
19	0000G5	dy5= 0.255	0,085
20	0000D5	dy5= -0.576	-0,192
21	0000P6	dx6= 1.395	0,465
22	0000L6	dx6= -2.016	-0,672
23	0000G6	dy6= 0.627	0,209
24	0000D6	dy6= -0.296	-0,099
25	0000P7	dx7= 19.772	6,591
26	0000L7	dx7= -20.662	-6,887
27	0000G7	dy7= 3.093	1,031
28	0000D7	dy7= -5.358	-1,786

Tab. 3.2: Amplitudy drgań względnych Appu, Appv, dla przemieszczeń jednego łożyska.

Przypadek (katalog)	Przemieszczenie		Łożysko nr 1		Łożysko nr 2		Łożysko nr 3		Łożysko nr 4		Łożysko nr 5		Łożysko nr 6		Łożysko nr 7	
	Delta X (mm)	Delta Y (mm)	Appu (µm)	Appv (µm)	Appu (µm)	Appv (µm)	Appu (µm)	Appv (µm)	Appu (µm)	Appv (µm)	Appu (µm)	Appv (µm)	Appu (µm)	Appv (µm)	Appu (µm)	Appv (µm)
0000P1	4,588	0,000	25,925	18,686	33,317	20,416	10,503	5,931	21,630	3,811	29,165	10,332	39,368	12,509	18,081	16,775
0000L1	-4,853	0,000	29,177	11,743	61,474	79,750	41,470	15,268	23,011	5,504	32,296	11,835	41,014	12,372	19,710	16,988
0000G1	0,000	1,314	82,420	33,376	82,164	44,749	41,491	17,119	27,665	5,507	35,722	12,747	42,498	13,809	20,743	17,355
0000D1	0,000	-4,092	73,903	34,523	73,711	33,038	39,462	15,726	26,748	5,390	35,294	12,459	42,944	13,791	20,206	17,284
0000P2	1,723	0,000	37,625	14,840	59,860	74,038	31,233	10,495	22,891	5,738	32,628	11,960	39,896	12,402	20,058	16,988
0000L2	-1,797	0,000	26,444	16,171	33,172	20,523	10,592	6,965	22,374	2,811	28,942	10,172	39,239	12,397	17,864	16,751
0000D2	0,000	-0,244	82,388	33,572	81,629	42,655	41,403	16,982	27,433	5,250	35,544	12,640	42,962	13,761	20,307	17,337
0000P3	0,620	0,000	85,083	33,877	102,286	41,669	39,158	25,303	29,267	3,723	33,051	11,711	40,409	12,947	19,045	17,045
0000L3	-0,470	0,000	74,350	29,220	76,907	46,519	34,231	9,831	25,770	7,785	36,182	12,935	41,949	13,545	20,820	17,258
0000G3	0,000	0,070	82,248	33,749	81,161	41,451	41,219	16,808	27,289	5,022	35,220	12,513	42,954	13,794	20,179	17,276
0000D3	0,000	-0,410	79,979	33,055	77,605	36,314	43,604	17,276	27,923	7,120	37,238	13,168	42,394	14,033	20,955	17,313
0000P4	0,566	0,000	77,373	31,603	76,595	43,572	33,815	9,374	24,028	6,931	37,009	11,782	41,756	13,890	20,448	16,991
0000L4	-0,700	0,000	70,421	28,079	71,073	35,703	26,008	18,880	32,658	4,110	33,933	13,167	42,841	12,533	20,227	17,419
0000G4	0,000	0,374	81,419	33,362	79,479	38,196	44,467	17,793	27,282	6,914	37,243	13,097	42,660	14,025	21,090	17,349
0000D4	0,000	-0,073	82,084	33,735	80,870	41,081	40,960	16,675	28,071	5,201	35,512	12,633	42,311	13,736	20,651	17,337
0000P5	0,563	0,000	78,081	31,878	77,337	39,471	34,638	13,803	38,663	8,466	33,226	17,316	48,202	10,598	22,151	18,464
0000L5	-0,391	0,000	83,418	34,367	82,013	40,808	44,462	17,590	23,518	4,465	37,767	9,843	38,027	15,129	19,850	16,312
0000G5	0,000	0,085	81,592	33,498	80,384	40,549	40,790	16,450	28,900	5,698	35,900	12,865	42,247	13,904	20,681	17,335
0000D5	0,000	-0,192	82,649	34,011	81,293	40,435	43,544	17,390	26,758	5,757	37,133	12,711	42,652	13,696	20,597	17,373
0000P6	0,465	0,000	83,984	34,624	82,611	40,931	44,967	18,628	38,663	8,466	33,226	17,316	48,202	10,598	22,151	18,464
0000L6	-0,672	0,000	77,616	31,570	76,883	39,405	34,521	12,803	37,649	9,389	33,053	17,485	47,784	10,168	22,174	18,486
0000G6	0,000	0,209	82,722	34,039	81,395	40,625	43,235	17,335	26,645	5,478	37,091	12,691	42,801	13,696	20,646	17,395
0000D6	0,000	-0,099	81,614	33,501	80,380	40,402	41,274	16,566	28,636	5,662	35,806	12,816	42,905	13,995	20,161	17,228
0000P7	6,591	0,000	77,371	31,482	76,541	39,424	33,976	12,557	38,417	10,890	34,327	18,226	48,020	9,699	22,027	18,671
0000L7	-6,887	0,000	85,415	35,302	84,114	41,596	46,744	19,595	23,969	3,204	39,004	8,722	31,893	16,803	18,444	15,139
0000D7	0,000	1,031	81,568	33,475	80,328	40,599	40,997	16,553	28,767	5,687	35,782	12,813	42,805	13,973	20,068	17,187
0000G7	0,000	-1,786	82,643	33,997	81,328	40,456	43,136	17,249	27,780	5,700	37,290	12,783	42,534	13,639	20,743	17,381

Tab. 3.3: Prędkości drgań bezwzględnych V_{rmsx} , V_{rmsy} , dla przemieszczeń jednego łożyska

Przypadek (katalog)	Przemieszczenie		Łożysko nr 1		Łożysko nr 2		Łożysko nr 3		Łożysko nr 4		Łożysko nr 5		Łożysko nr 6		Łożysko nr 7	
	Delta X [mm]	Delta Y [mm]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]	V_{rmsx} [mm/s]	V_{rmsy} [mm/s]
0000P1	4.588	0.000	0.239	0.246	1.273	1.725	0.254	0.487	1.107	0.288	0.453	1.574	1.812	2.045	1.151	1.123
0000L1	-4.853	0.000	0.707	0.406	1.167	1.711	1.121	1.144	1.070	0.641	1.619	1.835	2.066	1.196	1.117	1.148
0000G1	0.000	1.314	0.678	0.305	1.024	1.764	0.883	0.746	0.294	1.104	0.638	1.716	1.915	2.051	1.191	1.148
0000D1	0.000	-4.092	0.635	0.140	1.054	1.823	0.724	0.354	0.291	1.120	0.596	1.645	1.900	2.043	1.194	1.135
0000P2	1.723	0.000	0.644	0.378	1.102	1.692	1.134	1.000	0.274	1.131	0.679	1.507	1.829	2.066	1.179	1.129
0000L2	-1.797	0.000	0.233	0.235	1.299	1.741	0.275	0.577	0.306	1.062	0.414	1.694	1.805	2.034	1.144	1.123
0000G2	0.000	1.501	0.616	0.135	1.033	1.834	0.653	0.344	0.326	1.157	0.636	1.574	1.921	2.040	1.184	1.150
0000D2	0.000	-0.244	0.670	0.269	1.018	1.764	0.875	0.685	0.289	1.094	0.598	1.707	1.905	2.055	1.200	1.136
0000P3	0.620	0.000	0.496	0.246	1.436	1.769	0.731	0.819	0.359	0.997	0.425	1.993	1.832	2.017	1.140	1.140
0000L3	-0.470	0.000	0.659	0.247	0.935	1.827	0.940	0.588	0.387	1.245	0.730	1.407	1.879	2.065	1.197	1.144
0000G3	0.000	0.070	0.667	0.251	1.016	1.764	0.868	0.650	0.288	1.098	0.611	1.730	1.912	2.057	1.203	1.137
0000D3	0.000	-0.410	0.654	0.202	0.991	1.804	0.712	0.476	0.349	1.172	0.653	1.517	1.934	2.042	1.192	1.153
0000P4	0.566	0.000	0.635	0.246	0.884	1.800	0.939	0.596	0.412	1.367	0.643	1.295	1.901	2.101	1.216	1.130
0000L4	-0.700	0.000	0.556	0.185	1.106	1.683	0.767	0.785	0.373	0.924	0.638	2.360	1.874	1.975	1.166	1.148
0000G4	0.000	0.374	0.665	0.226	0.999	1.796	0.753	0.527	0.338	1.166	0.608	1.483	1.962	2.055	1.198	1.150
0000D4	0.000	-0.073	0.665	0.248	1.013	1.762	0.852	0.638	0.293	1.102	0.631	1.756	1.909	2.047	1.187	1.148
0000P5	0.563	0.000	0.635	0.216	0.968	1.725	0.695	0.589	0.401	0.822	1.535	2.422	2.086	1.885	1.230	1.153
0000L5	-0.391	0.000	0.678	0.253	1.022	1.796	0.886	0.608	0.265	1.339	0.442	1.336	1.892	2.137	1.180	1.133
0000G5	0.000	0.085	0.662	0.242	1.006	1.761	0.827	0.622	0.307	1.112	0.682	1.778	1.868	2.031	1.182	1.153
0000D5	0.000	-0.192	0.672	0.244	1.016	1.773	0.846	0.615	0.281	1.107	0.492	1.533	1.981	2.080	1.187	1.137
0000P6	0.465	0.000	0.584	0.250	1.042	1.790	0.902	0.614	0.270	1.319	0.384	1.354	1.854	2.156	1.183	1.126
0000L6	-0.672	0.000	0.631	0.221	0.951	1.737	0.680	0.573	0.411	0.843	1.588	2.338	2.078	1.866	1.206	1.168
0000G6	0.000	0.209	0.673	0.245	1.018	1.772	0.854	0.620	0.275	1.100	0.493	1.558	1.975	2.078	1.183	1.136
0000D6	0.000	-0.099	0.662	0.242	1.005	1.762	0.827	0.621	0.305	1.113	0.677	1.763	1.858	2.036	1.199	1.144
0000P7	6.591	0.000	0.628	0.223	0.948	1.736	0.675	0.576	0.421	0.822	1.552	2.185	2.123	1.818	1.180	1.178
0000L7	-6.887	0.000	0.696	0.255	1.067	1.808	0.937	0.595	0.287	1.347	0.330	1.314	1.775	2.170	1.139	1.125
0000G7	0.000	1.031	0.661	0.243	1.005	1.762	0.827	0.624	0.306	1.114	0.680	1.760	1.843	2.030	1.198	1.145
0000D7	0.000	-1.786	0.672	0.244	1.018	1.772	0.850	0.615	0.284	1.094	0.514	1.597	1.972	2.076	1.181	1.136

Tab. 3.4: Reakcje łożyskowe Rx, Ry dla przemieszczeń jednego łożyska

Przypadek (katalog)	Przemieszczenie		Łożysko nr 1		Łożysko nr 2		Łożysko nr 3		Łożysko nr 4		Łożysko nr 5		Łożysko nr 6		Łożysko nr 7	
	Delta X [mm]	Delta Y [mm]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rx [N]	Ry [N]
0000P1	4,588	0,000	16 166	40 754	-37 997	63 474	17 312	165 060	3 331	184 820	-5 612	258 400	4 927	290 530	-758	254 320
0000L1	-4,853	0,000	-19 663	41 957	39 091	59 471	-28 620	173 900	8 018	177 760	-6 041	259 160	5 409	290 850	-826	254 260
0000G1	0,000	1,314	-1 086	46 765	-1 113	49 198	-3 558	179 800	4 583	177 440	-6 684	258 570	6 123	291 390	-896	254 200
0000D1	0,000	-4,092	-1 053	25 353	-1 231	96 323	-3 264	146 920	4 332	185 350	-6 643	257 900	6 128	291 310	-899	254 220
0000P2	1,723	0,000	-15 018	42 137	35 867	58 484	-48 442	177 550	27 509	174 110	-5 828	260 760	3 997	290 000	-717	254 320
0000L2	-1,797	0,000	13 275	40 515	-38 778	64 899	39 647	159 510	-16 520	190 230	-5 037	256 950	5 483	290 930	-761	254 330
0000G2	0,000	1,501	-1 047	28 459	-1 298	96 593	-2 938	122 550	3 975	208 580	-6 402	255 570	5 960	291 400	-882	254 210
0000D2	0,000	-0,244	-1 081	43 689	-1 124	54 813	-3 550	179 820	4 579	174 580	-6 683	259 030	6 125	291 200	-898	254 220
0000P3	0,620	0,000	1 628	40 722	-15 722	65 037	46 462	155 970	-40 013	194 590	-1 169	254 410	7 046	292 410	-863	254 230
0000L3	-0,470	0,000	-3 341	41 832	11 132	59 148	-45 949	177 450	42 171	173 530	-9 118	261 780	3 114	289 230	-640	254 380
0000G3	0,000	0,070	-1 079	41 992	-1 125	58 345	-3 570	179 830	4 609	172 040	-6 721	259 720	6 155	291 210	-901	254 220
0000D3	0,000	-0,410	-1 050	39 076	-1 305	74 069	-2 849	124 900	3 934	222 250	-6 726	250 700	6 288	292 230	-923	254 130
0000P4	0,566	0,000	-1 325	41 797	6 339	59 004	-48 455	178 900	53 954	171 110	-25 905	266 480	13 567	285 290	-808	254 760
0000L4	-0,700	0,000	-1 043	40 779	-8 731	65 288	45 586	153 500	-50 788	198 390	18 410	248 250	-5 362	297 390	-703	253 760
0000G4	0,000	0,374	-1 064	40 992	-1 267	68 010	-2 884	132 550	3 730	222 450	-5 603	237 590	5 271	302 020	-815	253 740
0000D4	0,000	-0,073	-1 079	41 672	-1 125	59 222	-3 570	179 440	4 607	170 950	-6 699	262 580	6 131	289 190	-897	254 300
0000P5	0,563	0,000	-1 189	41 239	-746	62 525	-1 078	164 130	-14 166	190 350	67 561	238 840	-58 130	307 710	5 116	252 560
0000L5	-0,391	0,000	-1 114	41 392	-841	61 166	-7 129	171 330	18 775	176 530	-55 690	273 530	48 153	277 810	-4 787	255 600
0000G5	0,090	0,085	-1 078	41 579	-1 130	60 471	-3 562	173 310	4 684	174 580	-7 123	274 020	6 515	277 910	-937	255 490
0000D5	0,000	-0,192	-1 100	41 453	-1 054	61 388	-3 682	167 340	4 285	190 960	-4 671	223 880	4 294	320 960	-704	251 380
0000P6	0,465	0,000	-1 126	41 372	-1 089	61 383	-2 771	170 250	12 413	177 650	-58 326	273 250	54 985	277 830	-6 717	255 620
0000L6	-0,672	0,000	-1 165	41 292	-387	62 103	-7 519	165 990	-4 260	188 830	68 532	237 410	-65 476	309 390	7 643	252 340
0000G6	0,000	0,209	-1 104	41 473	-1 059	61 059	-3 774	170 430	4 381	186 310	-4 727	226 000	4 329	321 320	-707	250 760
0000D6	0,000	-0,099	-1 078	41 566	-1 130	60 639	-3 562	171 870	4 690	176 520	-7 170	274 190	6 563	276 690	-944	255 890
0000P7	6,591	0,000	-1 149	41 338	-638	61 784	-6 214	167 440	4 682	187 310	64 202	237 750	-79 377	309 450	15 861	252 280
0000L7	-6,887	0,000	-1 139	41 345	-987	61 541	-2 908	169 800	5 675	176 570	-77 151	280 770	91 898	270 980	-18 020	256 340
0000G7	0,000	1,031	-1 059	41 619	-1 225	60 382	-3 236	172 700	4 432	177 270	-7 354	274 300	6 779	273 840	-969	257 260
0000D7	0,000	-1,786	-1 105	41 473	-1 020	61 050	-3 833	170 530	4 479	182 560	-4 920	231 950	4 489	320 770	-722	249 010

Bibliografia

- [3.1] J. Rybczyński. Przemieszczenia termiczne i montażowe podpór łożyskowych. Klasa defektu I. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 4155/2004, 2004.
- [3.2] J. Rybczyński. Przemieszczenia termiczne i montażowe podpór łożyskowych. Klasa defektu I. Obliczenia uzupełniające. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 4263/2004, 2004.

Rozdział 4

Badania symulacyjne wpływu defektu w postaci przekoszenia panwi na własności dynamiczne turbozespołu 200MW

Marcin Łuczak

4.1. Wstęp

Turbozespoły dużej mocy są maszynami „krytycznymi” – wymaga się od nich stabilnej, niezawodnej pracy oraz pewności ruchowej.

Wymóg bezawaryjnej pracy stał się przyczyną opracowania, wdrożenia i doskonalenia m.in. systemów nadzoru, które monitorują i diagnozują istotne - z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu maszyny - parametry jej pracy w czasie rzeczywistym. Dzięki doskonaleniu i ulepszaniu narzędzi numerycznych i pomiarowych, możliwe staje się monitorowanie coraz liczniejszej grupy parametrów pracy.

Wymagania stawiane systemom nadzoru można określić jako:

- możliwość bieżącej oceny stanu dynamicznego maszyny podczas pracy,
- ostrzeżenie o pojawiających się uszkodzeniach,
- prognozowanie dalszej pracy.

Oczekiwaniom tym mogą sprostać jedynie zaawansowane systemy diagnostyczne m.in. takie, które wykorzystują „sztuczną inteligencję” rozumianą jako „dziedzina informatyki dotycząca metod i technik wnioskowania symbolicznego przez komputer oraz symbolicznej reprezentacji wiedzy stosowanej podczas takiego wnioskowania”.

Najważniejszym elementem systemu diagnostycznego jest baza wiedzy. Jest to, ogólnie rzecz ujmując, zbiór zależności typu **defekt-symptom** zwanych **relacjami diagnostycznymi**. Informacje zawarte w bazie wiedzy mogą pochodzić z wielu źródeł, które generalnie można podzielić na dwie grupy. Pierwsza jest to wiedza i doświadczenie ekspertów, dane eksploatacyjne gromadzone podczas pracy maszyny oraz dane statystyczne.

Drugą grupę stanowią wyniki badań symulacyjnych i modelowych oraz wyniki eksperymentów numerycznych. Eksperyment numeryczny jest bardzo ważnym i często jedynym źródłem relacji diagnostycznych, gdyż badania modelowe na obiekcie rzeczywistym są często niemożliwe do przeprowadzenia ze względu na ich olbrzymi koszt. Pozyskiwanie relacji diagnostycznych w drodze obliczeń określa się jako diagnostykę według modelu.

4.2. Cel badań

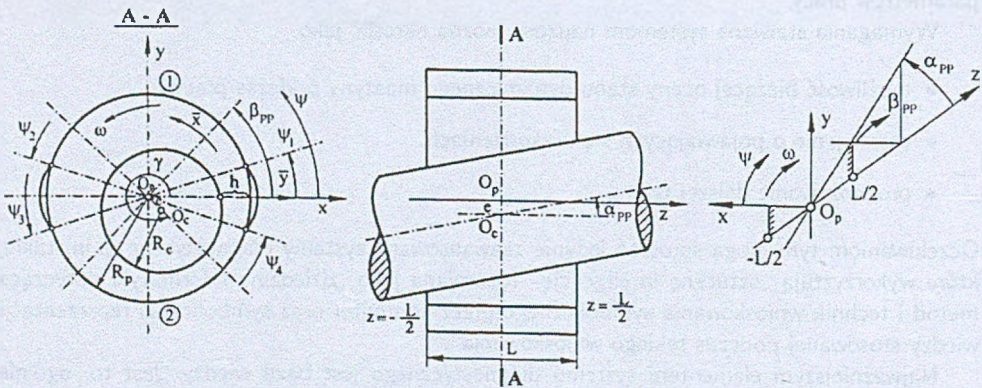
Dotychczas realizowane obliczenia zakładały równoległe ułożenie czopa względem panwi. Jednak doświadczenia z praktyki eksploatacyjnej wskazują na istnienie niedoskonałości geometrii układu czop - panew. Pojawiają się tzw. zatarcia krawędziowe które są skutkiem fizycznego kontaktu czopa z materiałem panwi. Aby prowadzić obliczenia uwzględniające tego typu defekty konieczne było zmodyfikowanie istniejących programów.

W tym celu rozpoczęto prowadzenie badań umożliwiających poznanie wpływu zukosowania panwi na własności dynamiczne układu wirnik - łożysko. Modyfikacja modelu numerycznego miała na celu uwzględnienie zmiany geometrii szczeliny smarnej (Rys.4.1). Zmiana geometrii dotyczyła niewspółosiowego położenia czopa względem panwi (zukosowania). Dotychczasowy model zakładał symetryczny rozkład ciśnienia w łożysku. Modyfikacja spowodowała uzależnienie ciśnienia od dodatkowego parametru jakim jest szerokość panwi. Zukosowanie można przeprowadzać w dowolnej płaszczyźnie, której położenie jest określone kątami α i β . Dzięki tej modyfikacji można modelować i przeprowadzać obliczenia własności dynamicznych (drżania swobodne i wymuszone) układu wirnik-łożyska.

Celem prowadzonych badań symulacyjnych jest poznanie wpływu jaki wywiera defekt typu przekoszenie panwi na własności dynamiczne turbozespołu energetycznego 200 MW.

4.3. Model geometryczny

Defekt typu zukosowanie panwi polega na przekoszeniu osi panwi w stosunku do osi wału oraz co za tym idzie zmianę geometrii szczeliny smarnej łożyska. Sytuację taką ilustruje Rys.4.1



Rys. 4.1: Model zukosowanej panwi

Oznaczenia z Rys.4.1:

x, y - układ prostokątny związany ze środkiem panwi O_p ,

\bar{x} - współrzędna obwodowa

\bar{y} - współrzędna po grubości filmu

z - współrzędna osiowa (po szerokości panwi)

α - kąt określający przekoszenie czopa

β - kąt określający płaszczyznę w której następuje przekoszenie o kąt α

e - mimośrodowość (w linii środkowej łożyska)

γ - kąt linii środków (w linii środkowej)

$R \approx R_p \approx R_c$ - promień łożyska

Z rysunku 4.1 wynika, że położenie i wielkość zukosowania opisują dwa kąty α i β , które w sposób jednoznaczny determinują kształt szczeliny smarnej. Dzięki temu modelowanie zukosowania panwi jest możliwe w dwóch płaszczyznach prostopadłych do osi wirowania wału.

4.4. Narzędzia numeryczne

Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku rozwija od wielu lat oprogramowanie, służące do analizy dynamiki maszyn wirnikowych i węzłów łożyskowych. Są to programy serii KINWIR (nieliniowe obliczenia kinetostatyczne) i NLDW (nieliniowa dynamika wirników) Programy te, oparte o złożony elastodiatermiczny model łożysk ślizgowych, umożliwiają modelowanie następujących podukładów maszyny:

- linia wirników i umieszczone na niej tarcze,
- hydrodynamiczne łożyska ślizgowe o dowolnym kształcie szczeliny smarnej,
- uszczelnienia labiryntowe,
- utwierdzenia zewnętrzne panwi,
- fundamenty.

Przy pomocy tych programów możliwe jest obliczanie i określenie charakterystyk statycznych i dynamicznych linii wirników z tarczami, hydrodynamicznych łożysk ślizgowych, uszczelnień labiryntowych oraz fundamentów. Możliwe jest także symulowanie wpływu wielu różnorodnych defektów na pracę układu, takich jak:

- niewyważenie wirnika,
- przemieszczenia termiczne i montażowe podpór,
- zmiana sztywności fundamentów,
- zmiana luzów w łożyskach.

- zmiany temperatury i ciśnienia oleju zasilającego łożyska,
- wymuszenia asynchroniczne
- pęknięcia wirnika
- zmiany ciśnienia lewarowego w kieszeni lewarowej
- zukosowanie czopa względem panwi.

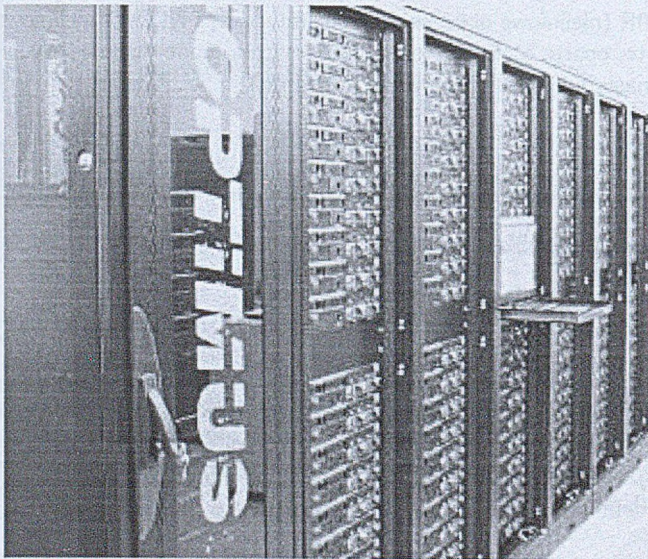
Ostatnie dwa defekty wymienione na powyższej liście stanowią efekt najnowszej modyfikacji programów serii KINWIR i NLDW o której wspomniano przy okazji celów badań. Uwzględnienie w modelu defektów w postaci kieszeni lewarowych oraz *przekoszenia* czopa stwarza jakościowo nowe możliwości oceny wpływu własności łożysk a zwłaszcza ich błędów montażu (przekoszenia) lub błędów eksploatacyjnych (zmiany ciśnienia lewarowego) na dynamikę całego układu wirnik-łożyska-fundament w zakresie nieliniowym.

W oparciu o wyniki obliczeń programami serii KINWIR i NLDW możliwa jest budowa relacji diagnostycznych typu defekt-symptom, które mogą stanowić dane dla bazy wiedzy *inteligentnego* systemu diagnostycznego.

Celem prowadzonych badań symulacyjnych jest poznanie wpływu jaki wywiera defekt typu przekoszenie panwi na własności dynamiczne turbozespołu energetycznego 200 MW.

Niniejsze opracowanie ma na celu wyjaśnienie sposobu budowy relacji diagnostycznych defekt-symptom w przypadku, kiedy modelowanym defektem jest nierównoległe ułożenie osi czopa względem osi panwi zwane dalej przekoszeniem lub zukosowaniem panwi.

Obliczenia wykonano na komputerach Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej.

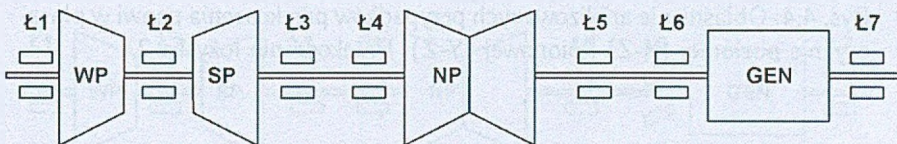


Typ	Klaster na procesorach Itanium 2
Nazwa	holk
Adres IP	192.168.x.x
Procesory	Intel Itanium II 1.3 GHz, 3 MB Cache L3, architektura EPIC, liczba procesorów: 256
Pamięć operacyjna	256 GB
Pamięć dyskowa	4 TB
Architektura	klaster maszyn SMP z siecią Gigabit Ethernet
Sieć	po 2 porty Gigabit Ethernet na nodzie, swicze D-Link
System operacyjny	Debian GNU/Linux, wersja

4.5. Zakres badań

Niniejszy rozdział ma na celu wyjaśnienie sposobu budowy relacji diagnostycznych defekt-symptom w przypadku, kiedy modelowanym defektem jest nierównoległe ułożenie osi czopa względem osi panwi zwane dalej przekoszeniem lub zukosowaniem panwi.

Szkic poglądowy turbozespołu 200 MW dla którego prowadzono badania symulacyjne ilustruje Rys.4.2



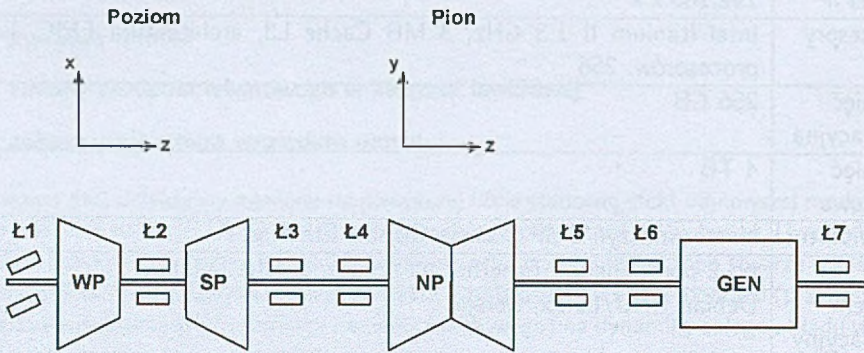
Rys. 4.2: Szkic poglądowy turbozespołu 200 MW – przypadek bazowy

Rysunek 4.2 przedstawia tzw. przypadek bazowy – zakłada się równoległe ułożenie osi czopa i panwi w każdym z łożysk (kąt $\alpha = 0^\circ$). Jest to stan idealny do którego będą porównywane wyniki obliczeń z zamodelowanym defektem.

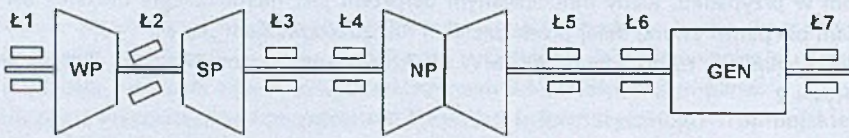
Badania zostały wykonane dla prędkości obrotowej wirnika odpowiadającej pracy nominalnej 3000 [obr/min].

Defekt w postaci zukosowania przyjmowano w płaszczyźnie poziomej ($X-Z$, $\beta = 0^\circ$) i pionowej ($Y-Z$, $\beta = 90^\circ$) dla każdego z siedmiu łożysk w kierunku dodatnim i ujemnym. Dla każdego łożyska obliczano maksymalną i minimalną wartość zukosowania (kąt α) w płaszczyźnie poziomej i pionowej przy której nie następuje fizyczny kontakt materiału panwi i czopa (grubość filmu smarnego osiąga wartość minimalną równą 5 mikrometrów). Wartość maksymalna zukosowania oznacza maksymalny kąt przekoszenia w kierunku dodatnim. Wartość minimalna zukosowania oznacza maksymalny kąt przekoszenia w kierunku ujemnym. Oznacza to wyznaczenie 4 wartości defektu dla każdego łożyska - $\alpha_{\max} \beta = 0^\circ$, $\alpha_{\min} \beta = 0^\circ$, $\alpha_{\max} \beta = 90^\circ$ i $\alpha_{\min} \beta = 90^\circ$.

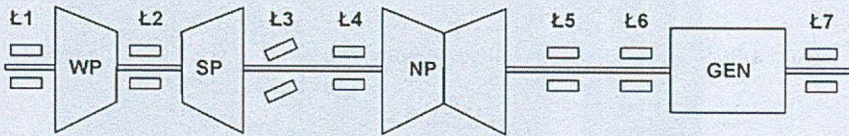
Obliczono przypadki modelowania defektu w poszczególnych łożyskach dla obu płaszczyzn. Przypadki te przedstawiono na rysunkach 4.3÷4.9.



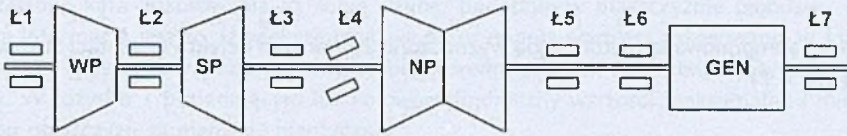
Rys. 4.3: Objasnienie analizowanych przypadków przekoszenia panwi w płaszczyźnie poziomej (X-Z) i pionowej (Y-Z). Przekoszenie łożyska 1



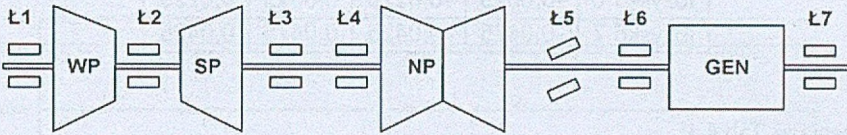
Rys. 4.4: Objasnienie analizowanych przypadków przekoszenia panwi w płaszczyźnie poziomej (X-Z) i pionowej (Y-Z). Przekoszenie łożyska 2



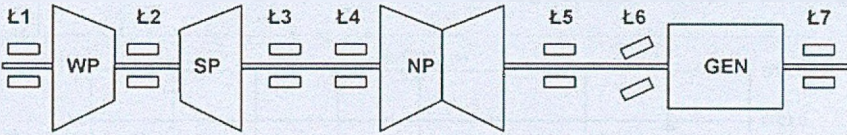
Rys. 4.5: Objasnienie analizowanych przypadków przekoszenia panwi w płaszczyźnie poziomej (X-Z) i pionowej (Y-Z). Przekoszenie łożyska 3



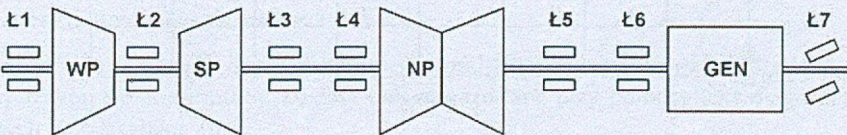
Rys. 4.6: objaśnienie analizowanych przypadków przekoszenia panwi w płaszczyźnie poziomej (X-Z) i pionowej (Y-Z). Przekoszenie tożyska 4



Rys. 4.7: objaśnienie analizowanych przypadków przekoszenia panwi w płaszczyźnie poziomej (X-Z) i pionowej (Y-Z). Przekoszenie tożyska 5



Rys. 4.8: objaśnienie analizowanych przypadków przekoszenia panwi w płaszczyźnie poziomej (X-Z) i pionowej (Y-Z). Przekoszenie tożyska 6



Rys. 4.9: objaśnienie analizowanych przypadków przekoszenia panwi w płaszczyźnie poziomej (X-Z) i pionowej (Y-Z). Przekoszenie tożyska 7

4.6. Wyniki badań

Zgodnie z zaproponowaną metodologią wyznaczono 28 wartości defektu w postaci zukosowania panwi (Tab.4.1).

Tab. 4.1: Wartości maksymalne i minimalne kątów α dla płaszczyzny poziomej i pionowej

	am_b0	am_b90	ap_b0	ap_b90
łożysko 1	-0,1475	-0,0675	0,1475	0,0675
łożysko 2	-0,0975	-0,0625	0,0975	0,0475
łożysko 3	-0,0950	-0,0400	0,0950	0,0400
łożysko 4	-0,0925	-0,0625	0,0925	0,0625
łożysko 5	-0,1000	-0,0425	0,1000	0,0425
łożysko 6	-0,0625	-0,0225	0,0625	0,0225
łożysko 7	-0,0475	-0,0425	0,0475	0,0425

Oznaczenia w Tab.4.1:

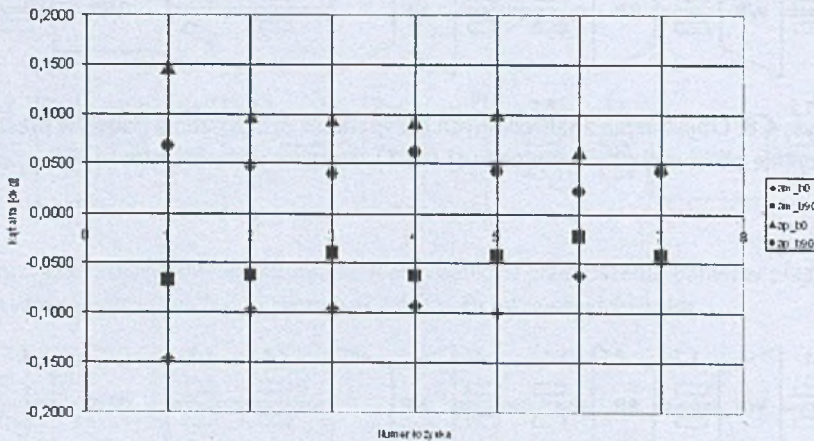
am_b0 – α minimalne płaszczyzna pozioma

am_b90 – α minimalne płaszczyzna pionowa

ap_b0 – α minimalne płaszczyzna pozioma

ap_b90 – α maksymalne płaszczyzna pionowa

Rozkład wartości defektu ilustruje Rys.4.10

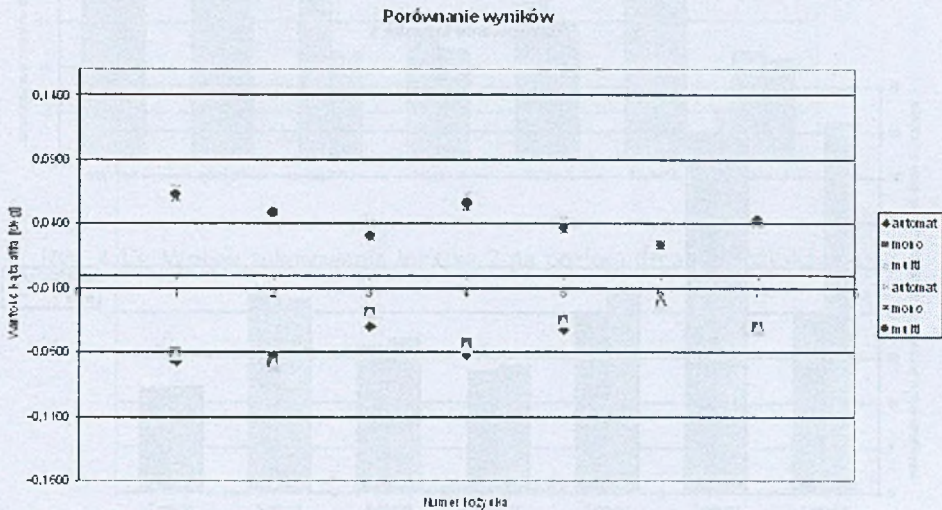


Rys. 4.10: Wartości maksymalne i minimalne kątów α dla płaszczyzny poziomej i pionowej

Oznaczenia na Rys.4.10 jak w Tab.4.1.

Na uwagę zwraca symetryczny rozkład wartości defektu. Dla poziomej płaszczyzny wartości bezwzględne kąta zukosowania są sobie równe, podobnie w płaszczyźnie pionowej. Kolejną istotną informacją jest to, iż większe możliwe do uzyskania wartości zukosowania w łożyskach 1÷6 są dla płaszczyzny poziomej. Ma to bezpośredni związek z soczewkowatym luzem tych łożysk. W łożysku 7 posiadającym luz kołowo cylindryczny wartości maksymalne i minimalne dla obu płaszczyzn są niemalże identyczne.

Do wyznaczenia wartości maksymalnych i minimalnych defektu zastosowano zautomatyzowany program poszukujący tych wartości metodą kolejnych przybliżeń. Aby zweryfikować wiarygodność wyników uzyskanych tą drogą przeprowadzono obliczenia kontrolne przy pomocy dwu innych algorytmów wyznaczania największej i najmniejszej wartości defektu. Porównanie wyników działania tych 3 programów przedstawia rysunek 4.11



Rys. 4.11: Porównanie wyznaczonych przy pomocy 3 algorytmów wartości defektu w płaszczyźnie pionowej

Oznaczenia na Rys.4.11:

automat – algorytm, którym prowadzono główne obliczenia

mono, multi – dwa inne algorytmy służące do weryfikacji wiarygodności zautomatyzowanego procesu poszukiwania wartości defektu.

Dla tak wyznaczonych dopuszczalnych wartości kąta α wygenerowano 28 relacji diagnostycznych typu defek-symptom. Zostały one zobrazowane przy pomocy kart diagnostycznych zawartych w załączniku Z0.

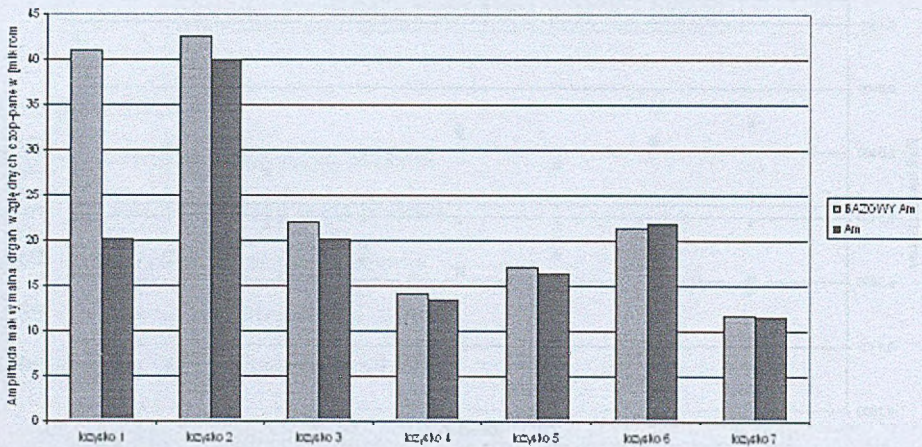
Jednocześnie w oparciu o wyniki symulacji zilustrowano graficznie wywołane defektem zmiany szeregu parametrów:

- trajektorie czopa w obrębie szczeliny smarnej – załączniki 4.8.1, 4.8.2 i 4.8.3
- przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników – załączniki 4.8.4 i 4.8.5

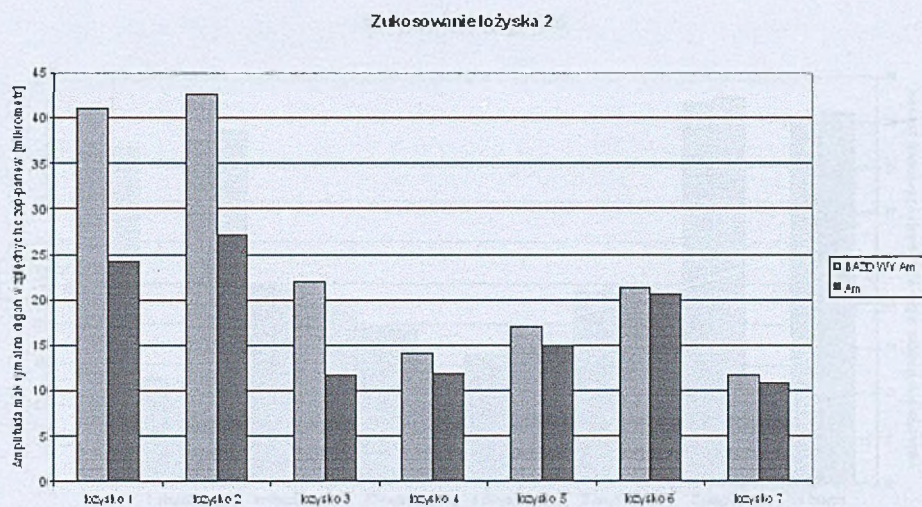
- przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi i drgań względnych filmu smarnego – załączniki 4.8.6 i 4.8.7
- przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku, wyniki z programu KINWIN załączniki 4.8.8, 4.8.9 i 4.8.10
- przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku, wyniki z programu NLDW załączniki 4.8.11, 4.8.12 i 4.8.13.

Dodatkowo na podstawie danych zawartych na kartach diagnostycznych sporządzono wykresy wpływu defektu α maksymalne w płaszczyźnie poziomej na poziom amplitudy maksymalnej drgań względnych czop – panew. Wykresy te zilustrowano na Rys.4.12÷4.18

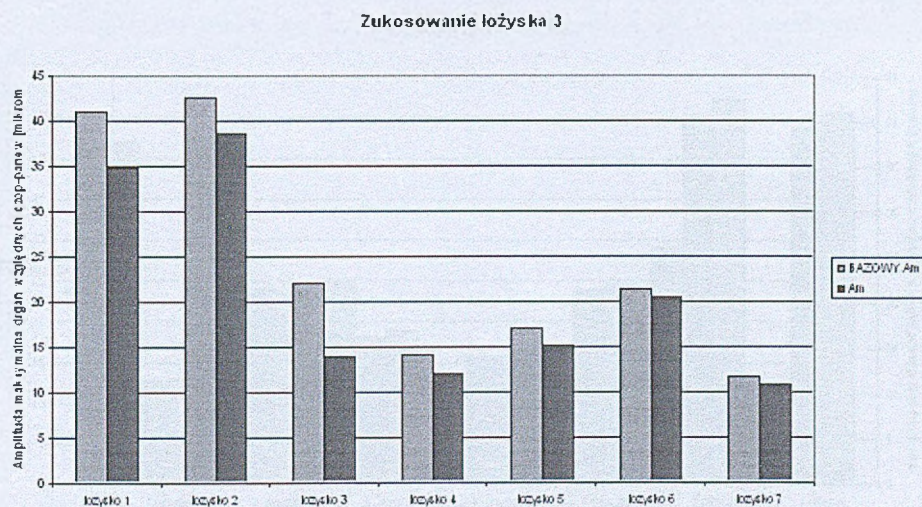
Zukosowanie łożyska 1



Rys. 4.12: Wpływ zukosowania łożyska 1 na poziom drgań w łożyskach 1÷7

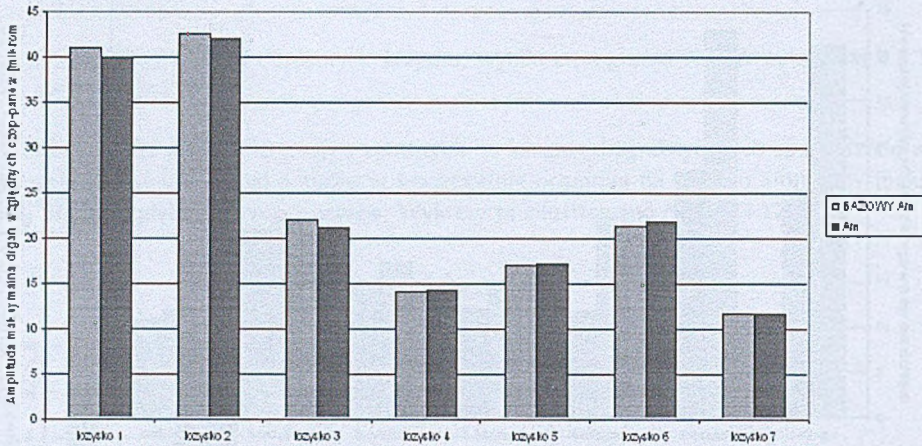


Rys. 4.13: Wpływ zukosowania łożyska 2 na poziom drgań w łożyskach 1÷7



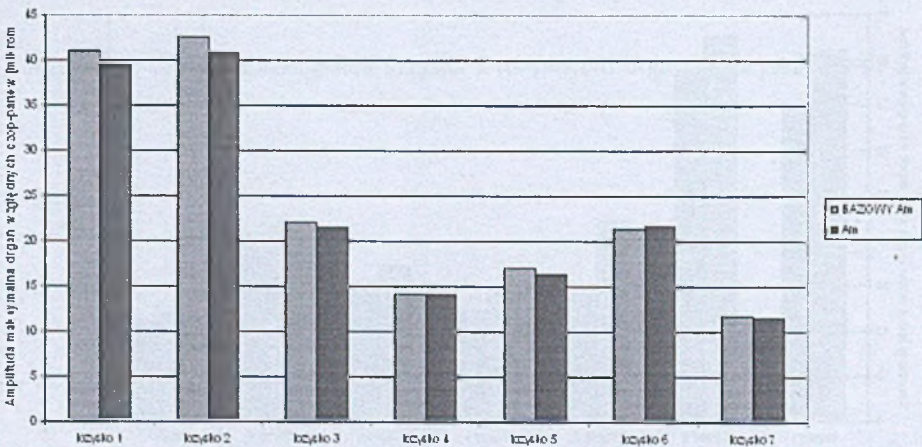
Rys. 4.14: Wpływ zukosowania łożyska 3 na poziom drgań w łożyskach 1÷7

Zukosowanie łożyska 4



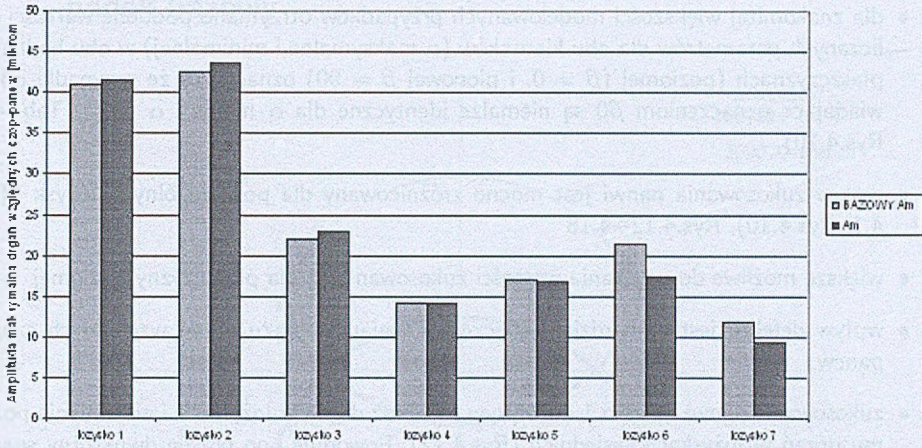
Rys. 4.15: Wpływ zukosowania łożyska 4 na poziom drgań w łożyskach 1÷7

Zukosowanie łożyska 5



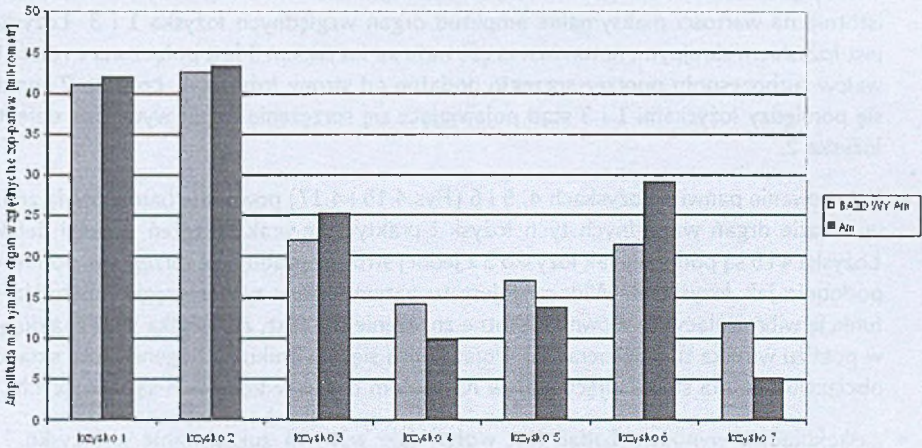
Rys. 4.16: Wpływ zukosowania łożyska 5 na poziom drgań w łożyskach 1÷7

Zukosowanie łożyska 6



Rys. 4.17: Wpływ zukosowania łożyska 6 na poziom drgań w łożyskach 1÷7

Zukosowanie łożyska 7



Rys. 4.18: Wpływ zukosowania łożyska 7 na poziom drgań w łożyskach 1÷7

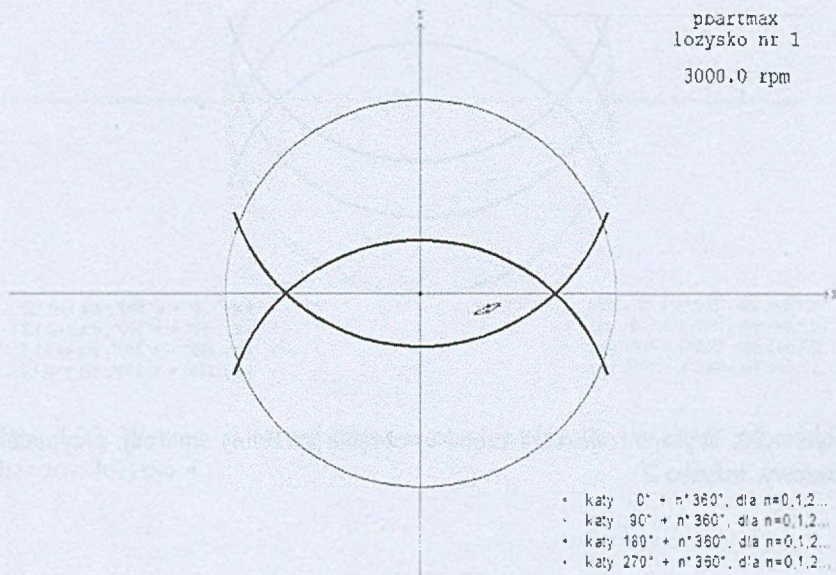
4.7. Wnioski z badań

Na podstawie analizy przedstawionych wykresów można sformułować pewne spostrzeżenia:

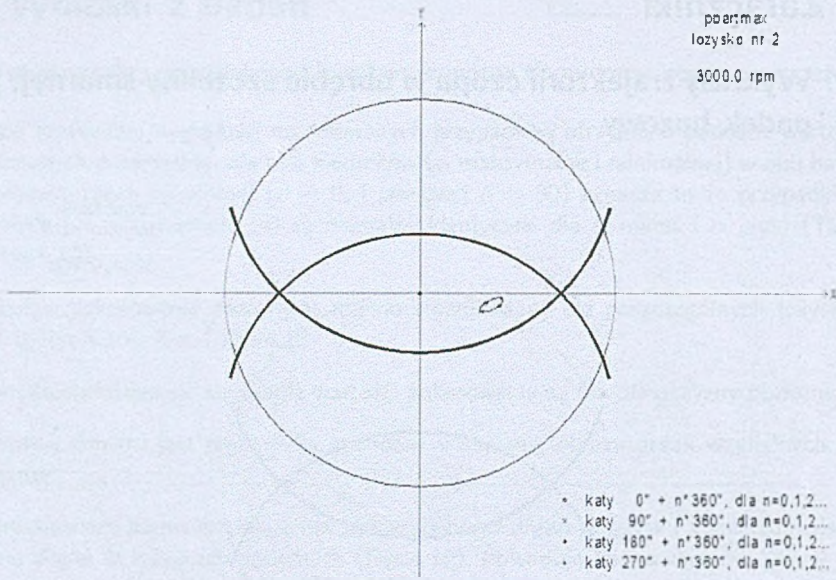
- dla znakomitej większości modelowanych przypadków otrzymano podobne wartości obliczanych parametrów dla obu kierunków (α maksymalne i minimalnej) w obu badanych płaszczyznach (poziomej ($\beta = 0$, i pionowej $\beta = 90$) oznacza to że przypadki odpowiadające oznaczeniom $\beta 0$ są niemalże identyczne dla α minus i α plus) (Tab. 4.1, Rys.4.10)
- wpływ zukosowania panwi jest mocno zróżnicowany dla poszczególnych łożysk (Tab. 4.1, Rys.4.10), Rys.4.12÷4.18
- większe możliwe do uzyskania wartości zukosowania są dla płaszczyzny poziomej
- wpływ defektu jest najbardziej widoczny w zmianie obrazu drgań względnych czop – panew
- zukosowanie panwi łożyska 1 ma wpływ na obraz drgań w łożysku 1 i nie zmienia poziomu drgań w łożyskach sąsiednich (Rys.4.12). Powoduje ono prawie dwukrotny spadek wartości amplitudy drgań względnych. Fakt obniżenia poziomu drgań pod wpływem zukosowania należy tłumaczyć silnie nieliniowymi własnościami łożysk ślizgowych których przyczyną jest anizotropia skośnych współczynników sztywności i tłumienia. Jednocześnie należy mieć na uwadze geometrię szczeliny smarnej o soczewkowatym kształcie a co za tym idzie silnych własnościach antywibracyjnych łożysk soczewkowych. Podobne zjawisko jest obserwowane w łożysku 3 (Rys.4.14) gdzie wprowadzony w nim defekt wywołuje istotne zmniejszenie amplitudy drgań względnych w nim samym.
- zukosowanie panwi łożyska 2 ma wpływ na obraz drgań w łożysku 2 oraz w łożyskach sąsiadujących tzn. 1 i 3 (Rys.4.13). Jak łatwo zauważyć defekt w łożysku 1 i 3 nie ma wpływu na obraz drgań w łożysku 2, natomiast defekt w łożysku 2 oddziałuje istotnie na wartości maksymalne amplitud drgań względnych łożyska 1 i 3. Łożysko 1 jest łożyskiem skrajnym, natomiast część wału za łożyskiem 3 jest połączona z resztą linii wałów turbosespołu poprzez sprzęgło podatne od strony łożyska 4. Łożysko 2 znajduje się pomiędzy łożyskami 1 i 3 stąd pojawiające się sprzężenie drgań wywołane defektem łożyska 2.
- Zukosowanie panwi w łożyskach 4, 5 i 6 (Rys.4.15÷4.17) powoduje bardzo małą zmianę w obrazie drgań względnych tych łożysk i praktycznie brak sprzężeń drgań i defektu. Łożyska 4 i 5 są podobnie jak łożysko 3 z jednej strony sąsiadują ze sprzęgłami podatnymi podobnie jak łożysko 3. Widoczny jest tu zatem wpływ tych sprzęgieł spełniających funkcję wibroizolacyjną. Również istotne znaczenie ma fakt, że łożyska 5 i 6 znajdują się w pobliżu wirnika turbogeneratorsa. Pojawiająca się w wirniku turbogeneratorsa składowa obciążenia $2x$ ma stabilizujący wpływ na poziom drgań w łożyskach sąsiadujących.
- zaskakującym wynikiem badań jest wpływ jaki wywiera zukosowanie w łożysku 7 na obraz drgań w łożyskach sąsiednich – szczególnie w łożysku 6 spowodowało wzrost drgań względnych. Przyczyn tego faktu można upatrywać w bardzo złożonej strukturze obiektu jakim jest turbosespół.

4.8. Załączniki

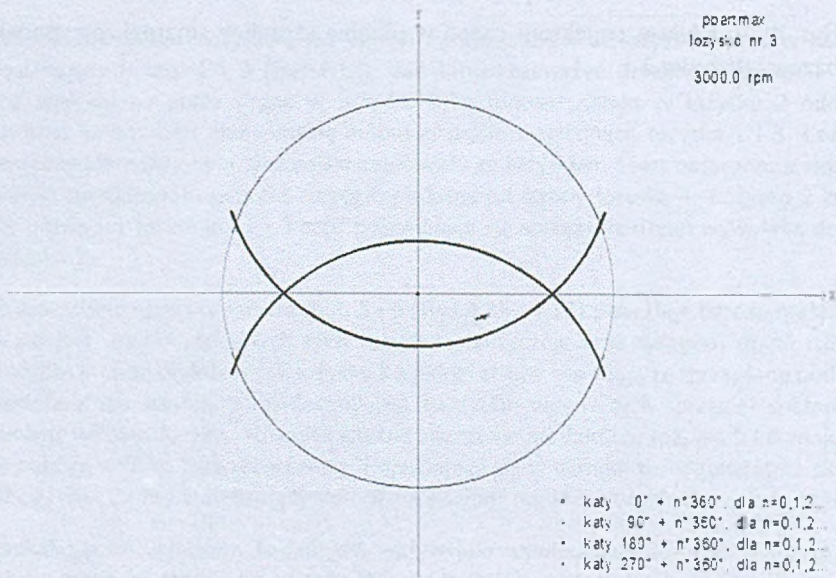
4.8.1. Wykresy trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, przypadek bazowy



Rys. 4.19: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, przypadek bazowy, łożysko 1

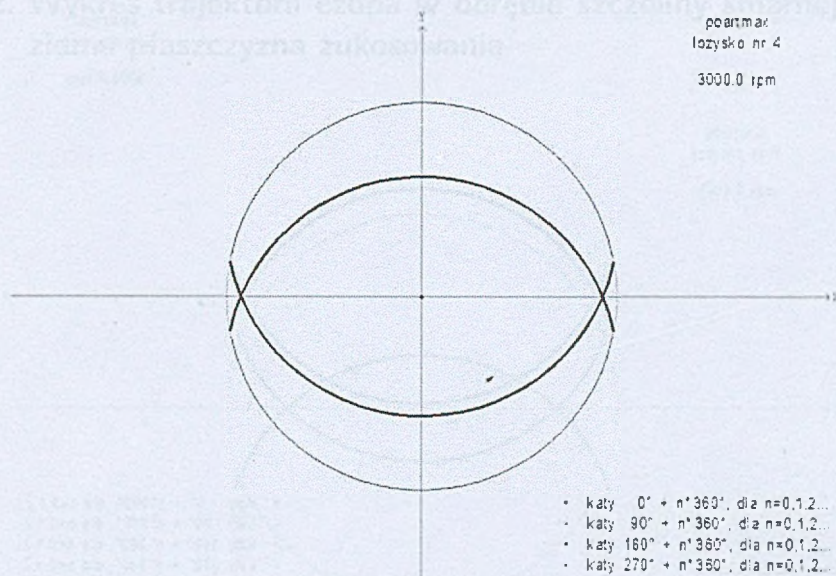


Rys. 4.20: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, przypadek bazowy, łożysko 2

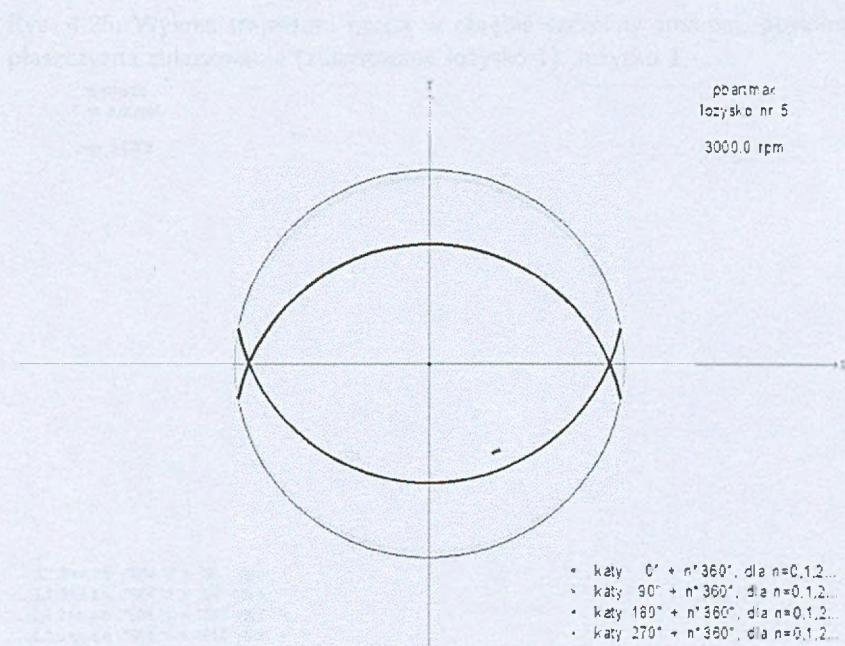


Rys. 4.21: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, przypadek bazowy, łożysko 3

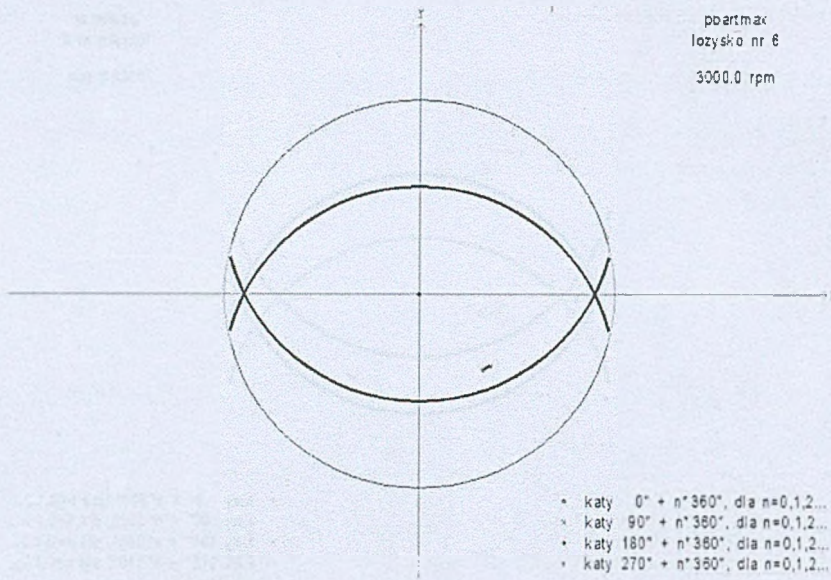
4.3.2. Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, po zmianie płaszczyzny zlożowania



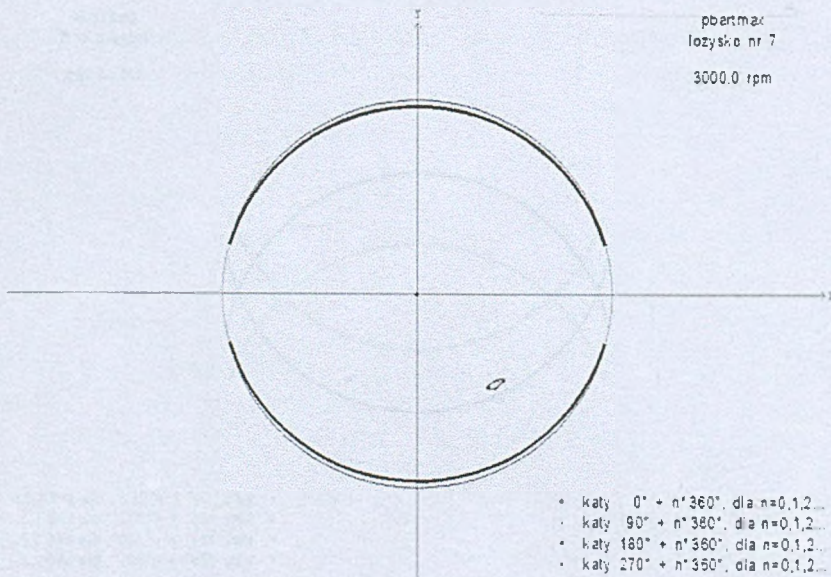
Rys. 4.22: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, przypadek bazowy, łożysko 4



Rys. 4.23: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, przypadek bazowy, łożysko 5

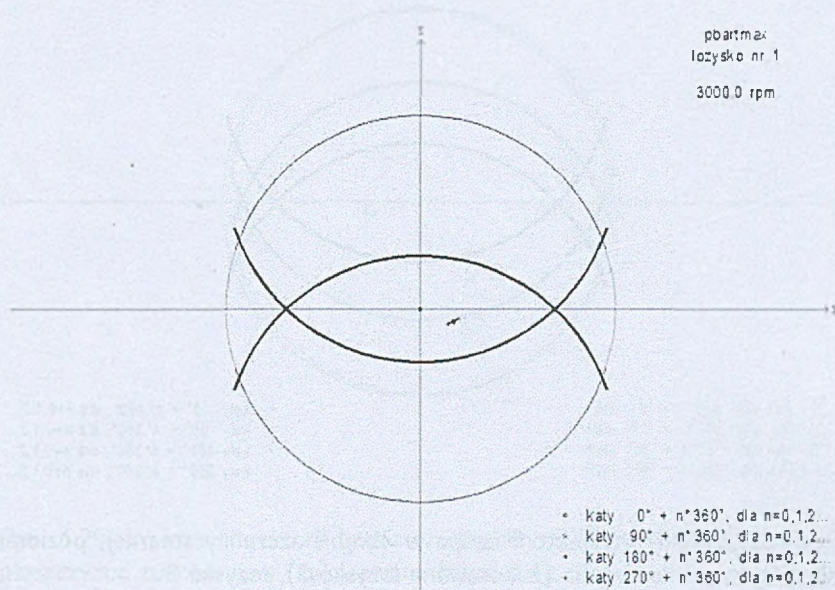


Rys. 4.24: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, przypadek bazowy, łożysko 5

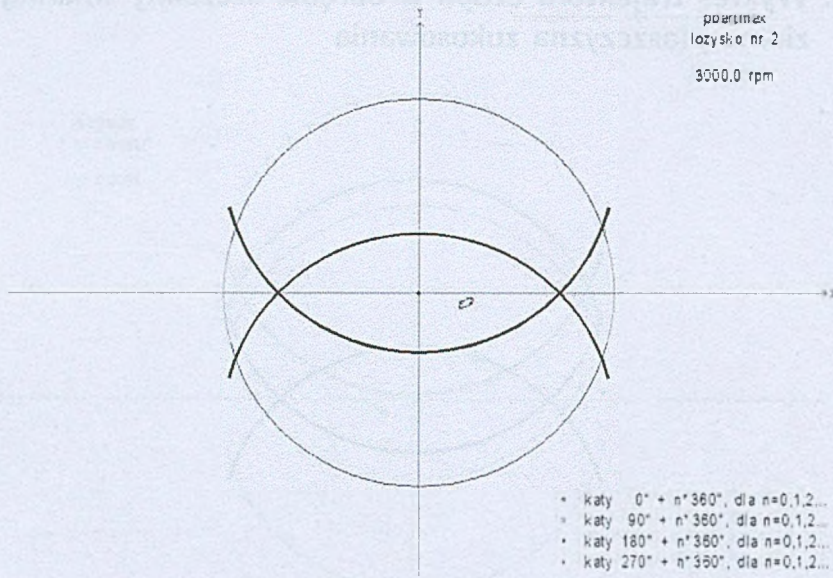


Rys. 4.25: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, przypadek bazowy, łożysko 7

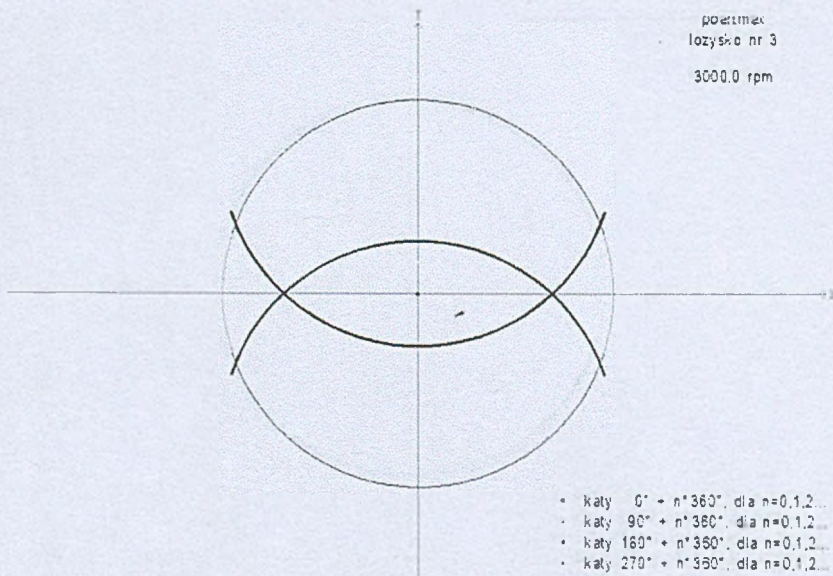
4.8.2. Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pozioma płaszczyzna zukosowania



Rys. 4.26: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 1), łożysko 1

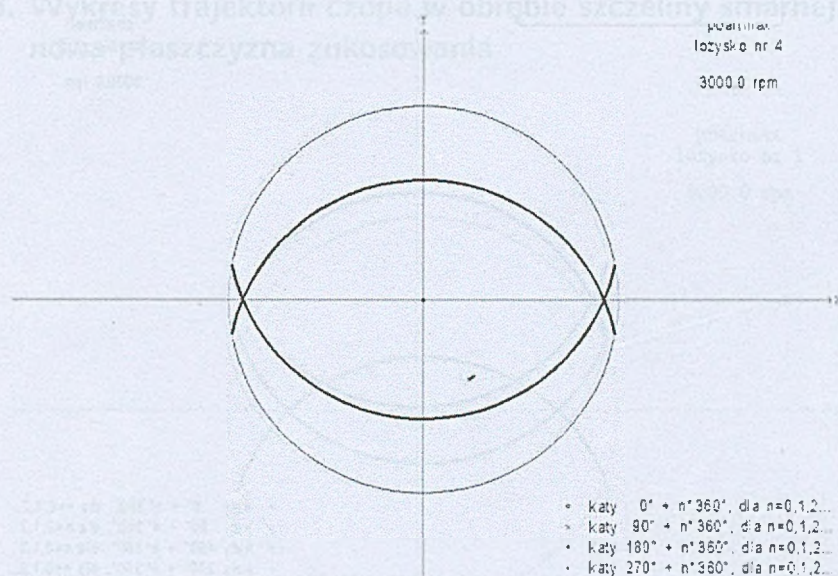


Rys. 4.27: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 2), łożysko 2



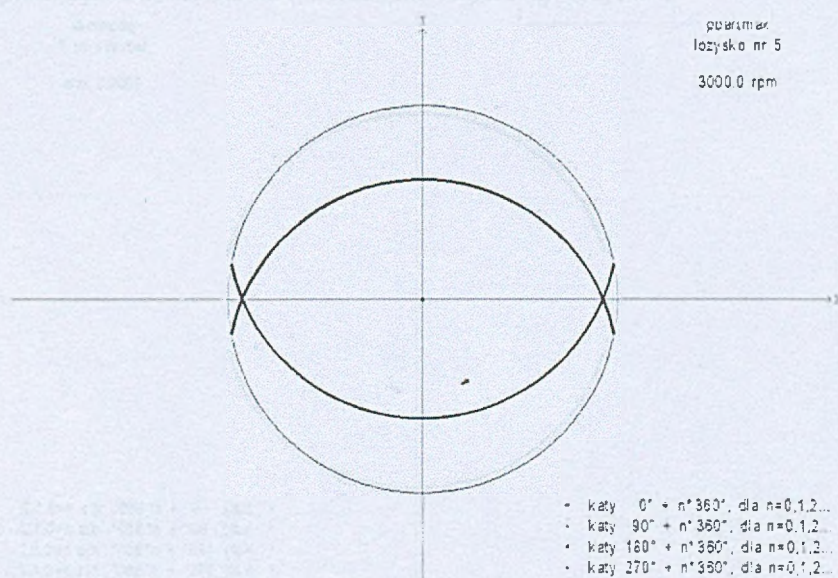
Rys. 4.28: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 3), łożysko 3

4.9.5. Wykresy trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pozioma płaszczyzna zukosowania

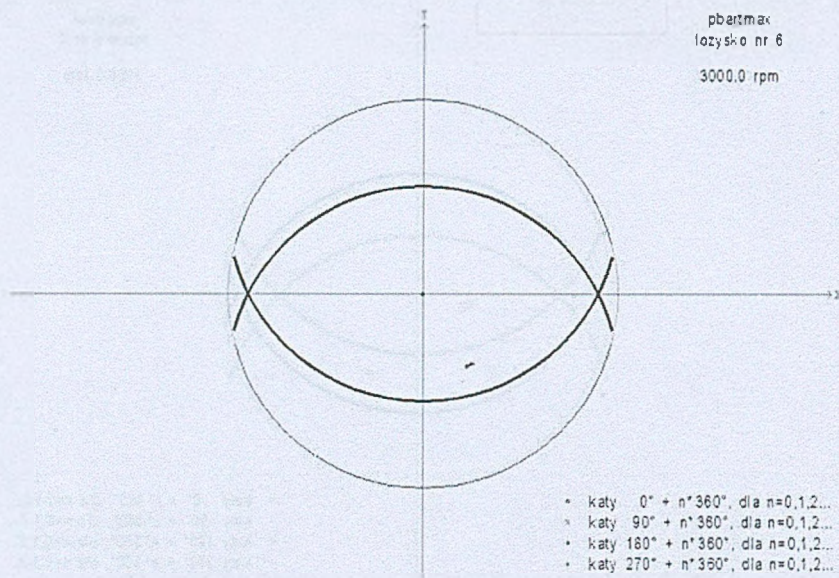


Rys. 4.29: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 4), łożysko 4

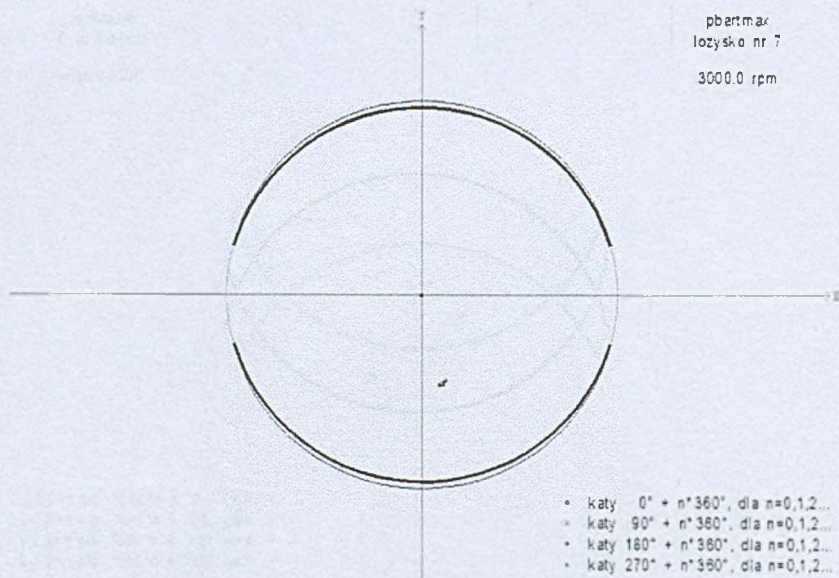
4.9.5. Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 5), łożysko 5



Rys. 4.30: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 5), łożysko 5

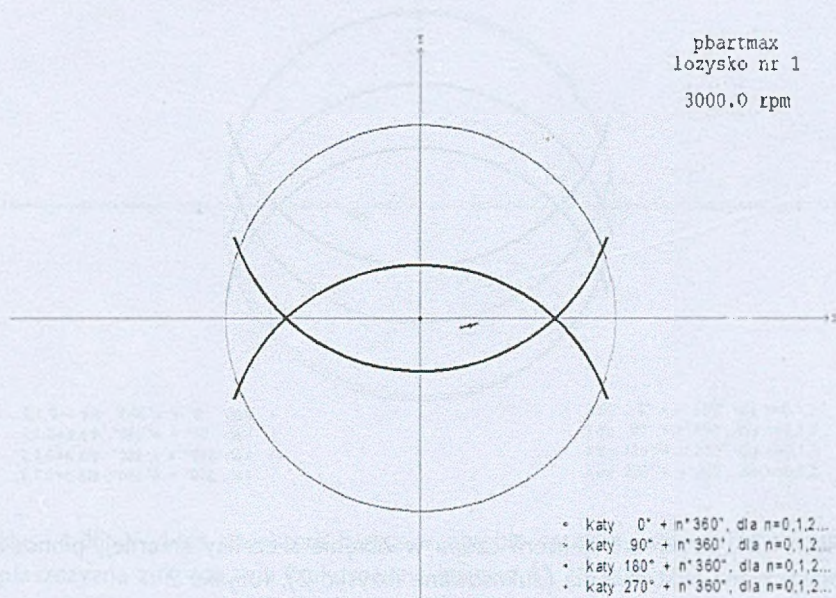


Rys. 4.31: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 6), łożysko 6

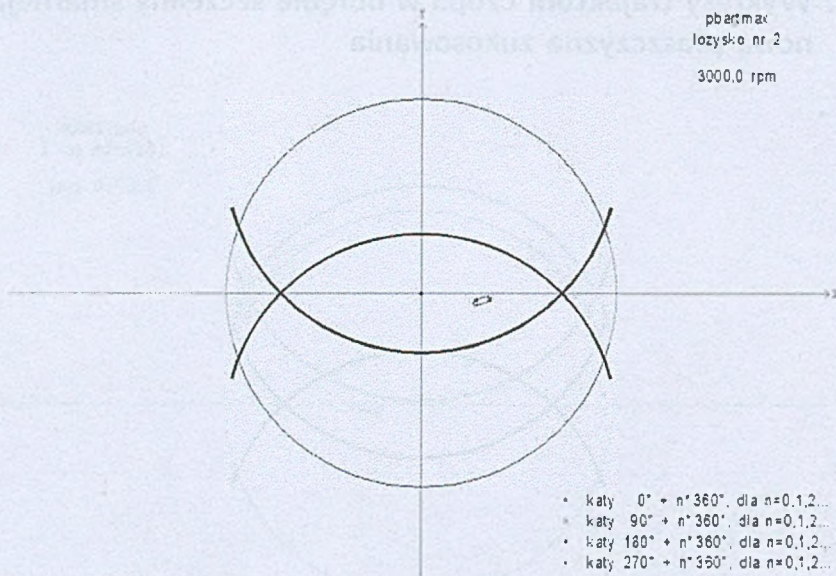


Rys. 4.32: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 7), łożysko 7

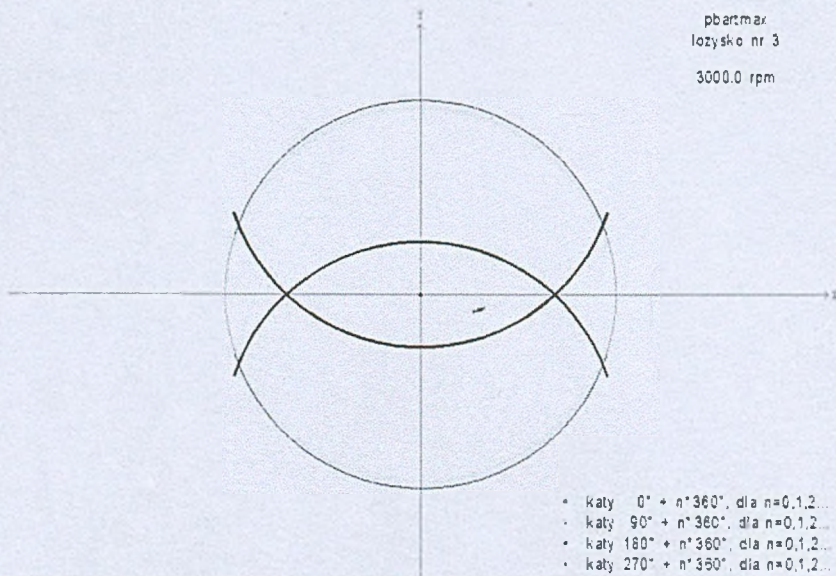
4.8.3. Wykresy trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pionowa płaszczyzna zukosowania



Rys. 4.33: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 1), łożysko 1

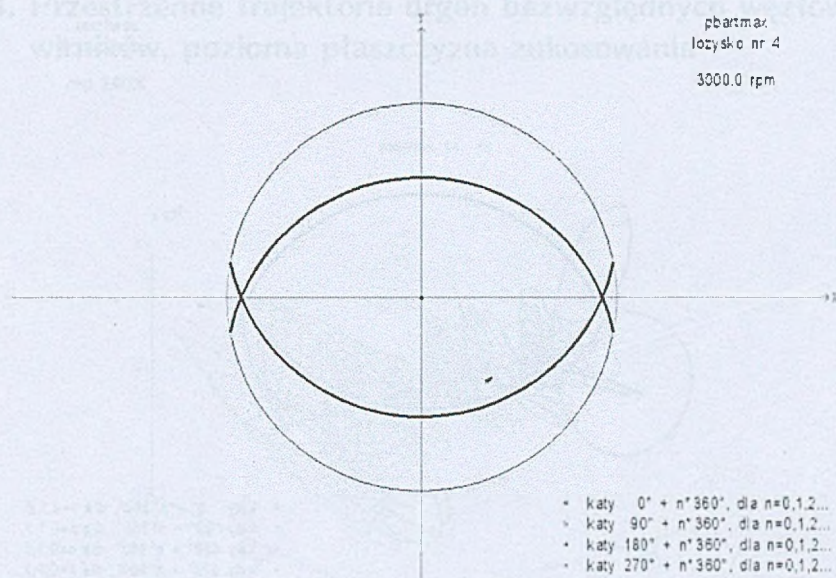


Rys. 4.34: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 2), łożysko 2



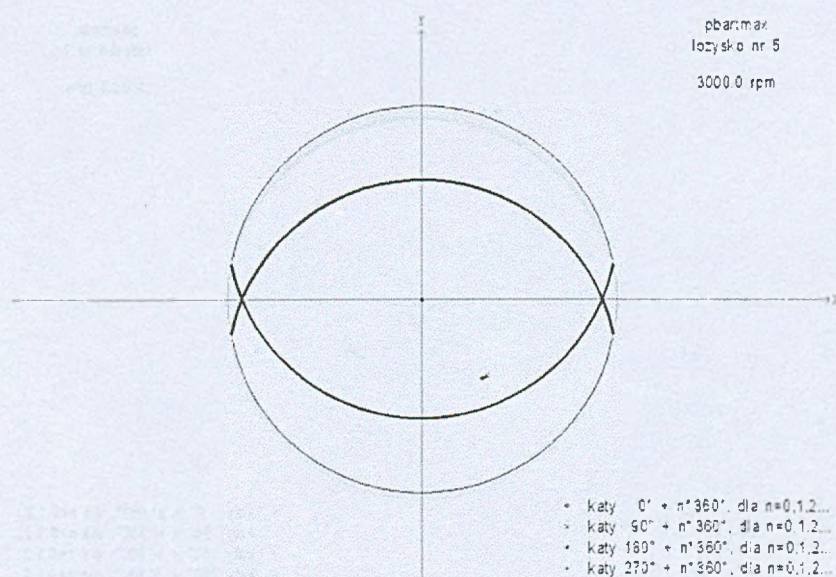
Rys. 4.35: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 3), łożysko 3

4.8.4. Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii winików, pionowa płaszczyzna zukosowania

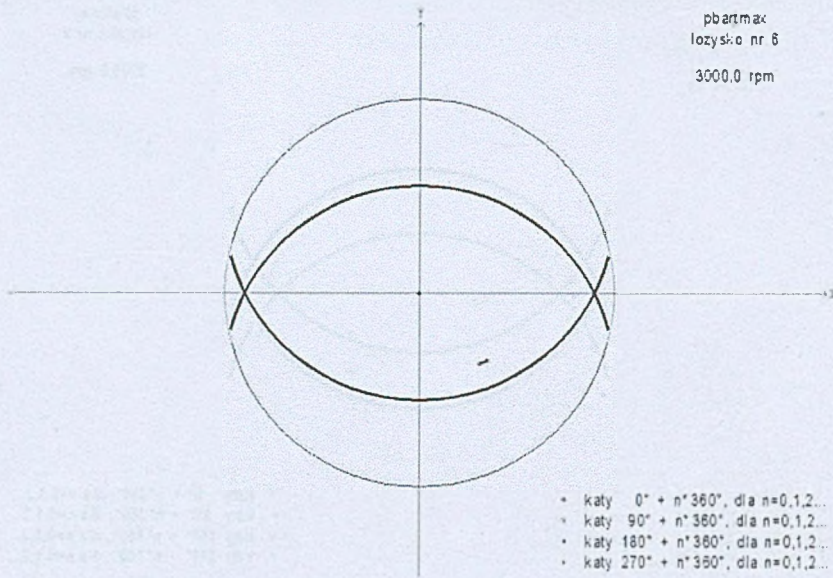


Rys. 4.36: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 4), łożysko 4

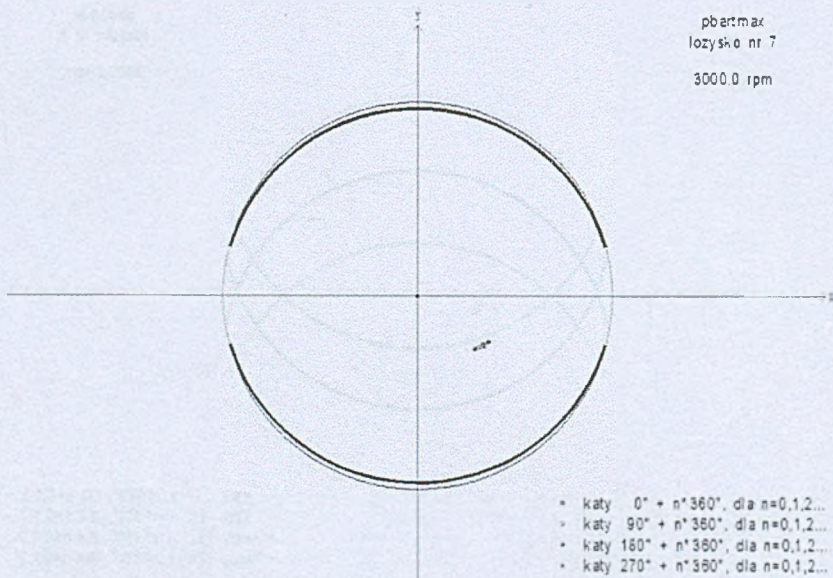
Rys. 4.40. Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii winików, pionowa płaszczyzna zukosowania



Rys. 4.37: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 5), łożysko 5

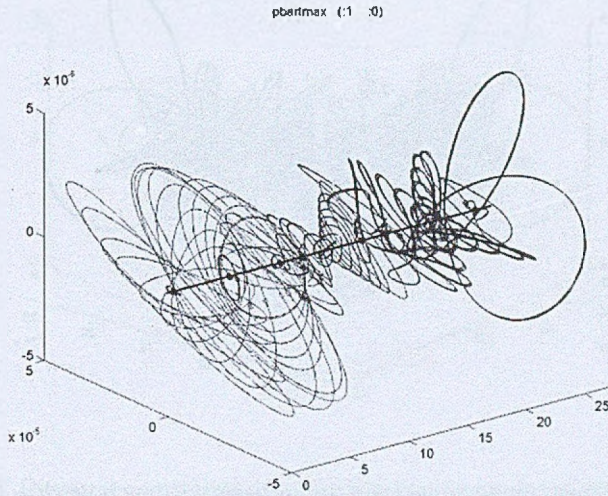


Rys. 4.38: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 6), łożysko 6

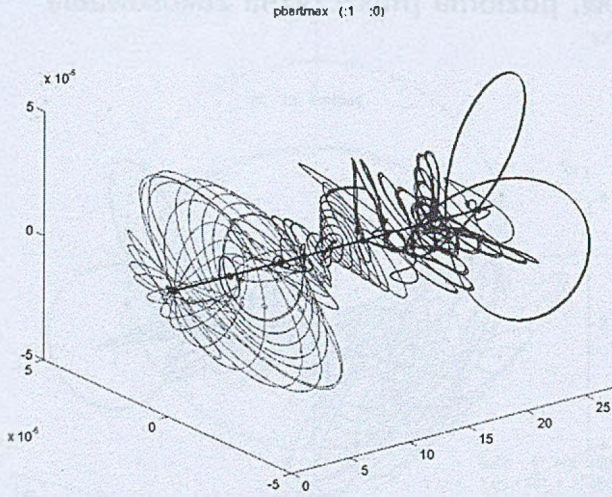


Rys. 4.39: Wykres trajektorii czopa w obrębie szczeliny smarnej, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 7), łożysko 7

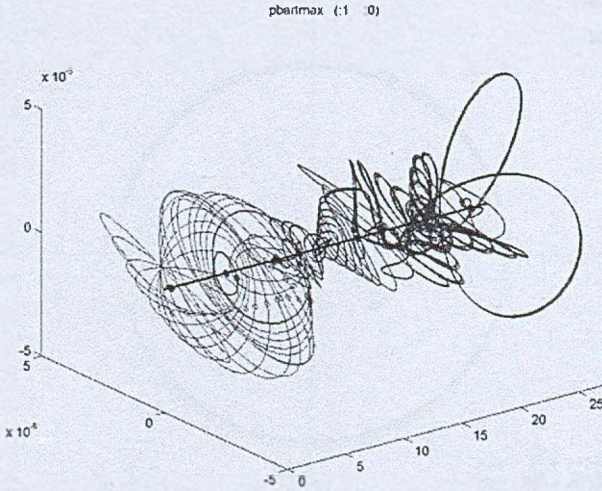
4.8.4. Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pozioma płaszczyzna zukosowania



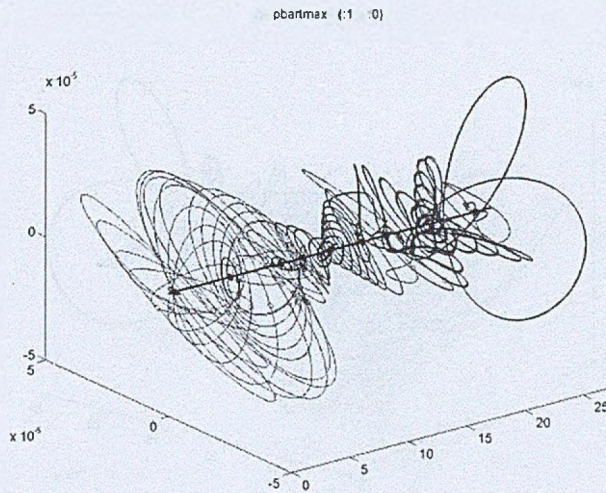
Rys. 4.40: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, przypadek bazowy



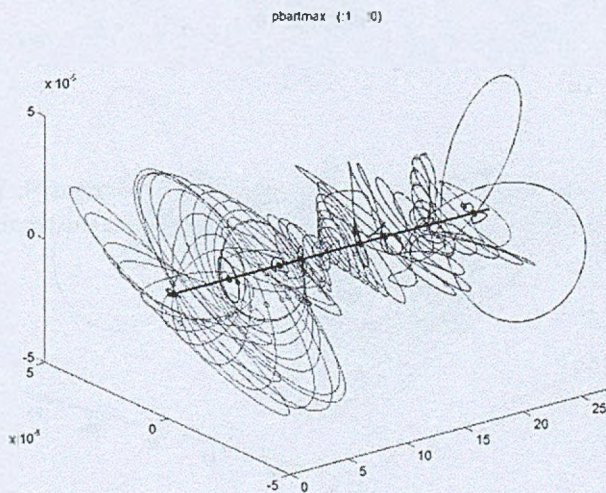
Rys. 4.41: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 1)



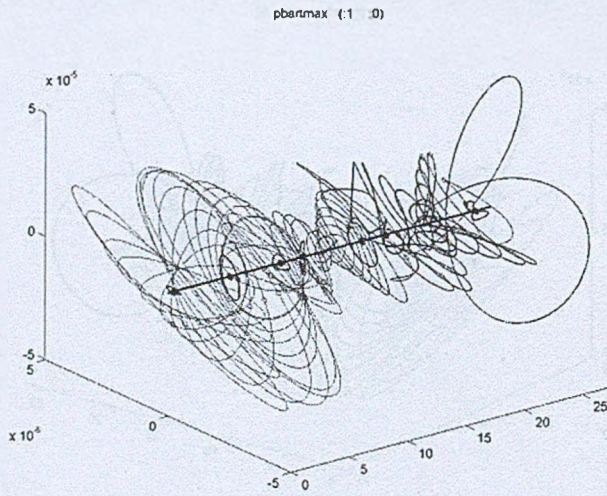
Rys. 4.42: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 2)



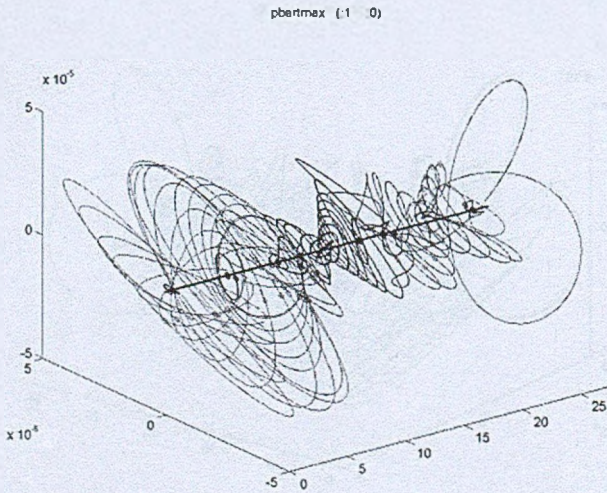
Rys. 4.43: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 3)



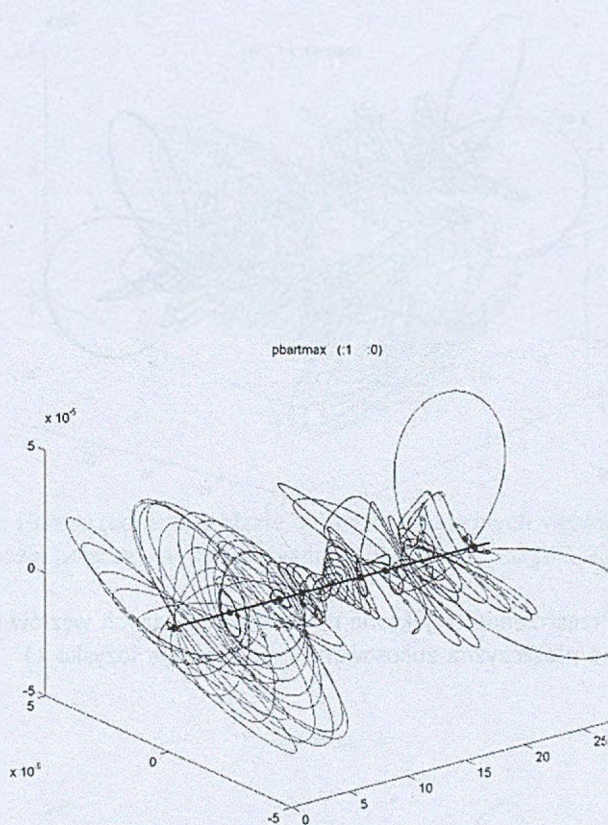
Rys. 4.44: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 4)



Rys. 4.45: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 5)

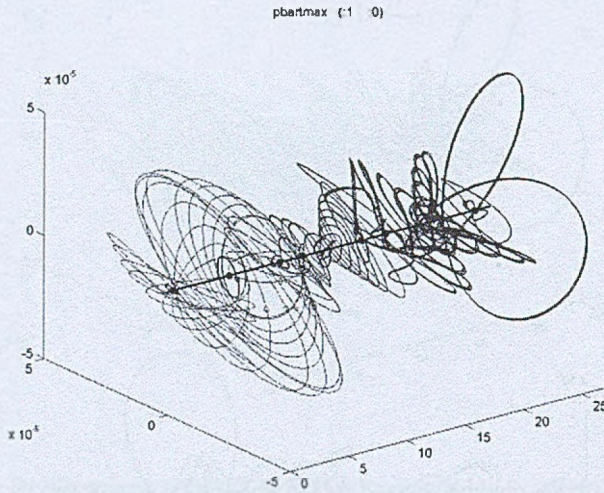


Rys. 4.46: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 6)

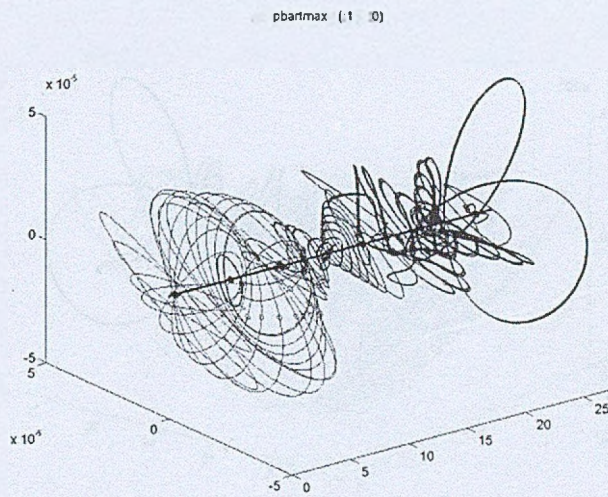


Rys. 4.47: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 7)

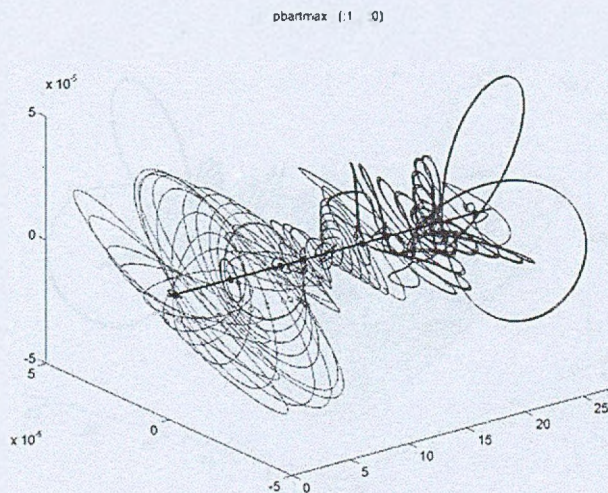
4.8.5. Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pionowa płaszczyzna zukosowania



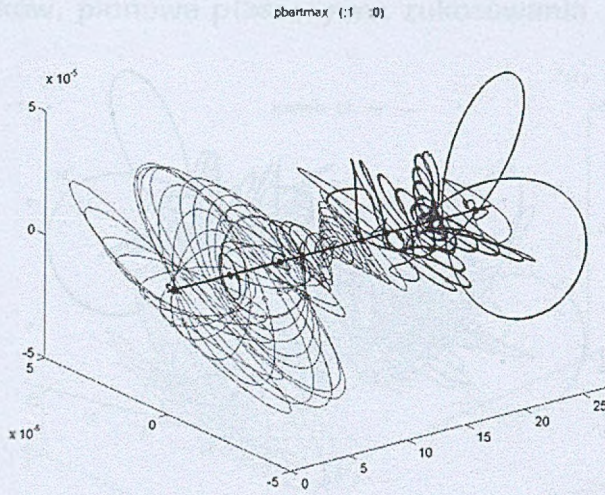
Rys. 4.48: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 1)



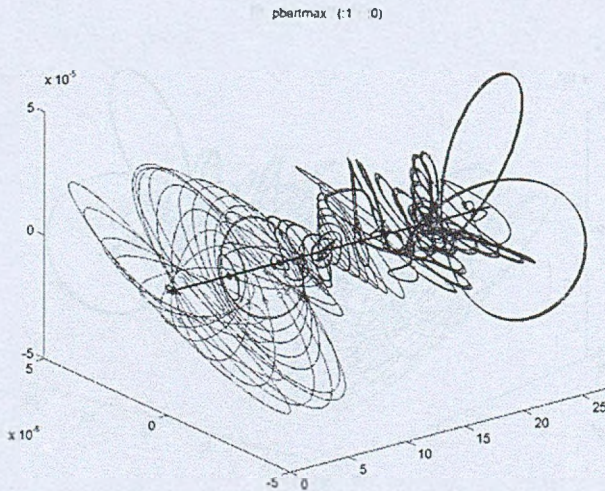
Rys. 4.49: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 2)



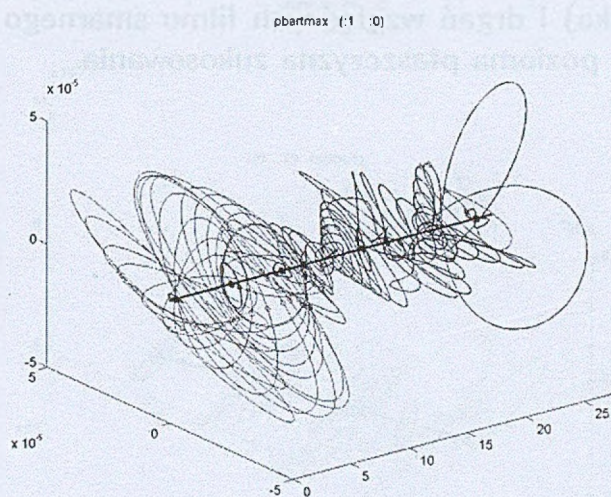
Rys. 4.50: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 3)



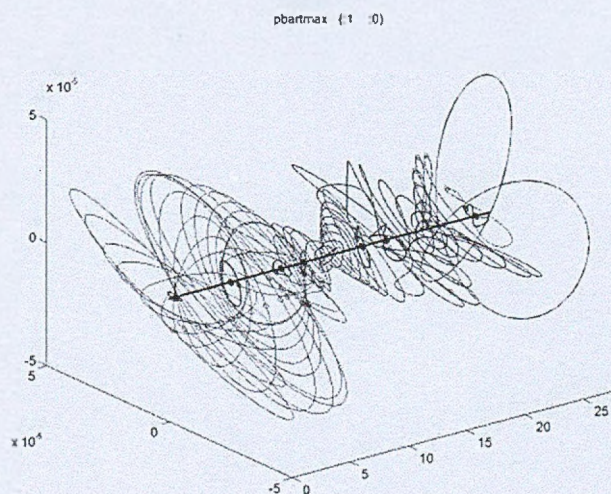
Rys. 4.51: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 4)



Rys. 4.52: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 5)

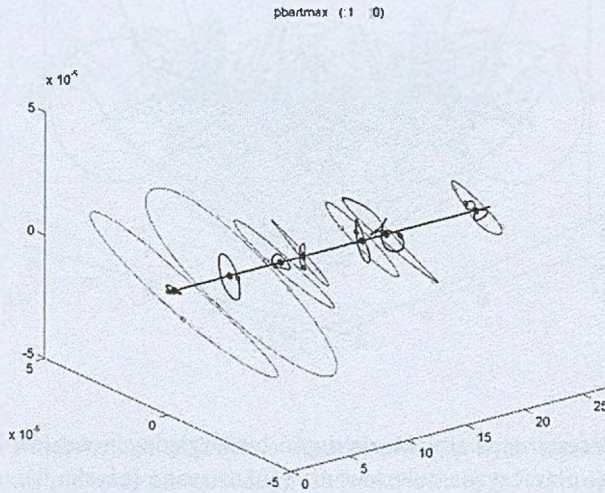


Rys. 4.53: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 6)

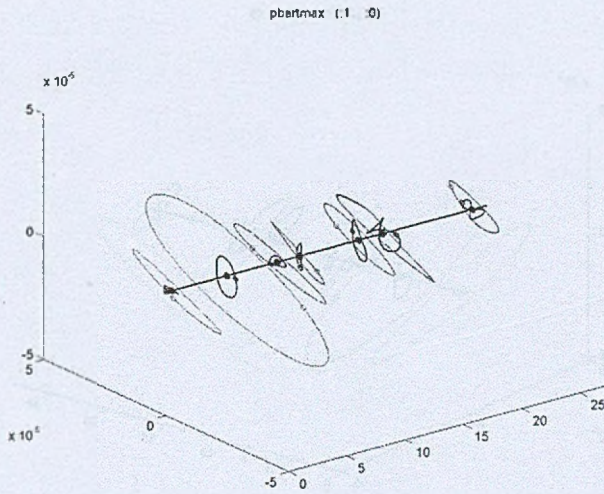


Rys. 4.54: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 7)

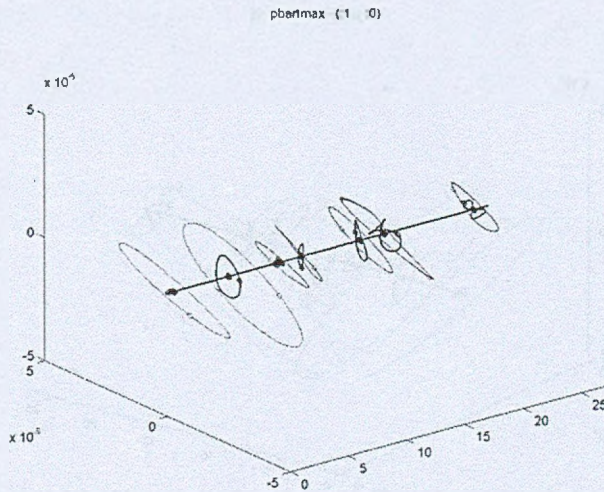
4.8.6. Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pozioma płaszczyzna zukosowania



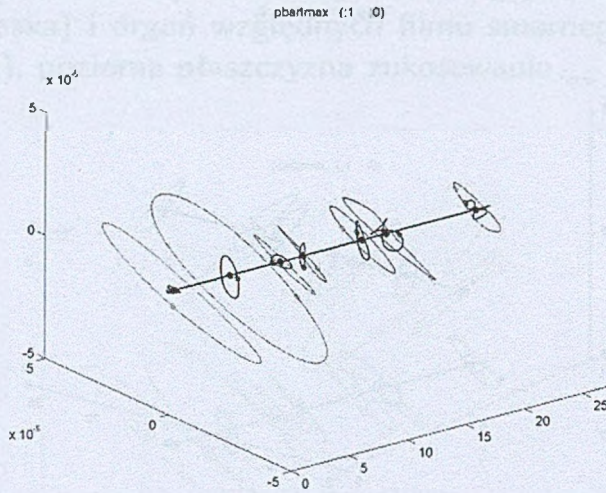
Rys. 4.55: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), przypadek bazowy



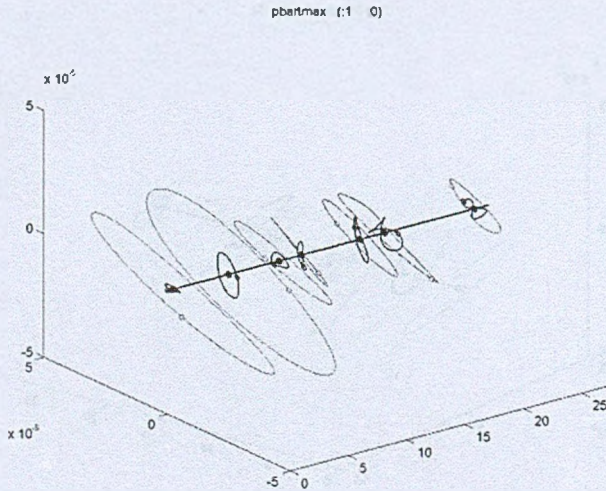
Rys. 4.56: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 1)



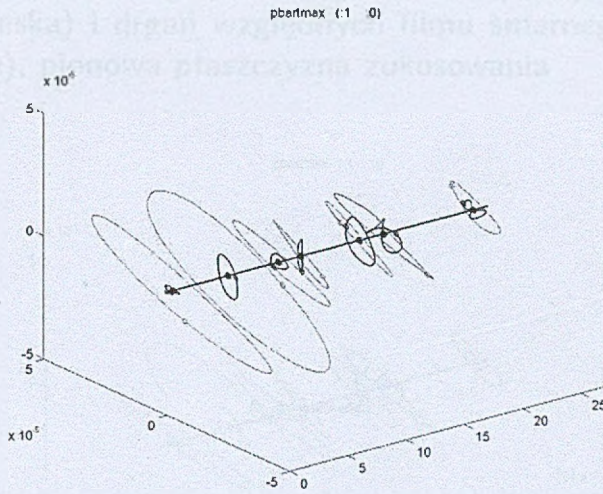
Rys. 4.57: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 2)



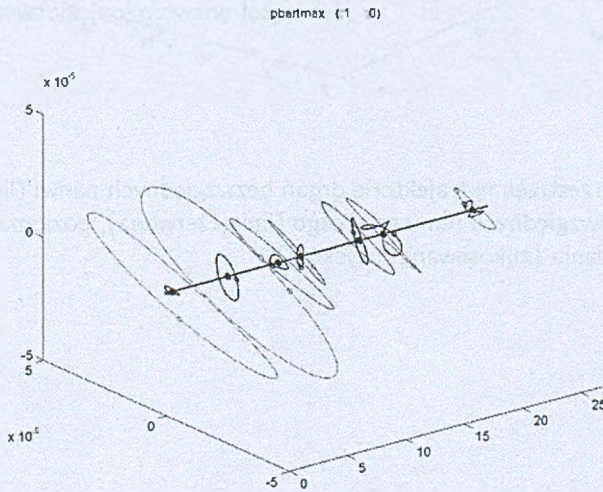
Rys. 4.58: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 3)



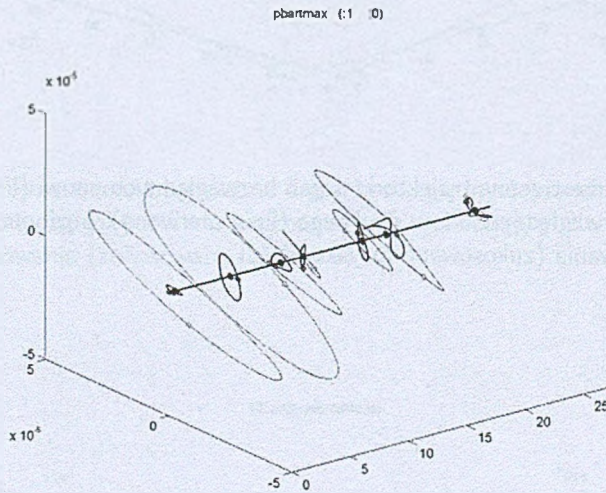
Rys. 4.59: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 4)



Rys. 4.60: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 5)

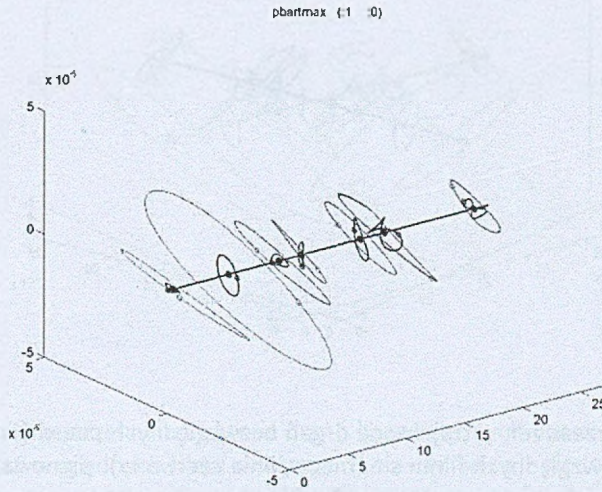


Rys. 4.61: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 6)

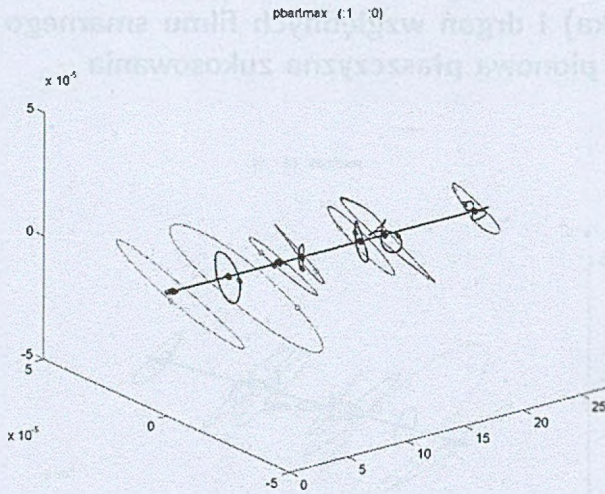


Rys. 4.62: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 7)

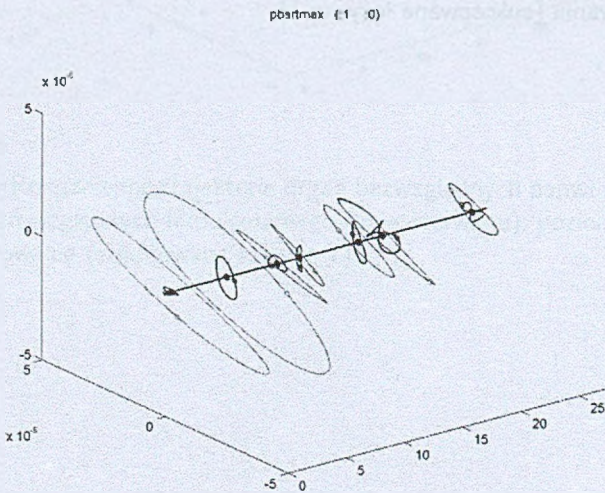
4.8.7. Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pionowa płaszczyzna zukosowania



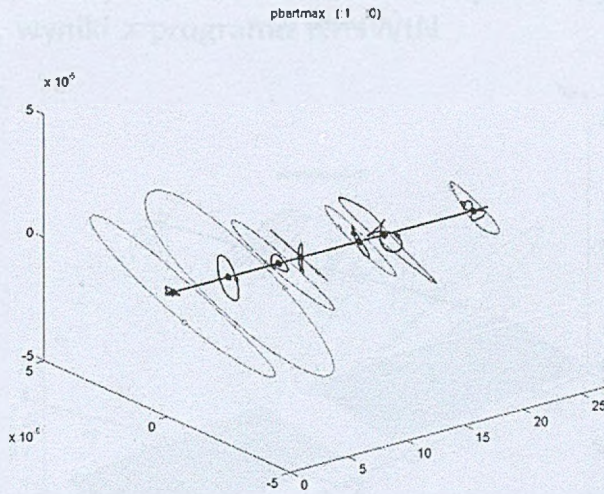
Rys. 4.63: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 1)



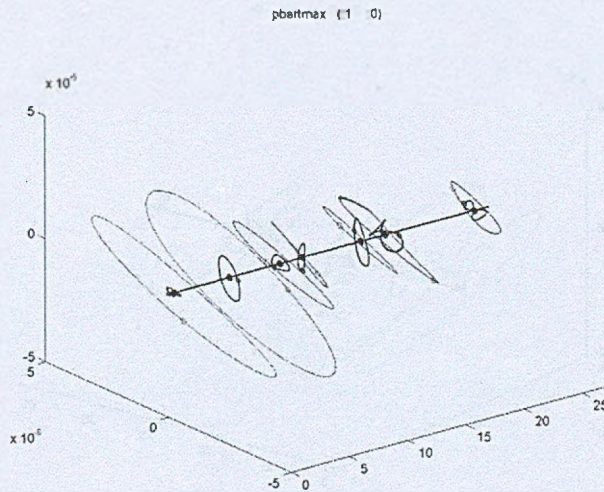
Rys. 4.64: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 2)



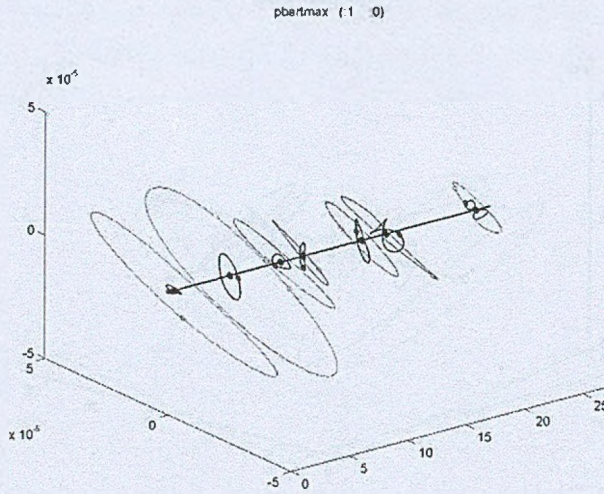
Rys. 4.65: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 3)



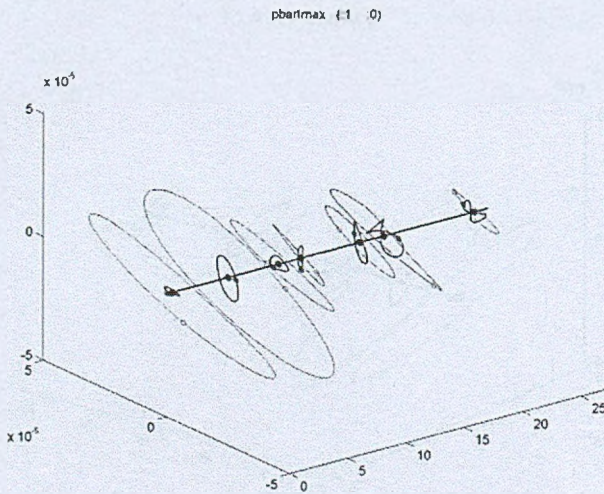
Rys. 4.66: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 4)



Rys. 4.67: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 5)

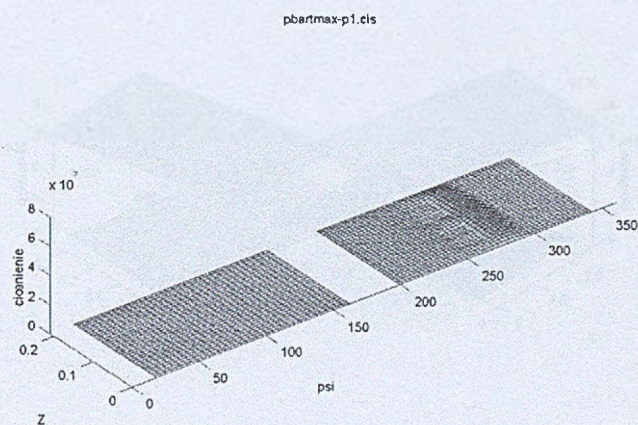


Rys. 4.68: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych węzłów linii wirników, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 6)

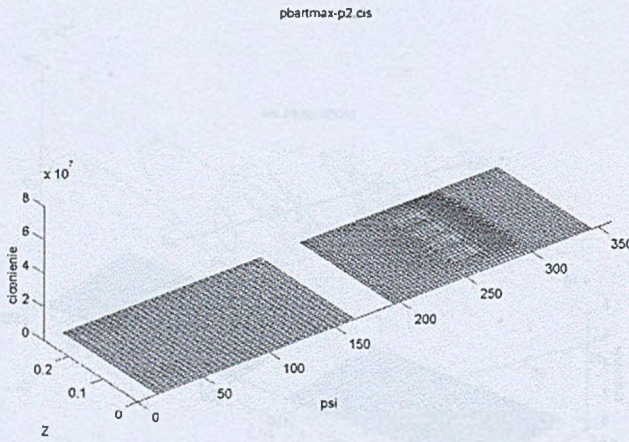


Rys. 4.69: Przestrzenne trajektorie drgań bezwzględnych panwi (linia niebieska) i drgań względnych filmu smarnego (linia czerwona), pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 7)

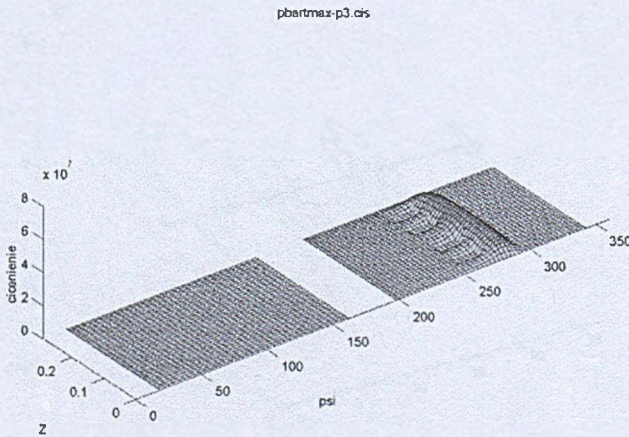
4.8.8. Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku N, przypadek bazowy, wyniki z programu KINWIN



Rys. 4.70: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 1, przypadek bazowy, wyniki z programu KINWIN

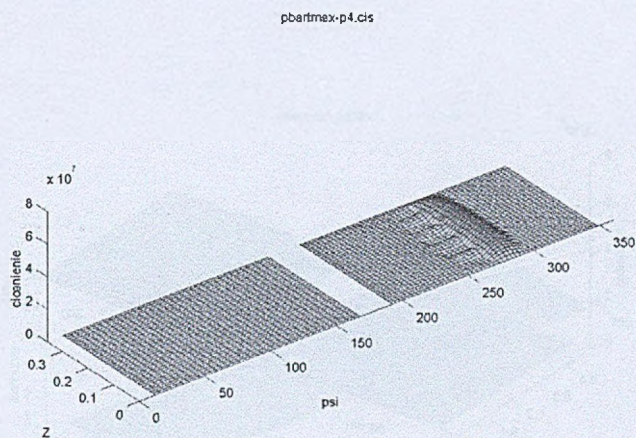


Rys. 4.71: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 2, przypadek bazowy, wyniki z programu KINWIN

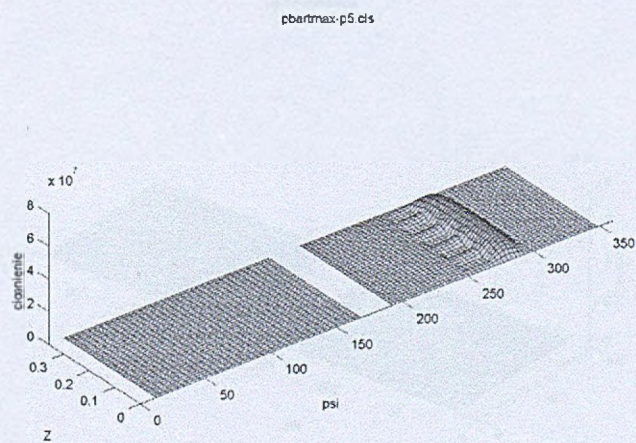


Rys. 4.72: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 3, przypadek bazowy, wyniki z programu KINWIN

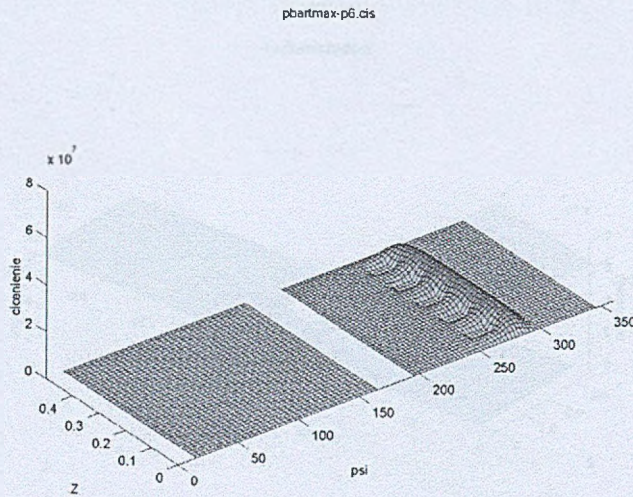
4.8.9. Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 4, pozioma płaszczyzna zukosowania, wyniki z programu KINWIN



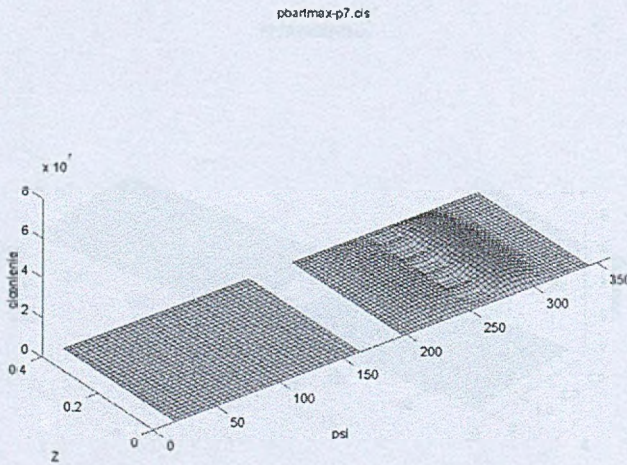
Rys. 4.73: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 4, przypadek bazowy, wyniki z programu KINWIN



Rys. 4.74: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 5, przypadek bazowy, wyniki z programu KINWIN

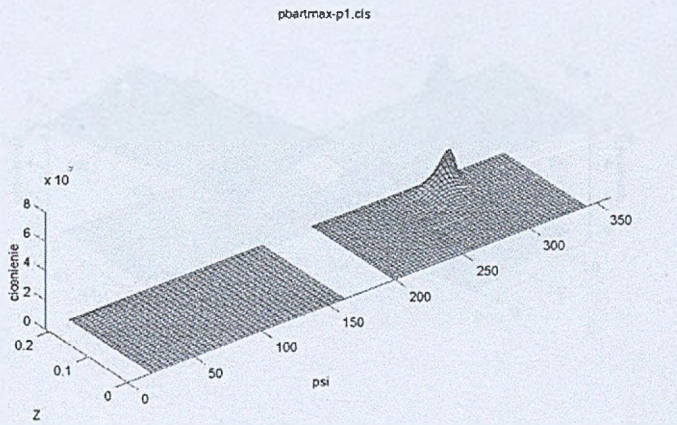


Rys. 4.75: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 6, przypadek bazowy, wyniki z programu KINWIN

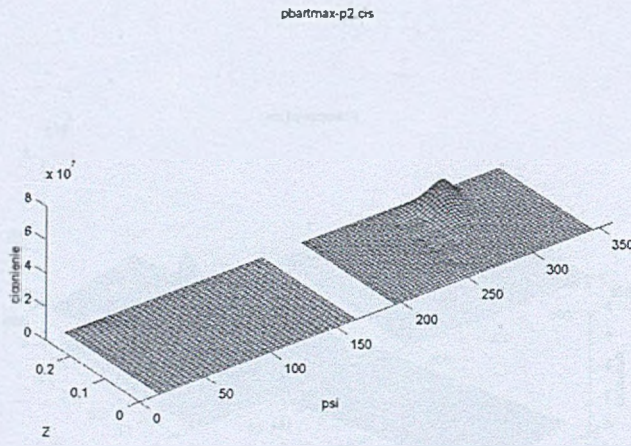


Rys. 4.76: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 7, przypadek bazowy, wyniki z programu KINWIN

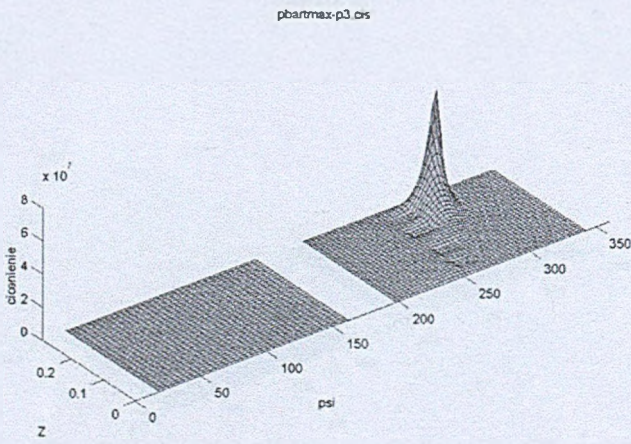
4.8.9. Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku N, pozioma płaszczyna zukosowania, wyniki z programu KINWIN



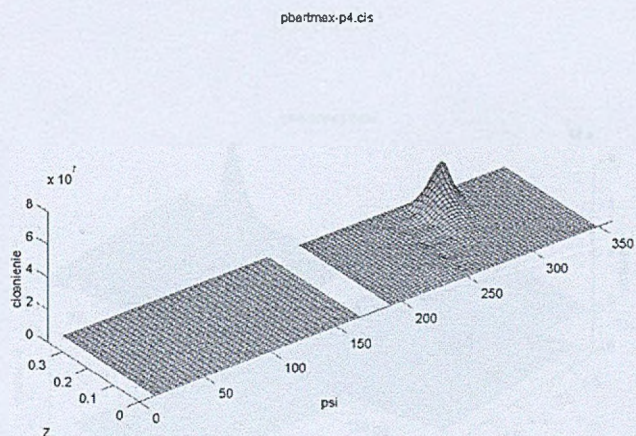
Rys. 4.77: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 1, pozioma płaszczyna zukosowania (zukośowane łożysko 1), wyniki z programu KINWIN



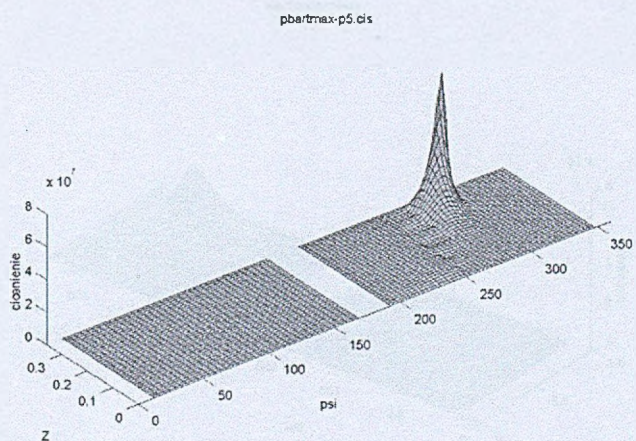
Rys. 4.78: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 2, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 2), wyniki z programu KINWIN



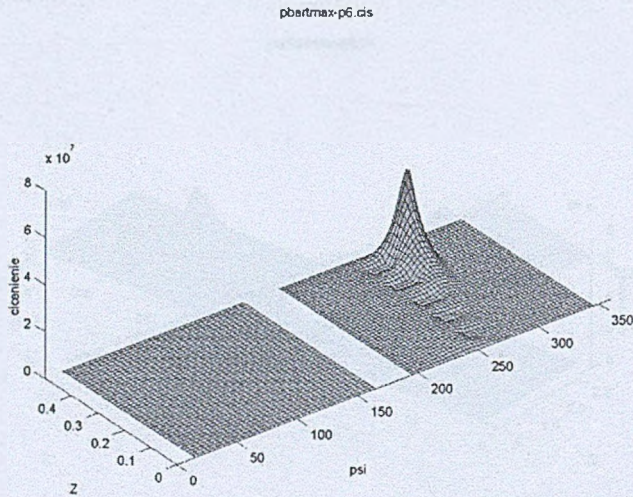
Rys. 4.79: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 3, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 3), wyniki z programu KINWIN



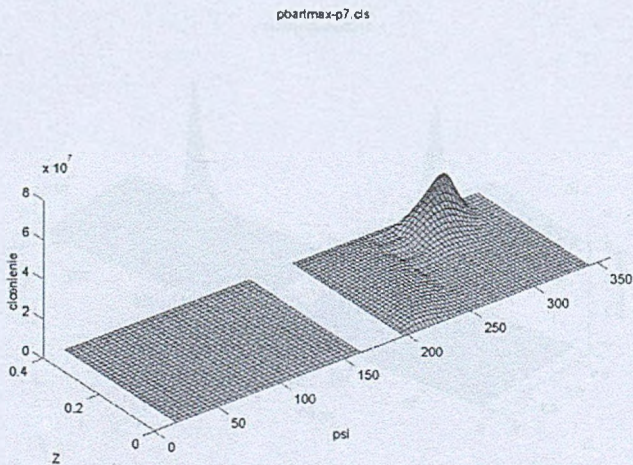
Rys. 4.80: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 4, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 4), wyniki z programu KINWIN



Rys. 4.81: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 5, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 5), wyniki z programu KINWIN

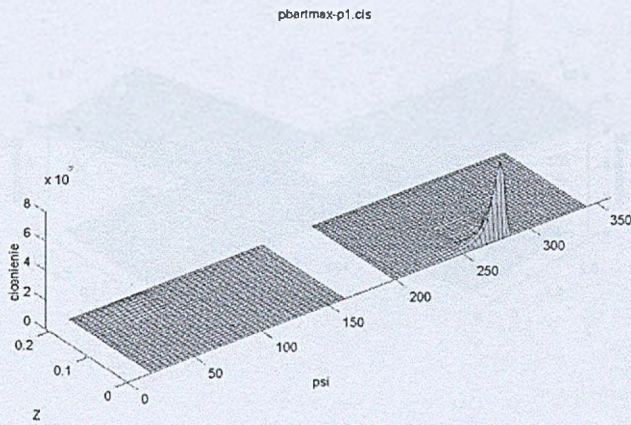


Rys. 4.82: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 6, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 6), wyniki z programu KINWIN

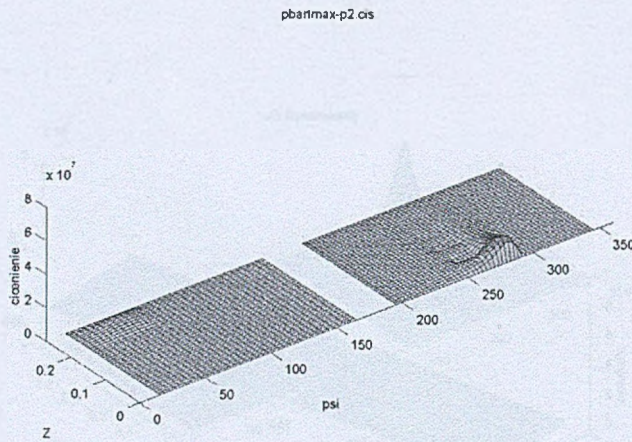


Rys. 4.83: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 7, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 7), wyniki z programu KINWIN

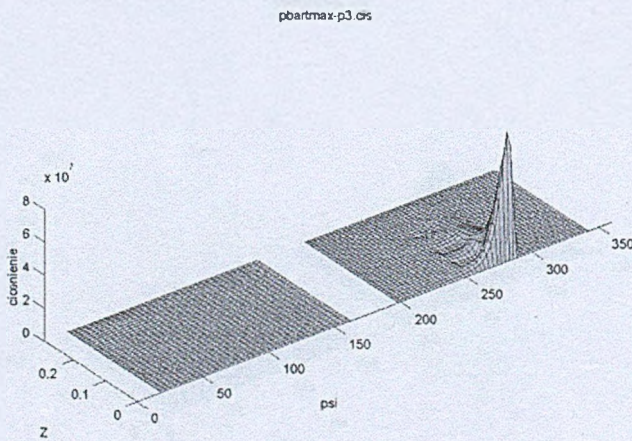
4.8.10. Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku N, pionowa płaszczyzna zukosowania, wyniki z programu KINWIN



Rys. 4.84: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 1, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 1), wyniki z programu KINWIN

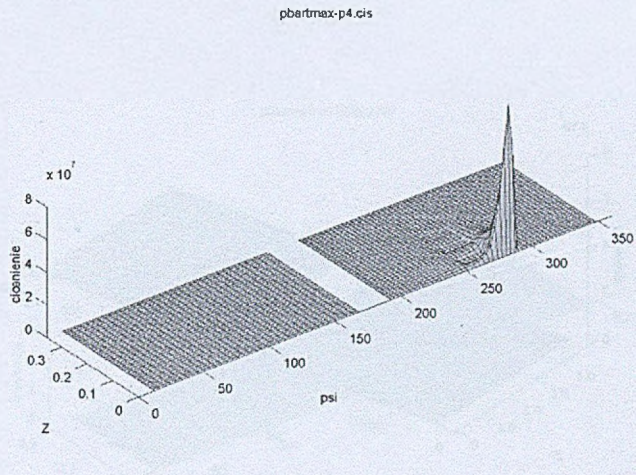


Rys. 4.85: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 2, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 2), wyniki z programu KINWIN



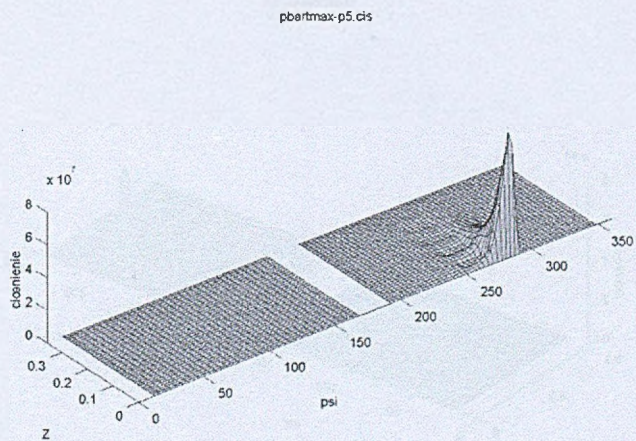
Rys. 4.86: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 3, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 3), wyniki z programu KINWIN

4.8.11. Przeglądamy rozkład ciśnienia w łożysku N, przewód bieżący, wyniki z programu NLDW

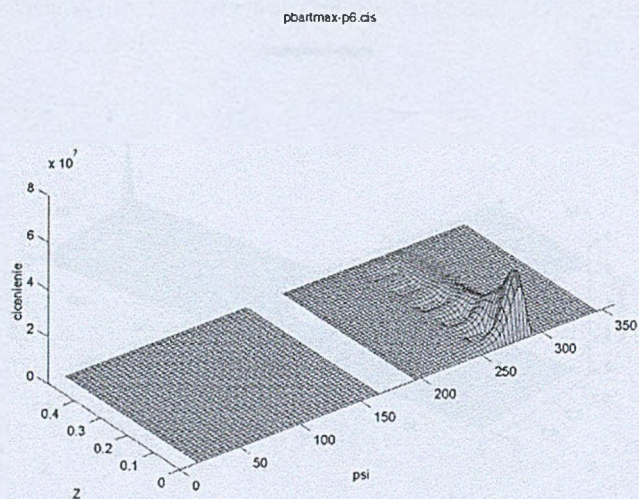


Rys. 4.87: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 4, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 4), wyniki z programu KINWIN

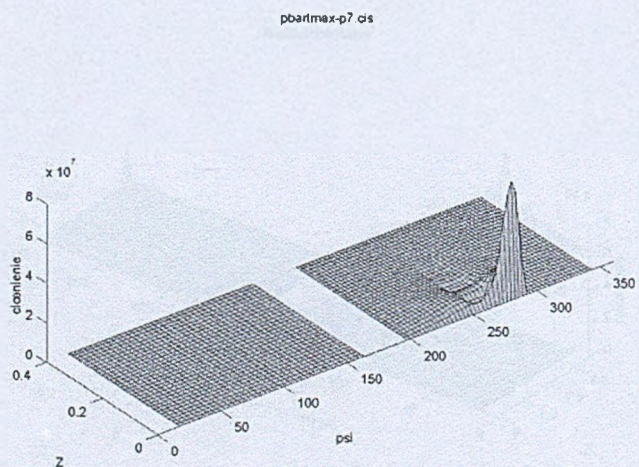
Rys. 4.81.1. Przeglądamy rozkład ciśnienia w łożysku L, przewód bieżący, wyniki z programu NLDW



Rys. 4.88: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 5, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 5), wyniki z programu KINWIN

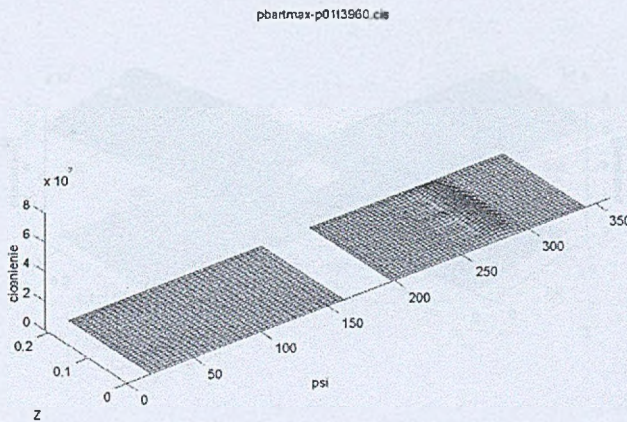


Rys. 4.89: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 6, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 6), wyniki z programu KINWIN

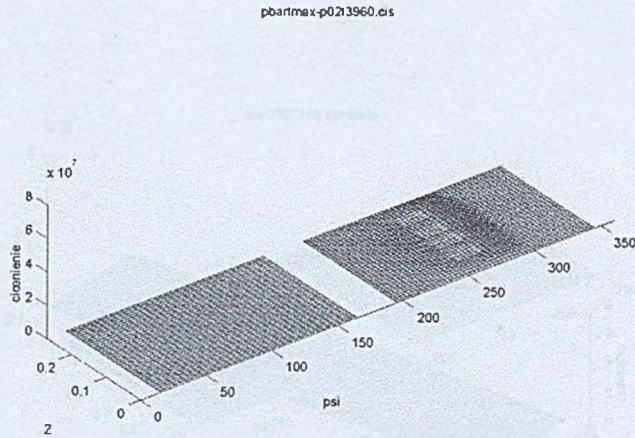


Rys. 4.90: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 7, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 7), wyniki z programu KINWIN

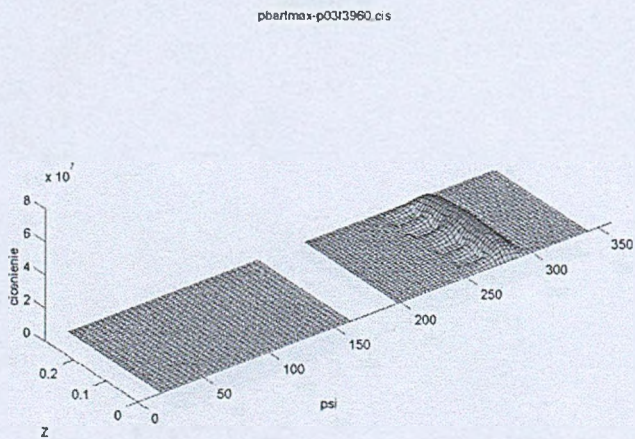
4.8.11. Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku N, przypadek bazowy, wyniki z programu NLDW



Rys. 4.91: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 1, przypadek bazowy, wyniki z programu NLDW

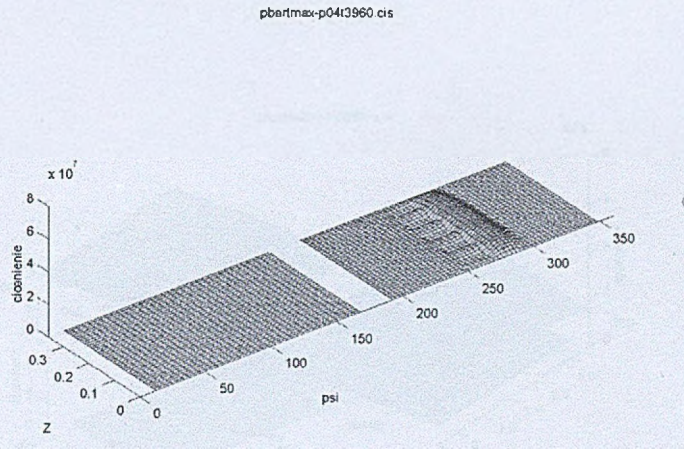


Rys. 4.92: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 2, przypadek bazowy, wyniki z programu NLDW



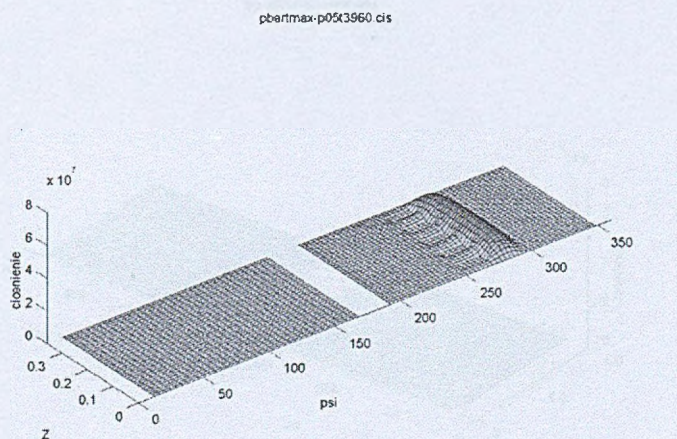
Rys. 4.93: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 3, przypadek bazowy, wyniki z programu NLDW

4.8.12. Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 4, przypadku bazowy. Macierzowa zakoszenia, wyniki z programu NLDW

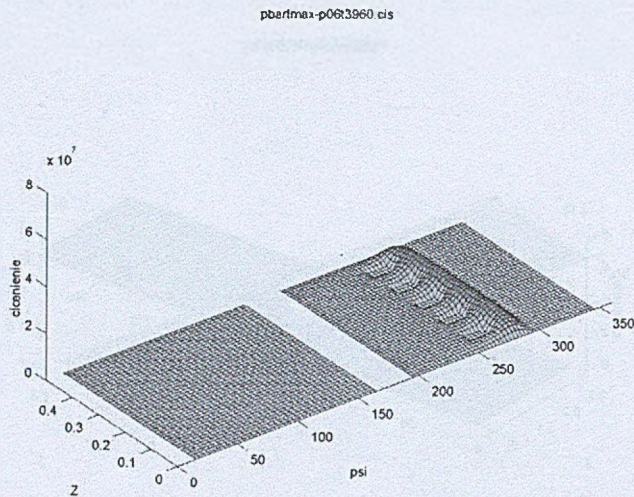


Rys. 4.94: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 4, przypadek bazowy, wyniki z programu NLDW

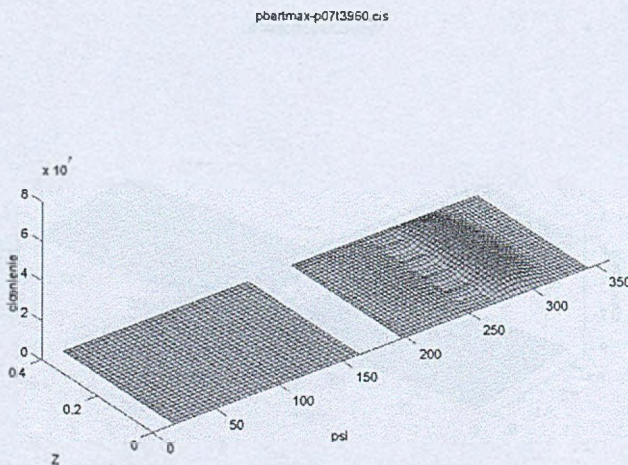
4.8.13. Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 5, przypadku bazowy. Macierzowa zakoszenia, wyniki z programu NLDW



Rys. 4.95: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 5, przypadek bazowy, wyniki z programu NLDW

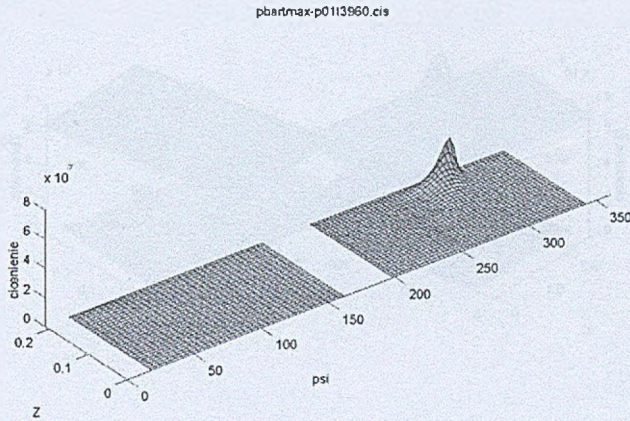


Rys. 4.96: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 6, przypadek bazowy, wyniki z programu NLDW

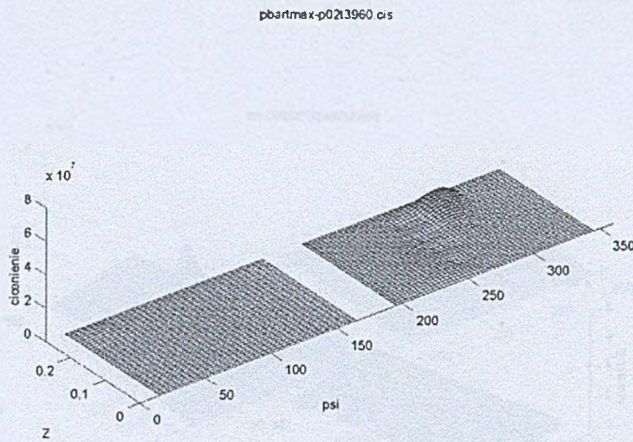


Rys. 4.97: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 7, przypadek bazowy, wyniki z programu NLDW

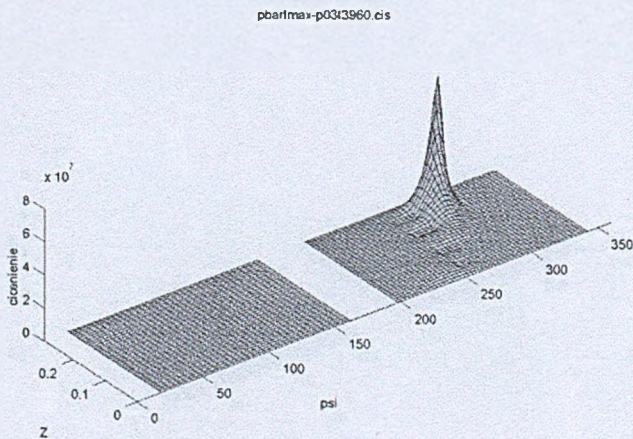
4.8.12. Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku N, pozioma płaszczyzna zukosowania, wyniki z programu NLDW



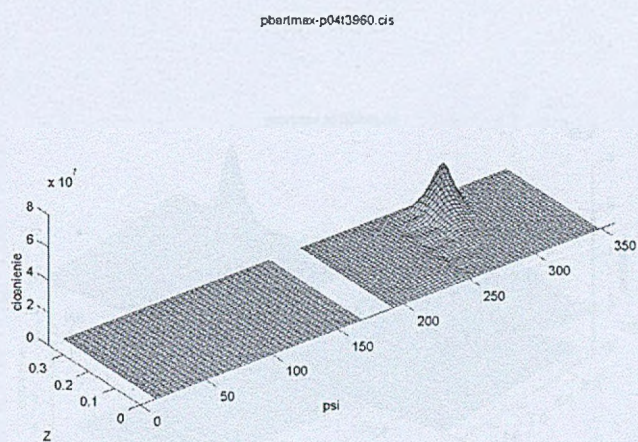
Rys. 4.98: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 1, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukośwane łożysko 1), wyniki z programu NLDW



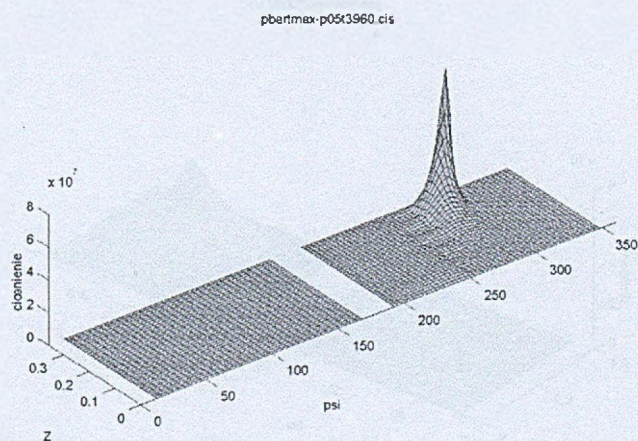
Rys. 4.99: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 2, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 2), wyniki z programu NLDW



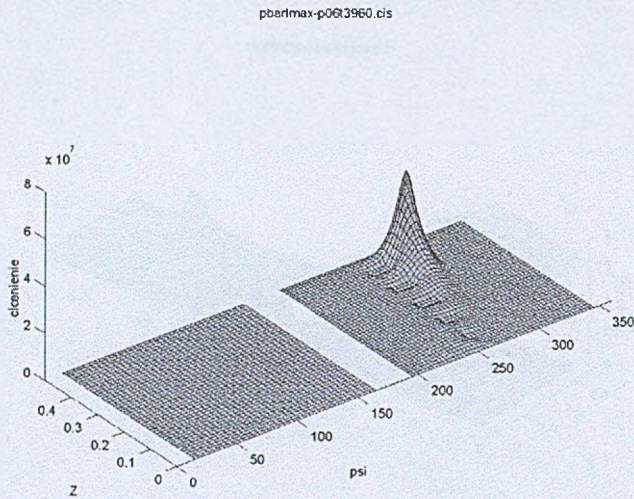
Rys. 4.100: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 3, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 3), wyniki z programu NLDW



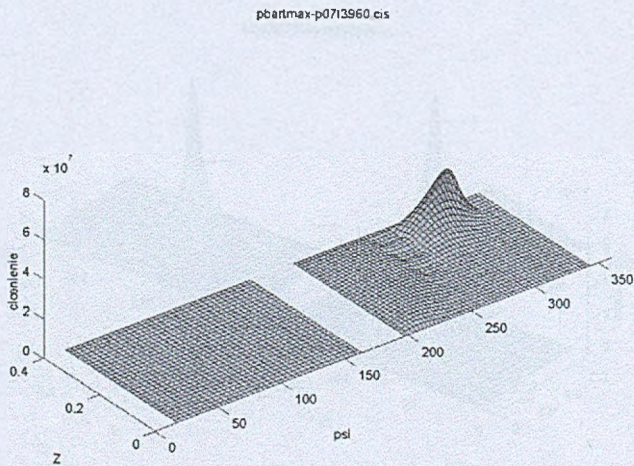
Rys. 4.101: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 4, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 4), wyniki z programu NLDW



Rys. 4.102: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 5, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 5), wyniki z programu NLDW

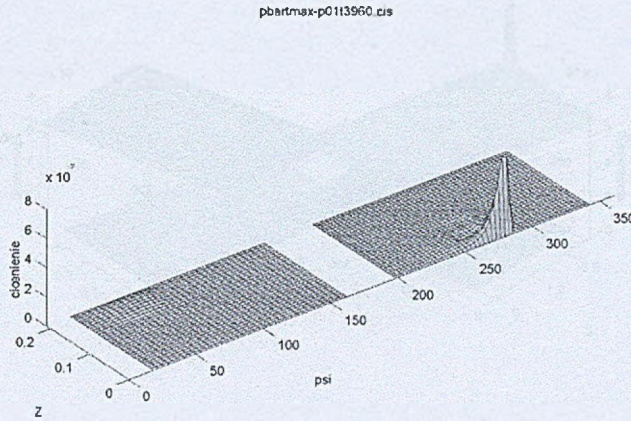


Rys. 4.103: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 6, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 6), wyniki z programu NLDW



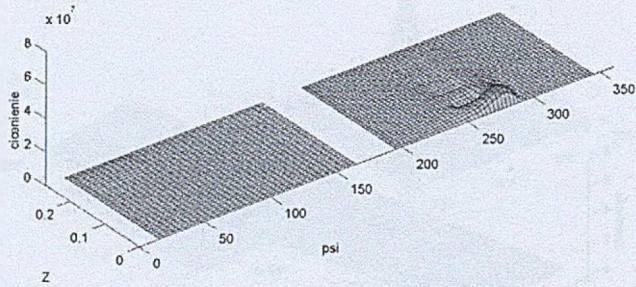
Rys. 4.104: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 7, pozioma płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 7), wyniki z programu NLDW

4.8.13. Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku N, pionowa płaszczyzna zukosowania, wyniki z programu NLDW



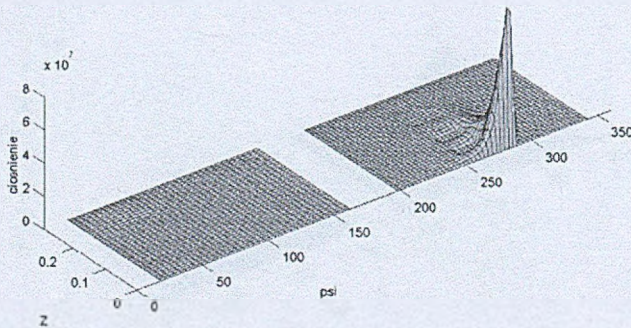
Rys. 4.105: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 1, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 1), wyniki z programu NLDW

pbarfmax-p0213960.cis



Rys. 4.106: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 2, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 2), wyniki z programu NLDW

pbarfmax-p0313960.cis



Rys. 4.107: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 3, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 3), wyniki z programu NLDW

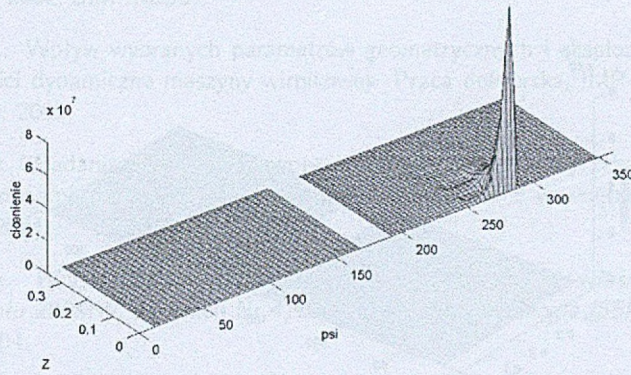
Bibliografia

[4.1] M. Łuczak: Badania wpływu ukształtowania (niekierowności) na własności dźwiękowe i mechaniczne żelazek. Prace Instytutu Techniki i Inżynierii, 1991, nr 1, s. 1-14. Warszawa 2002, SIMPhox

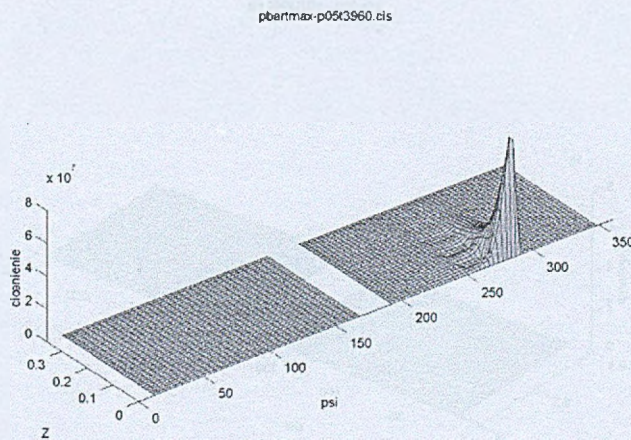
[4.2] M. Łuczak: Wpływ wzrastających parametrów mechanicznych i geometrycznych żelazek na własności dźwiękowe i mechaniczne. Prace Instytutu Techniki i Inżynierii, 1992, nr 2, s. 1-14. Warszawa 2002, SIMPhox

[4.3] M. Łuczak: Wpływ wzrastających parametrów mechanicznych i geometrycznych żelazek na własności dźwiękowe i mechaniczne. Prace Instytutu Techniki i Inżynierii, 1993, nr 3, s. 1-14. Warszawa 2002, SIMPhox

[4.4] M. Łuczak: Wpływ wzrastających parametrów mechanicznych i geometrycznych żelazek na własności dźwiękowe i mechaniczne. Prace Instytutu Techniki i Inżynierii, 1994, nr 4, s. 1-14. Warszawa 2002, SIMPhox

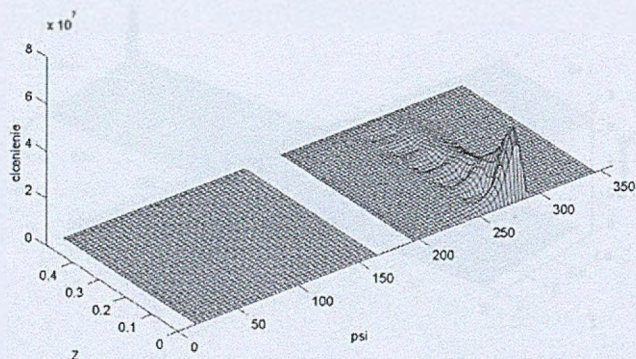


Rys. 4.108: Przestrzenny rozkład ciśnienia w żyłysku 4, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane żyłysko 4), wyniki z programu NLDW



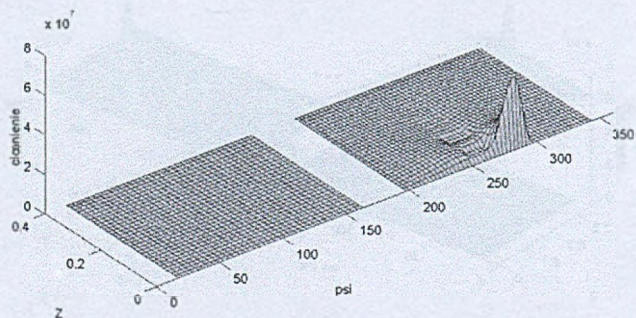
Rys. 4.109: Przestrzenny rozkład ciśnienia w żyłysku 5, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane żyłysko 5), wyniki z programu NLDW

pbarfmax-p06r3960.cis



Rys. 4.110: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 6, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 6), wyniki z programu NLDW

pbarfmax-p07i3960.cis



Rys. 4.111: Przestrzenny rozkład ciśnienia w łożysku 7, pionowa płaszczyzna zukosowania (zukosowane łożysko 7), wyniki z programu NLDW

Bibliografia

- [4.1] M. Łuczak. Badania wpływu imperfekcji panwi (zukosowania) na własności dużej maszyny energetycznej. *Tribologia*, wolumen 1/2002 (181) serii *Tribologia*, strony 351–364, Warszawa, 2002. SIMPRESS.
- [4.2] M. Łuczak. Wpływ wybranych parametrów geometrycznych i eksploatacyjnych łożysk na własności dynamiczne maszyny wirnikowej. Praca doktorska, IMP PAN w Gdańsku 3252/2003, 2002.
- [4.3] M. Łuczak. Badania symulacyjne wpływu defektu w postaci przekoszenia panwi na własności dynamiczne turbozespołu 200MW. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, 2004.
- [4.4] M. Łuczak. *Wpływ defektu w postaci zukosowania panwi na własności dynamiczne turbozespołu 200MW*, wolumen Nr 4/2004 (196) serii *Tribologia ISSN 0208 7774 Rok XXXV*. 2004.

Bibliografia

[1] M. Łucak, Wpływ diety na zdrowie i jakość życia, *Wiadomości Lekarskie*, 2002, 55(1), 121-124.

[2] M. Łucak, Wpływ diety na zdrowie i jakość życia, *Wiadomości Lekarskie*, 2002, 55(1), 121-124.

[3] M. Łucak, Wpływ diety na zdrowie i jakość życia, *Wiadomości Lekarskie*, 2002, 55(1), 121-124.

[4] M. Łucak, Wpływ diety na zdrowie i jakość życia, *Wiadomości Lekarskie*, 2002, 55(1), 121-124.

[5] M. Łucak, Wpływ diety na zdrowie i jakość życia, *Wiadomości Lekarskie*, 2002, 55(1), 121-124.

[6] M. Łucak, Wpływ diety na zdrowie i jakość życia, *Wiadomości Lekarskie*, 2002, 55(1), 121-124.

[7] M. Łucak, Wpływ diety na zdrowie i jakość życia, *Wiadomości Lekarskie*, 2002, 55(1), 121-124.

[8] M. Łucak, Wpływ diety na zdrowie i jakość życia, *Wiadomości Lekarskie*, 2002, 55(1), 121-124.

[9] M. Łucak, Wpływ diety na zdrowie i jakość życia, *Wiadomości Lekarskie*, 2002, 55(1), 121-124.

[10] M. Łucak, Wpływ diety na zdrowie i jakość życia, *Wiadomości Lekarskie*, 2002, 55(1), 121-124.

Rozdział 5

Obliczenia pęknięć wirnika turbozespołu 13K215

Sławomir Banaszek

5.1. Uwagi wstępne

Rozważone zostały dwa możliwe przypadki umiejscowienia pęknięcia w wirniku turbozespołu (Rys. 5.1):

Pęknięcie 1 (CR1) – pęknięcie umiejscowione w łożysku nr 6 – element nr 115 (węzły 125 i 128)

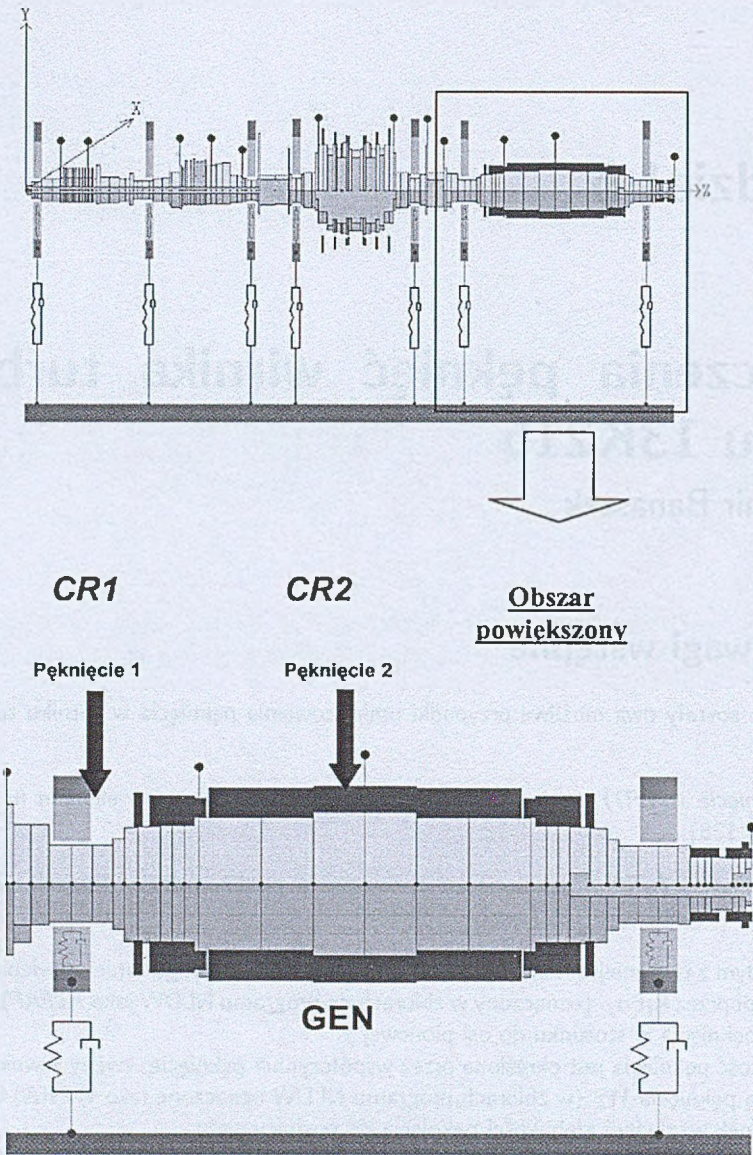
Pęknięcie 2 (CR2) – pęknięcie umiejscowione w pobliżu połowy długości wirnika generatora – element nr 125 (węzły 137 i 138)

W każdym z tych miejsc rozważono po 4 przypadki **obwodowego** umiejscowienia pęknięcia, opisanego poprzez kąt α_P (oznaczony w zbiorach do programu NLDW jako $ALFAP$) określający położenie pęknięcia w stosunku do osi pionowej y .

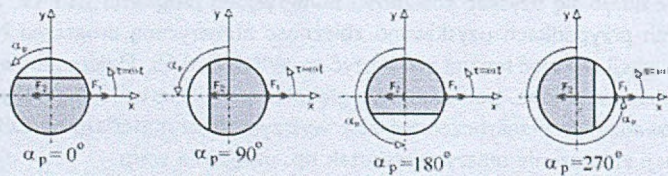
Głębokość pęknięcia jest określona przez współczynnik pęknięcia, zwany również względną głębokością pęknięcia WP (w zbiorach programu NLDW oznaczone jako $WPKN$) oznaczającą tutaj stosunek względnej głębokości pęknięcia do średnicy wału.

Obliczenia prowadzono osobno dla *Pęknięcia 1* i *Pęknięcia 2*. Głębokość pęknięcia przyjmowano od $WPKN=0.1$ co 0.05 ($0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$ itd.). Jako wartość maksymalną przyjęto $WPKN=0.65$. Przyjęcie takiego właśnie współczynnika pęknięcia za maksymalny wynikło stąd, iż dla jednego z rozpatrywanych przypadków (*Pęknięcie 2*, $ALFAP=180^\circ$) dla $WPKN=0.7$ nie udało się uzyskać zbieżności numerycznej programu NLDW. Pomimo zatem, iż w pozostałych przypadkach uzyskiwano zbieżność numeryczną programu NLDW, uznano, że analizę propagacji pęknięć można zakończyć na $WPKN=0.65$. Dalsze zmniejszanie przekroju wydaje się nieuzasadnione, ponieważ tak głębokie pęknięcia wału mogłoby w rzeczywistej maszynie doprowadzić do przekroczenia granic wytrzymałości materiału na zadane obciążenie, a w konsekwencji zniszczenie maszyny wskutek np. ukręcenia wału.

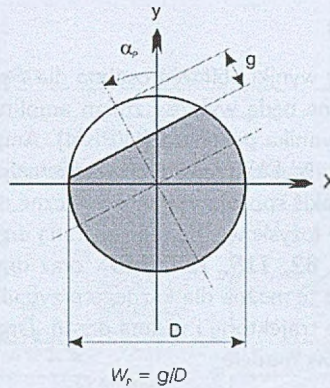
Program NLDW wymaga zachowania ośmionakowej nazwy zestawu plików danych i wyników dotyczących danego przypadku obliczeniowego. W nazwie tej zakodowano podstawowe informacje na temat danego przypadku według formatu:



Rys. 5.1: Umiejscowienie pęknięć



Rys. 5.2: Obwodowe umiejscowienie pęknięcia



Rys. 5.3: Względna głębokość pęknięcia (współczynnik pęknięcia)

CRMXPWPKN

Poszczególne symbole oznaczają:

- *CR* – Pęknięcie (od ang. crack);
- *M* – umiejscowienie wzdłużne pęknięcia, $M=1$ lub 2 (patrz Rys.5.1);
- *X* – umiejscowienie obwodowe pęknięcia (patrz Rys.5.3), $X=A, B, C$ lub D , co oznacza odpowiednio kąt $ALFAP=0^{\circ}, 90^{\circ}, 180^{\circ}$ i 270° (patrz Rys.5.2)
- *WPKN* – współczynnik pęknięcia (patrz Rys.5.3)

Przykładowo:

CR1B0250 oznacza: Pęknięcie 1 (łożysko nr 6), pod kątem 90° (na obwodzie), o głębokości względnej 0.250 (25%);

CR2D0500 oznacza: Pęknięcie 2 (środek generatora), pod kątem 270° (na obwodzie), o głębokości względnej 0.500 (50%).

Według powyższego schematu nadano nazwy zarówno plikom zawierającym dane i wyniki programu NLDW dla poszczególnych przypadków, jak i katalogom, w których te pliki się znajdują.

5.1.1. Obliczenia

Obliczenia prowadzono każdorazowo zmieniając dane dotyczące elementu z pęknięciem w plikach danych do NLDW (linia nr 231 w plikach z rozszerzeniem *.wdo). Ponieważ modelowano jedynie defekt typu *pęknięcie wirnika*, nie było potrzeby prowadzenia każdorazowych obliczeń kinetostatyki. Pęknięcie wirnika wprowadza bowiem dodatkowe **dynamiczne** macierze sztywności i tłumienia, nie mające wpływu na kinetostatykę rozpatrywanego układu. Pominięto zatem obliczenia programami KINWIN, przyjmując dla każdego z przeliczonych przypadków parametry kinetostatyczne odpowiadające przypadkowi bazowemu. Obliczenia były prowadzone zatem tylko programem NLDW.

5.1.2. Wyniki obliczeń

Poniżej zaprezentowane zostaną wyniki obliczeń osobno dla *Pęknięcia 1* i *Pęknięcia 2*. Na poszczególnych rysunkach pokazane będą wykresy zmian amplitud drgań wybranych węzłów w zależności od wielkości współczynnika pęknięcia (WPKN). Amplitudy drgań zostały określone na podstawie wyników programu NLDW, zawartych w zbiorach z rozszerzeniem *.amp. Starano się wybrać węzły będące w jakiś sposób charakterystyczne dla badanej maszyny. Dla drgań poprzecznych są to zatem węzły łożyskowe. Podane zostaną drgania bezwzględne panwi (określone dla węzłów nr 5, 41, 72, 82, 115, 125, 149), oraz drgania względne poszczególnych czopów łożyskowych. Informacje te można dla każdego przypadku odczytać również z kart diagnostycznych, podających także trajektorie i widma drgań. Drgania wzdłużne natomiast będą podane dla następujących węzłów modelu:

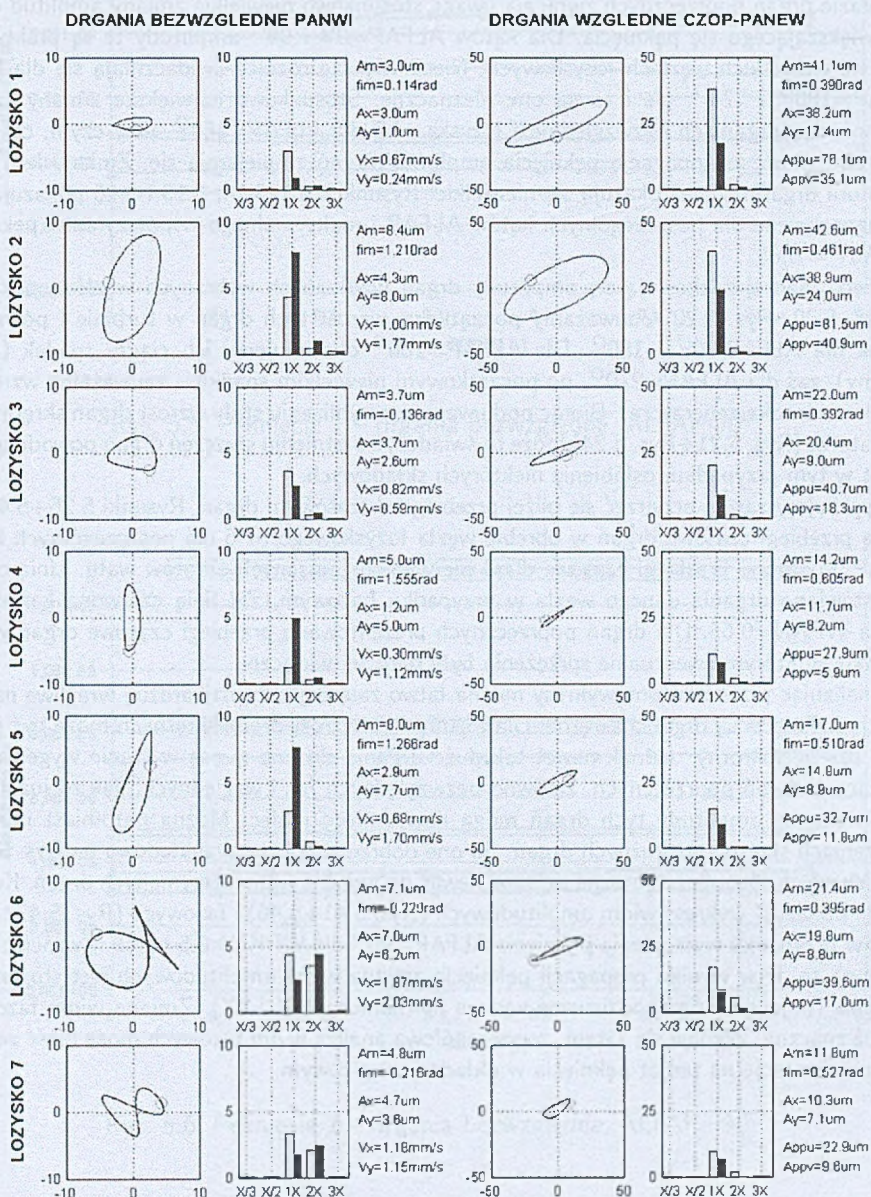
- węzeł nr 32, odpowiadający stopniowi regulacyjnemu maszyny (miejsce, w którym przyjęto największe dynamiczne wymuszenia aerodynamiczne),
- węzeł nr 59 – środek części SP turbiny,
- węzeł nr 100 – środek części NP turbiny,
- węzeł nr 125 – czop łożyska nr 6, sąsiadujący z Pęknięciem 1, w węzle tym uzyskiwano dosyć dobrą odpowiedź na zadawane defekty,
- węzeł nr 138 – środek generatora, sąsiadujący z Pęknięciem 2.

Zaprezentowane zostaną również zmiany amplitud drgań skrętnych dla węzła nr 125 oraz dla środka generatora (węzeł 138). Wybór tych właśnie węzłów wynikał z tego, że w węzłach odpowiadających generatorowi dały się zauważyć zmiany obrazu drgań skrętnych. Zmiany te w węzłach turbiny były pomijalne.

W niektórych, ciekawszych przypadkach zaprezentowane zostaną także przebiegi czasowe drgań niektórych węzłów oraz widma amplitudowe i fazowe.

Jedną z form prezentacji wyników obliczeń są wspomniane karty diagnostyczne. Zawierają one informacje o symulowanym defekcie, trajektorie i widma amplitudowe drgań bezwzględnych panwi i drgań względnych czopów łożyskowych (dla wszystkich łożysk) oraz pewne dane liczbowe dotyczące drgań poprzecznych w tych węzłach układu. Dzięki graficznej formie są one wygodne zarówno w prezentacji drgań, jak i ich porównań pomiędzy poszczególnymi przypadkami obliczeniowymi. Rys.4.5 prezentuje kartę diagnostyczną przypadku bazowego, będącego wynikiem dostrojenia modelu do wyników pomiarów na rzeczywistym obiekcie. Przypadek bazowy stanowi jednocześnie przypadek odniesienia: porównując wyniki obliczeń symulujących defekty w maszynie z przypadkiem bazowym można określić wpływ danego defektu na stan dynamiczny maszyny.

Kod karty: BAZA-gen-aerodynMAX	Obiekt: 13K215	Data: 13.02.2004
Opis defektu:		
Dane zmienne:		



Oznaczenia: A =amplituda przemieszczeń, V =predkosc RMS, f_{im} =kat pochycenia maksymalnej przekrojonej trajektorii, m =wartosc maksymalna po-peak to peak, x,y =osie pozioma i pionowa, u,v =osie pod katem $\pi/4$ do x,y , wykresy widm: szary - kier. x , czarny - kier. y .

Rys. 5.4: Karta diagnostyczna przypadku bazowego

5.2. Pęknięcie 1

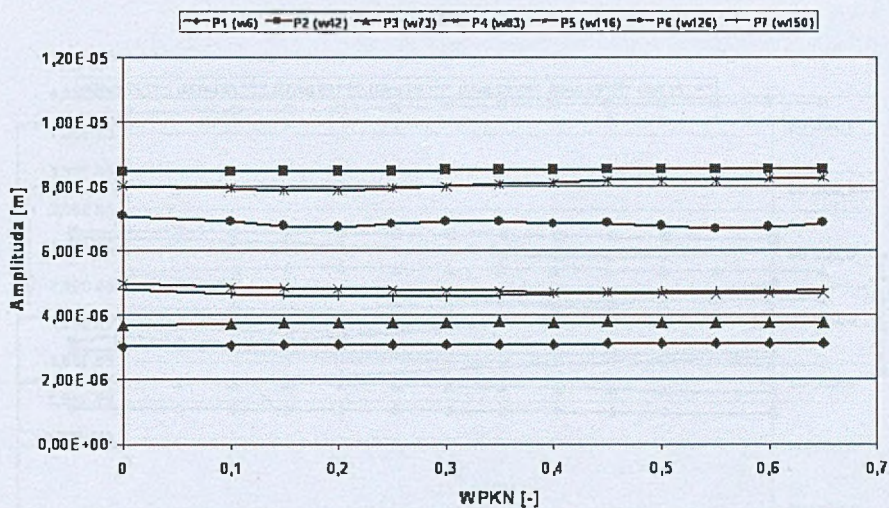
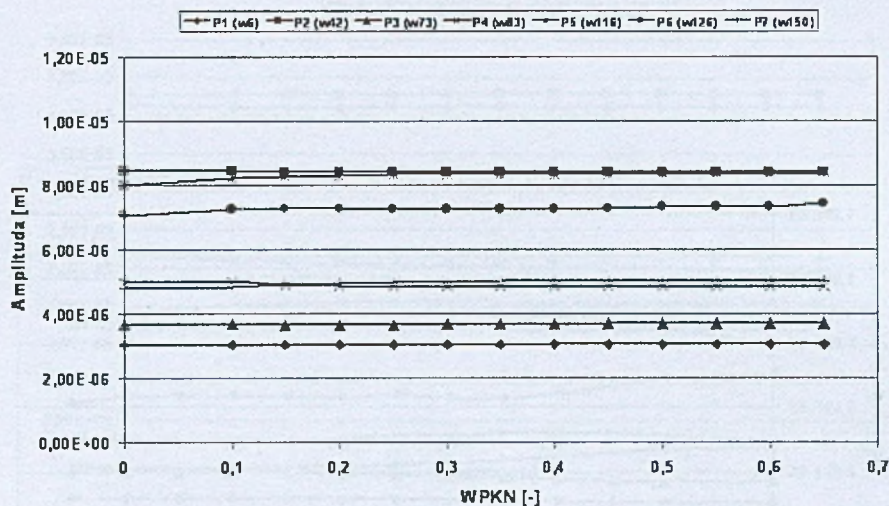
Pęknięcie 1 jest umiejscowione w łożysku nr 6. Rys. 5.5÷Rys.5.8 przedstawia amplitudy drgań bezwzględnych panwi, Rys. 5.9÷Rys.5.12 – amplitudy drgań względnych czopów łożyskowych. W obrazie drgań poprzecznych zwracają uwagę stosunkowo niewielkie zmiany amplitud drgań dla zwiększającego się pęknięcia. Dla kątów $ALFAP=0^{\circ}$ i 90° amplitudy te są praktycznie stałe we wszystkich węzłach łożyskowych. Nieco większe różnice uwidaczniają się dla kątów $ALFAP=180^{\circ}$ i 270° , ale i tu są one nieznaczne. Stosunkowo największe zmiany zauważyć można w drganiach bezwzględnych łożyska nr 6 dla $ALFAP=180^{\circ}$, przy czym, co warto podkreślić, wraz z propagacją pęknięcia amplitudy drgań zmniejszają się. Zmiany kształtów trajektorii drgań również okazują się niewielkie. Rysunki 5.13, 5.14, 5.15 i 5.16 pokazują karty diagnostyczne dla poszczególnych kątów $ALFAP$ i maksymalnego współczynnika pęknięcia $WPKN = 0.65$.

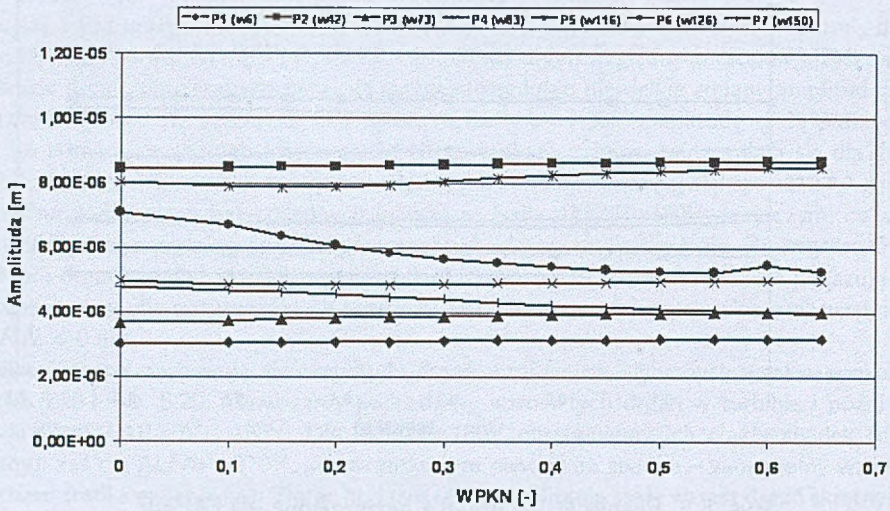
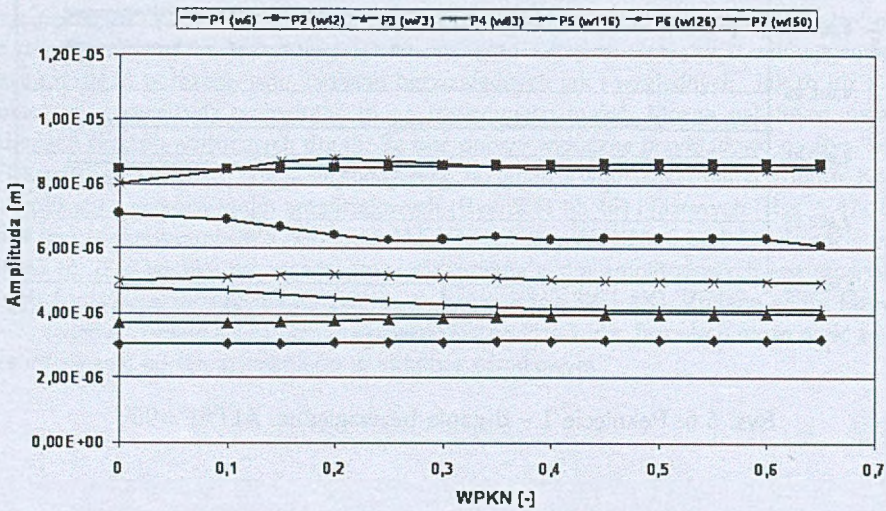
Nieco inaczej zachowują się amplitudy drgań wzdłużnych wybranych węzłów, pokazane na Rys. 5.20÷Rys. 5.20. Zauważamy początkowy wzrost tych drgań w turbinie i późniejszy spadek dla $ALFAP=0^{\circ}$ i 180° . Dla $ALFAP=180^{\circ}$ obserwujemy ich ciągły spadek (dostyć znaczny), zaś dla $ALFAP=270^{\circ}$, po początkowym niewielkim spadku – zauważalny wzrost (z wyjątkiem środka generatora). Biorąc pod uwagę w przybliżeniu stały wzrost drgań skrętnych w generatorze (Rys. 5.21÷Rys. 5.24) może to świadczyć o istnieniu sprzężeń drgań powodujących, akurat w tym przypadku, osłabienie niektórych składowych.

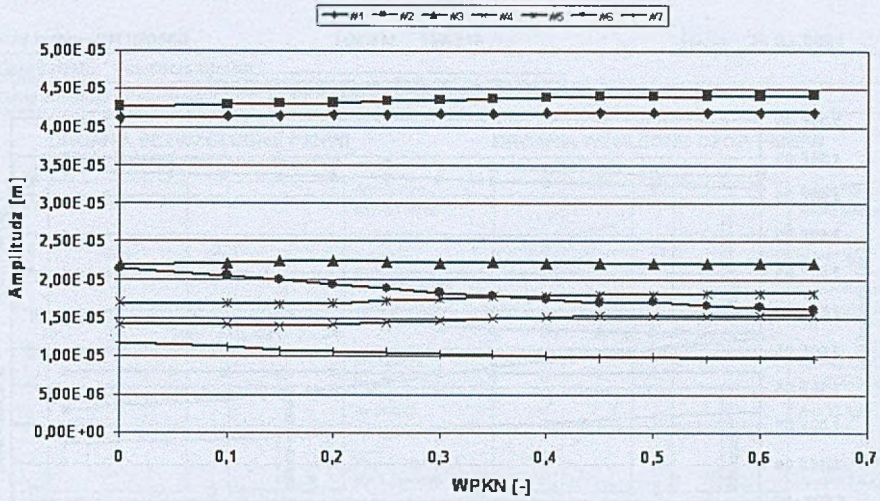
Spróbujmy zatem przyjrzeć się bliżej przebiegom czasowym drgań. Rysunki 5.25÷5.40 pokazują przebiegi czasowe drgań w obrębie węzła łożyskowego nr 6 dla poszczególnych kątów $ALFAP$. Pokazano przebiegi czasowe dla 4 pierwszych zapisanych obrotów wału. Linią czarną przedstawiono drgania danego węzła w przypadku bazowym, zaś linią czerwoną każdorazowo dla $WPKN=0.65$. Dla drgań poprzecznych prezentowano przebiegi czasowe drgań w tym kierunku, w którym ewentualne sprzężenia były bardziej widoczne.

Analizując przedstawione wykresy można łatwo zauważyć, że najbardziej wrażliwe na propagację pęknięcia są drgania skrętne. Dla Pęknięcia 1 wzrost drgań skrętnych może być nawet około dziesięciokrotny. Jednak nawet tak duże drgania skrętne nie są w stanie wygenerować znaczących drgań poprzecznych, zarówno bezwzględnych jak i względnych. Jak to już z resztą pokazano – amplitudy tych drgań mogą nawet nieco maleć. Można natomiast mówić o sprzężeniach skrętno-wzdłużnych drgań. Są one dobrze widoczne przykładowo na Rys. 5.40.

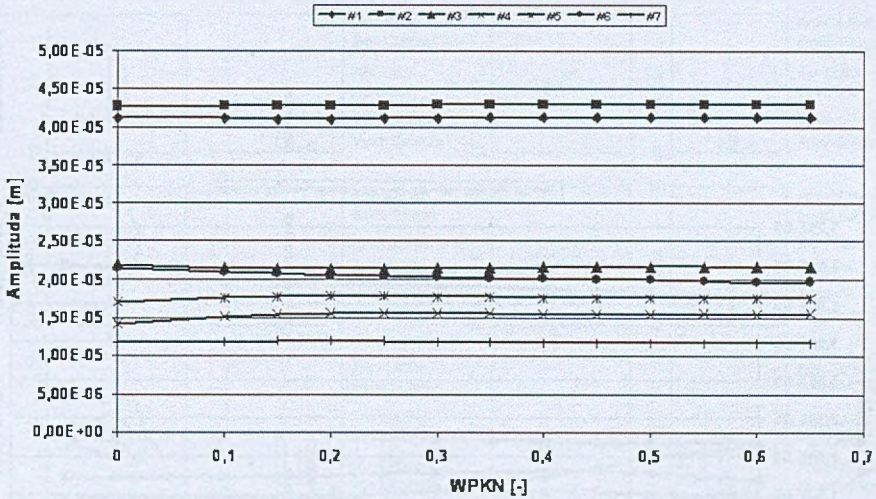
Ciekawych spostrzeżeń można się spodziewać po analizie widm otrzymanych drgań. Kolejne rysunki pokazują wykresy widm amplitudowych (Rys. 5.41÷5.46) i fazowych (Rys. 5.47÷5.52) drgań w przypadku wystąpienia pęknięcia $ALFAP=90^{\circ}$ dla $WPKN=0.5$ i 0.65 . Zwrócić uwagę należy na to, iż w wyniku propagacji pęknięcia zmiana widm amplitudowych jest stosunkowo niewielka (pojawiają się spodziewane wyższe harmoniczne 3X i 4X). Zmiana widm fazowych jest już znaczna. Wydaje się zatem, że szczegółowa analiza widm fazowych może nieść ze sobą bliższe informacje na temat pęknięcia w układzie wirnikowym.

Rys. 5.5: Pęknięcie 1 – drgania bezwzględne, $ALFAP=0^\circ$ Rys. 5.6: Pęknięcie 1 – drgania bezwzględne, $ALFAP=90^\circ$

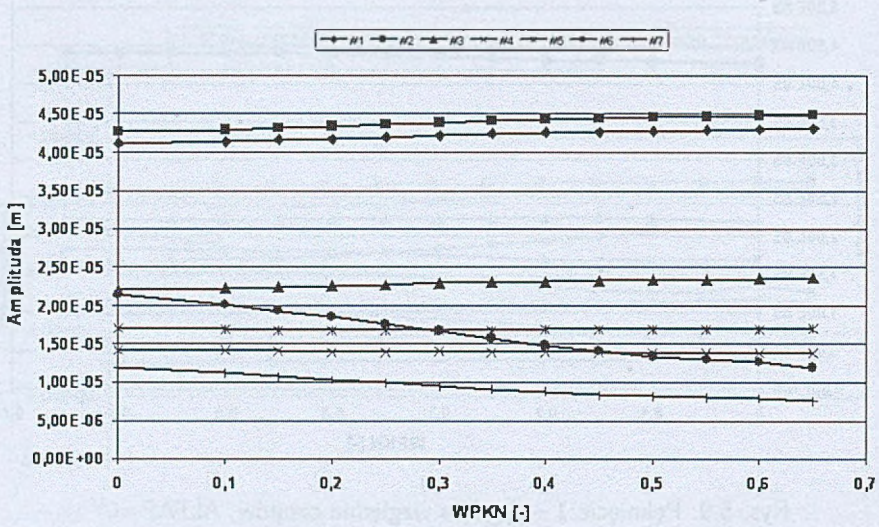
Rys. 5.7: Pęknięcie 1 – drgania bezwzględne, ALFAP=180^oRys. 5.8: Pęknięcie 1 – drgania bezwzględne, ALFAP=270^o



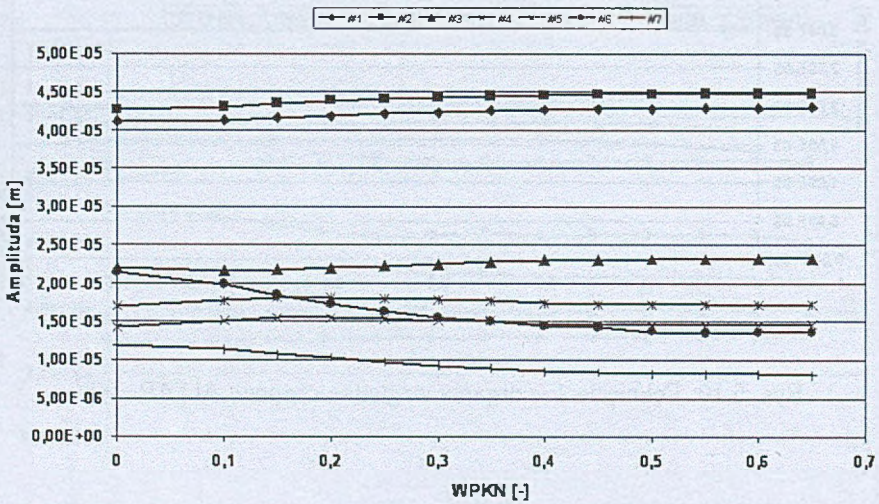
Rys. 5.9: Pęknięcie 1 – drgania względne czopów, ALFAP=0°



Rys. 5.10: Pęknięcie 1 – drgania względne czopów, ALFAP=90°

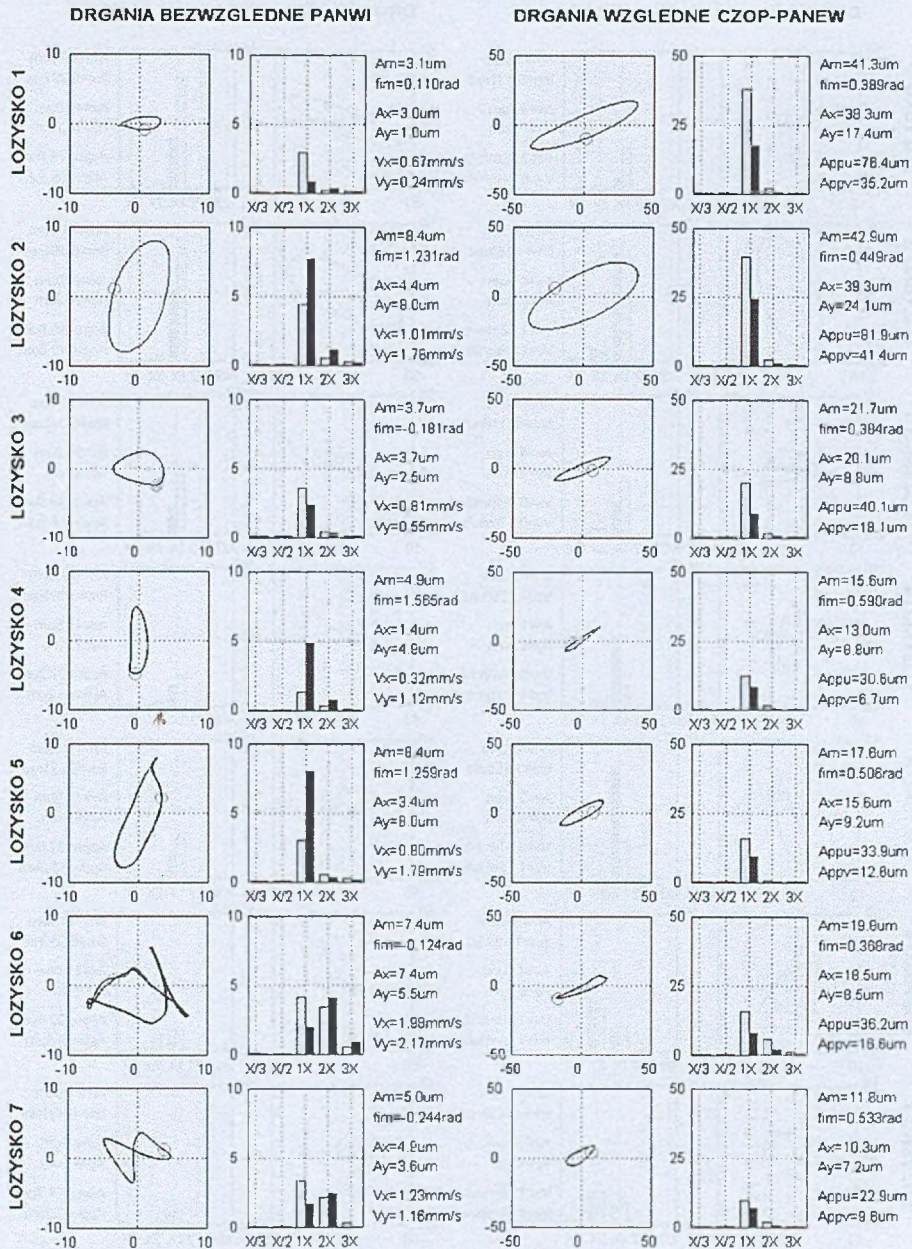


Rys. 5.11: Pęknięcie 1 – drgania względne czopów, ALFAP=180°



Rys. 5.12: Pęknięcie 1 – drgania względne czopów, ALFAP=270°

Kod karty: CR1B0650	Obiekt: 13K215	Data: 26.02.2004
Opis defektu: Pęknięcie wirnika		
Dane zmienne: Pęknięcie 1 (L6), ALFAP=90st, WPKN=0.65		



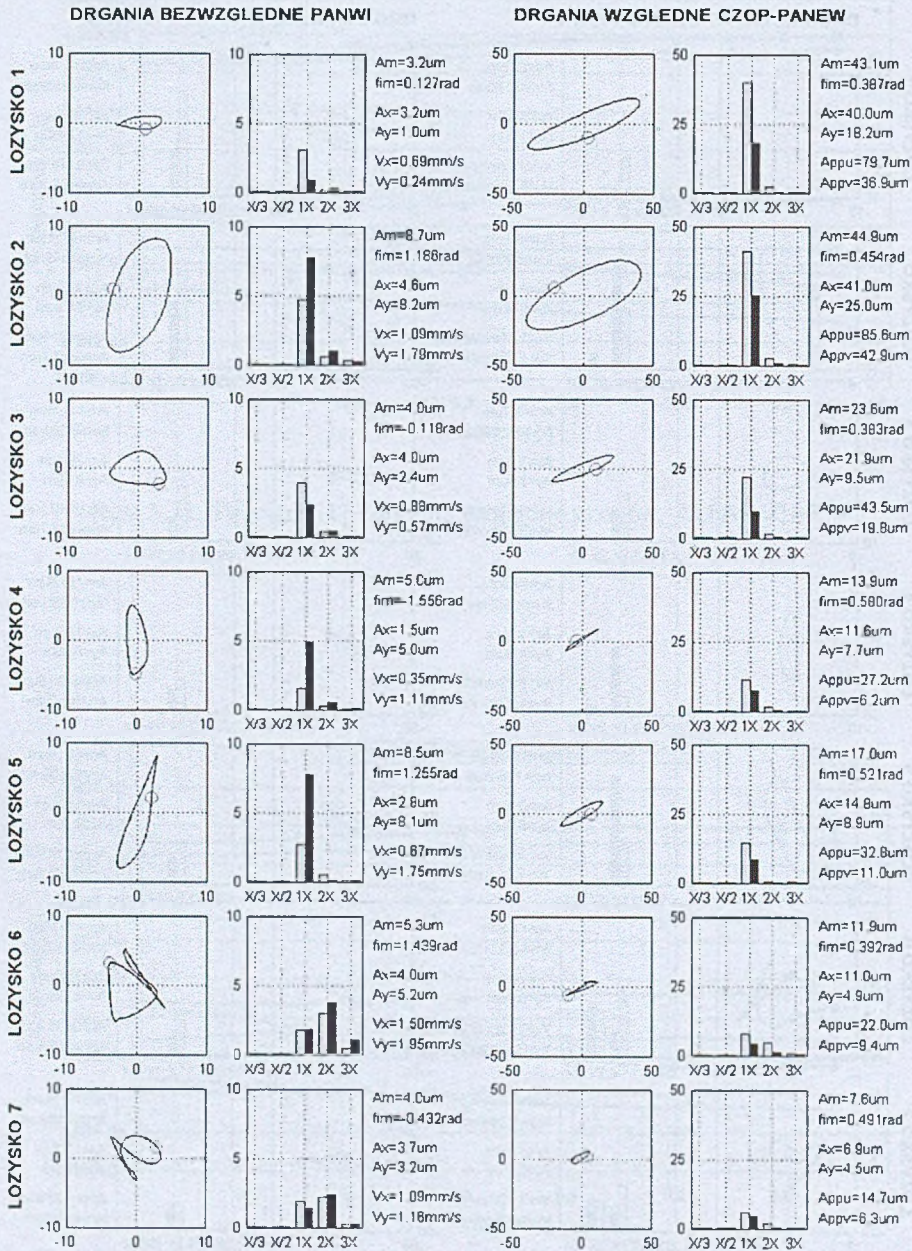
Oznaczenia: A=amplituda przemieszczeń, V=prędkość RMS, fi=kąt pochylenia maksymalnej przekalnej trajektorii, m=wartość maksymalna, pp="peak to peak", x,y=osię pozioma i pionowa, u,v=osię pod kątem pi/4 do x,y, wykresy wdmn: szary - kier. x, czarny - kier. y

Rys. 5.13: Pęknięcie 1, WPKN=0.65, ALFAP=0°. – karta diagnostyczna

Kod karty: CR1C0650 Obiekt: 13K215 Data: 26.02.2004

Opis defektu: Pekniecie wimka

Dane zmienne: Pekniecie 1 (L6), ALFAP=180st, WPKN=0.65

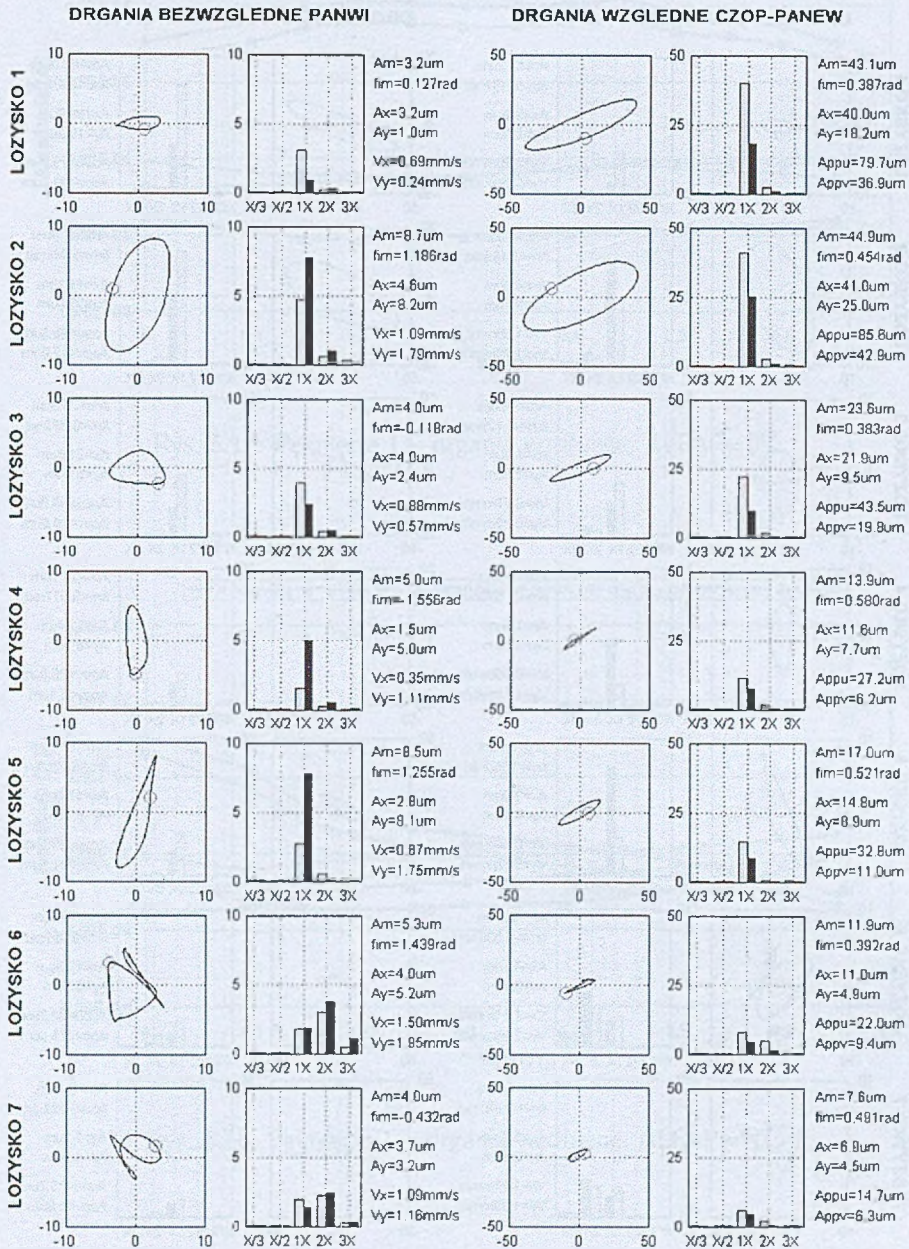


Rys. 5.14: Pęknięcie 1, WPKN=0.65, ALFAP=90° – karta diagnostyczna

Kod karły: CR1C0650 | Obiekt: 13K215 | Data: 26.02.2004

Opis defektu: Pęknięcie wirnika

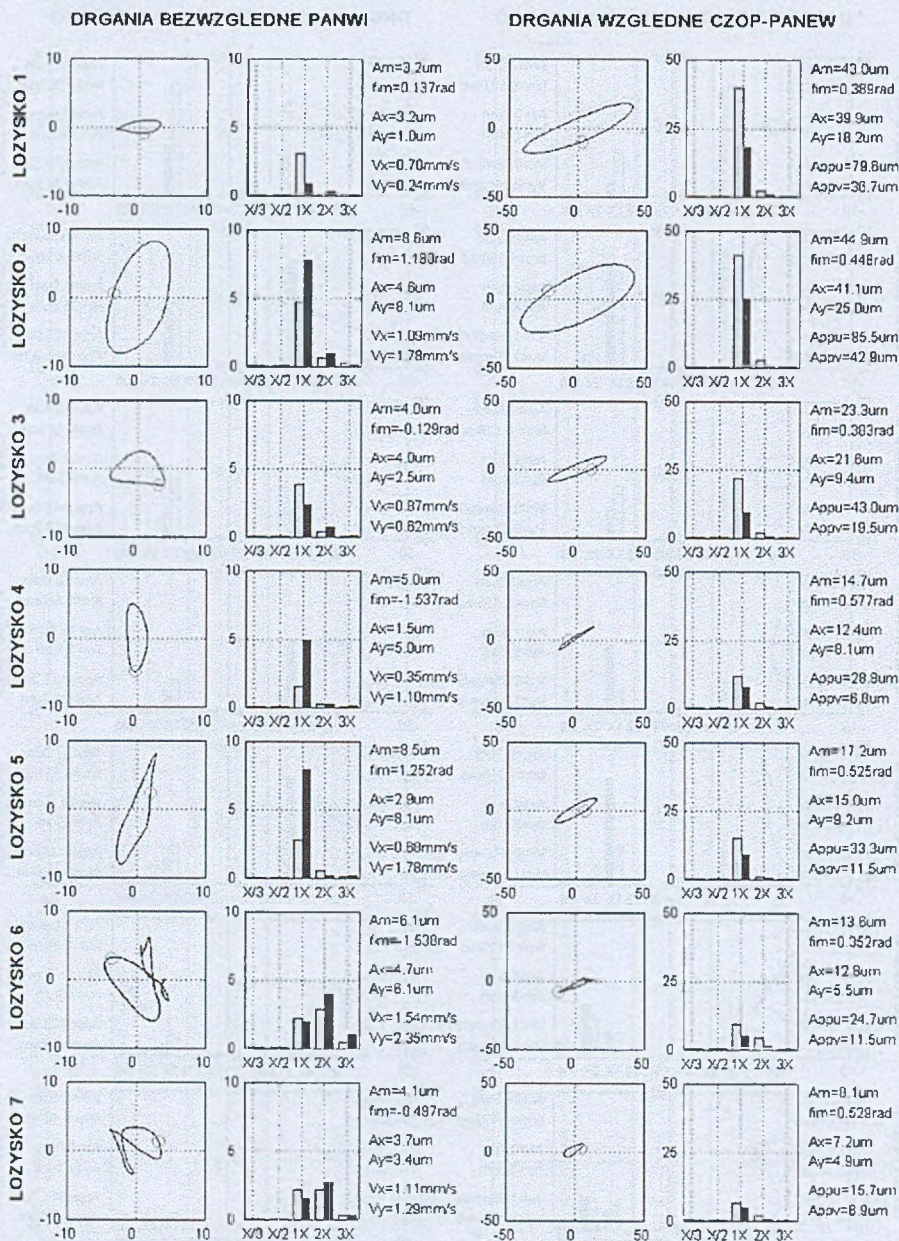
Dane zmienne: Pęknięcie 1 (L6), ALFAP=180st, WPKN=0.65



Oznaczenia: A=amplituda przemieszczeń, V=prędkość RMS, f=kat pochylenia maksymalnej przekątnej trajektorii, m=wartość maksymalna, pp=peak to peak, x,y=osię pozioma i pionowa, u,v=osię pod kątem pi/4 do x,y, wykresy wdm: szary - kier. x, czarny - kier. y.

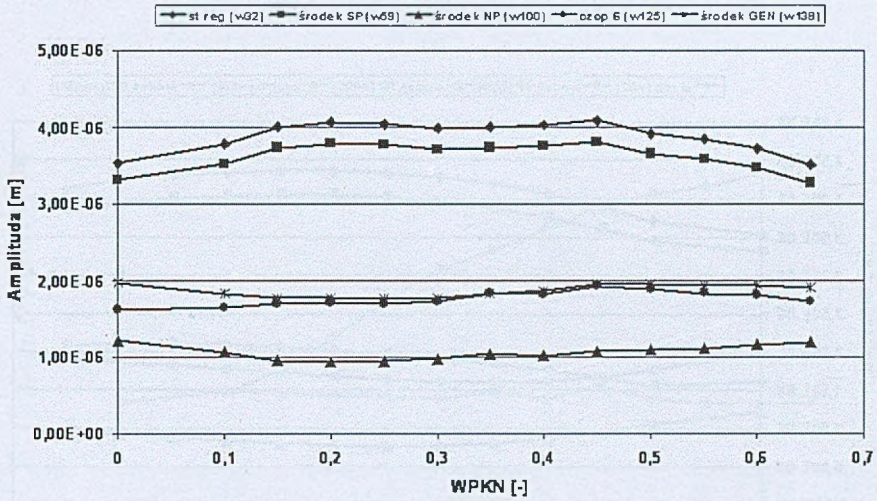
Rys. 5.15: Pęknięcie 1, WPKN=0.65, ALFAP=180° – karta diagnostyczna

Kod karty: CR1D0650	Objekt: 13K215	Data: 26.02.2004
Opis defektu: Pęknięcie wirnika		
Dane zmienne: Pęknięcie 1 (L6), ALFAP=270st, WPKN=0.65		

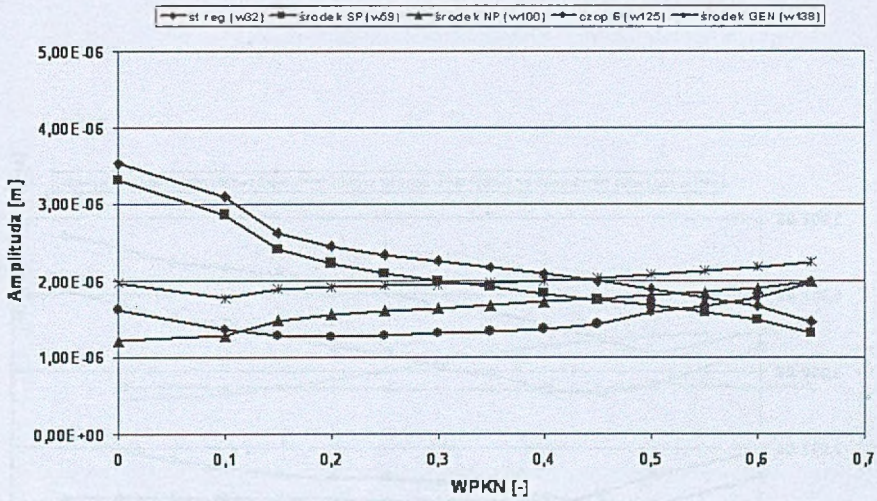


Oznaczenia: A = amplituda ocenieszczon, f = kat pochylenia maksymalnej przeklatnej trajektorii, m = wartosc maksymalna, pp = "peak to peak", x, y = osie pozioma i pionowa, u, v = osie pod katem 90° do x, y ; wykresy widmi szary - ker x , czarny - ker y .

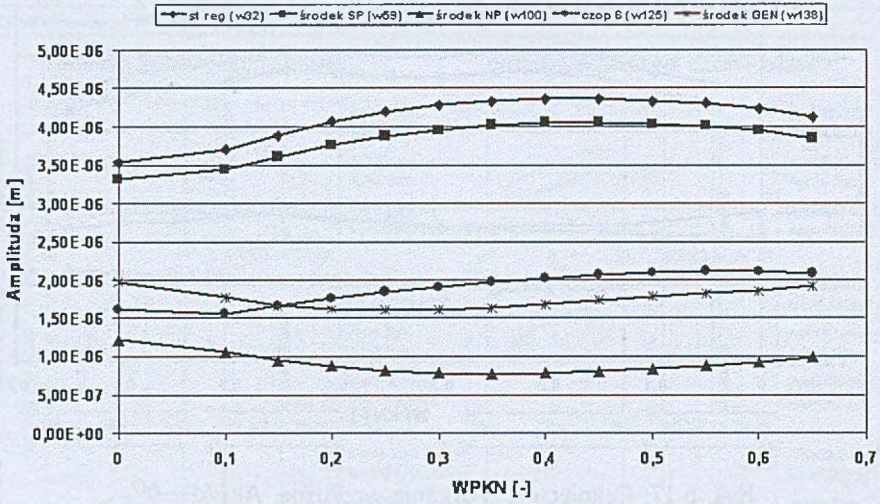
Rys. 5.16: Pęknięcie 1, WPKN=0.65, ALFAP=270° – karta diagnostyczna



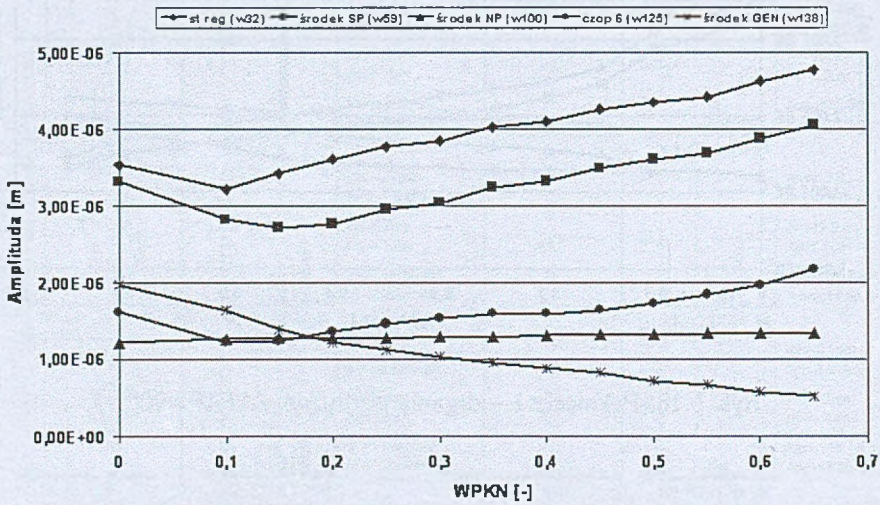
Rys. 5.17: Pęknięcie 1 – drgania wzdluzne, ALFAP=0°



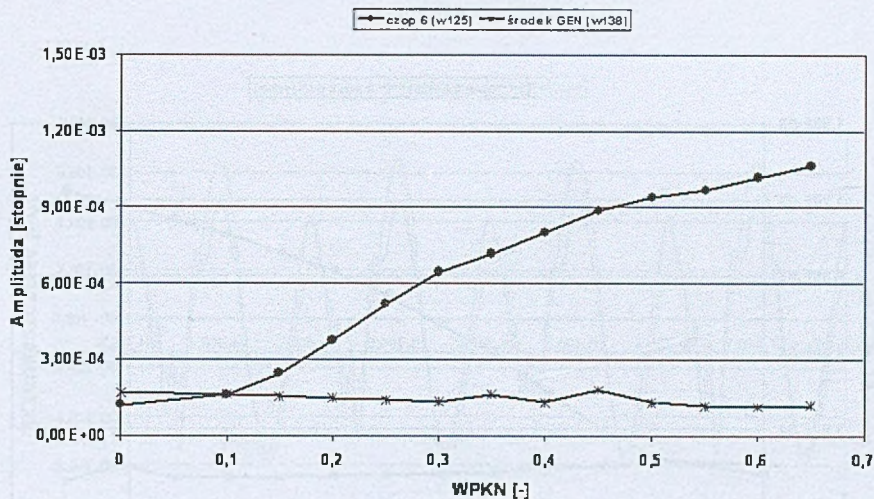
Rys. 5.18: Pęknięcie 1 – drgania wzdluzne, ALFAP=90°



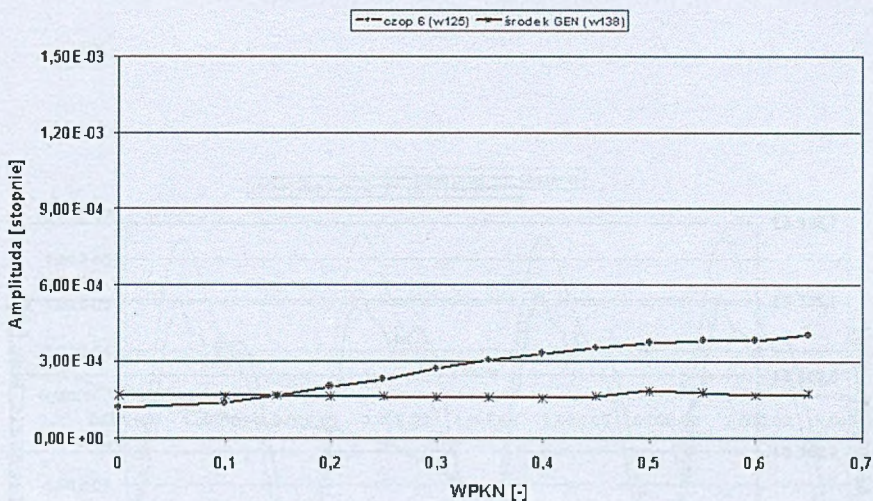
Rys. 5.19: Pęknięcie 1 – drgania wzdluzne, ALFAP=180°



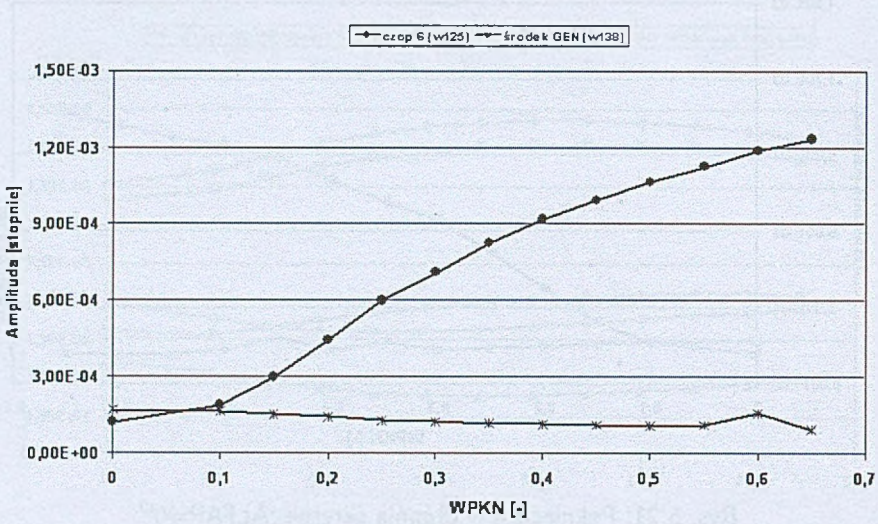
Rys. 5.20: Pęknięcie 1 – wzdluzne, ALFAP=270°



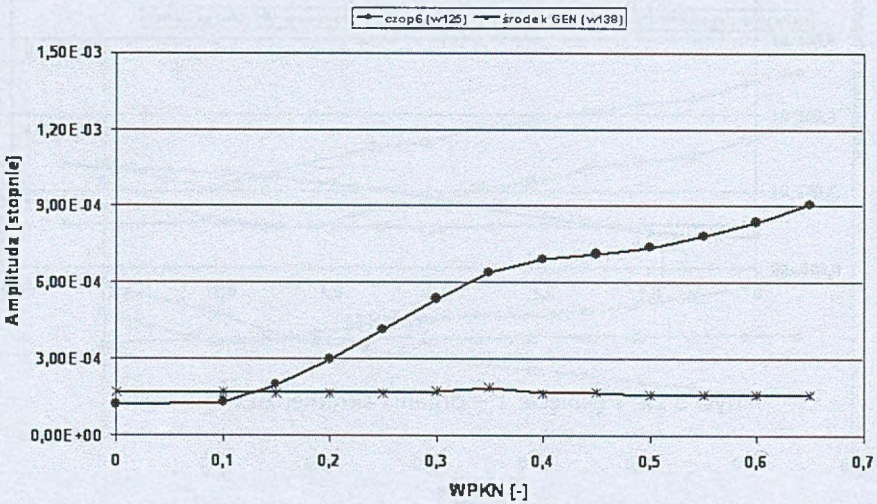
Rys. 5.21: Pęknięcie 1 – drgania skrętne, ALFAP=0°



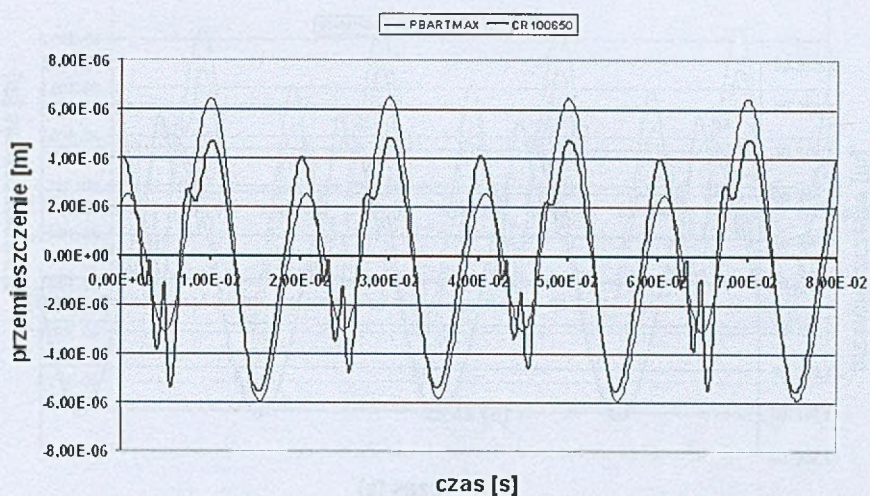
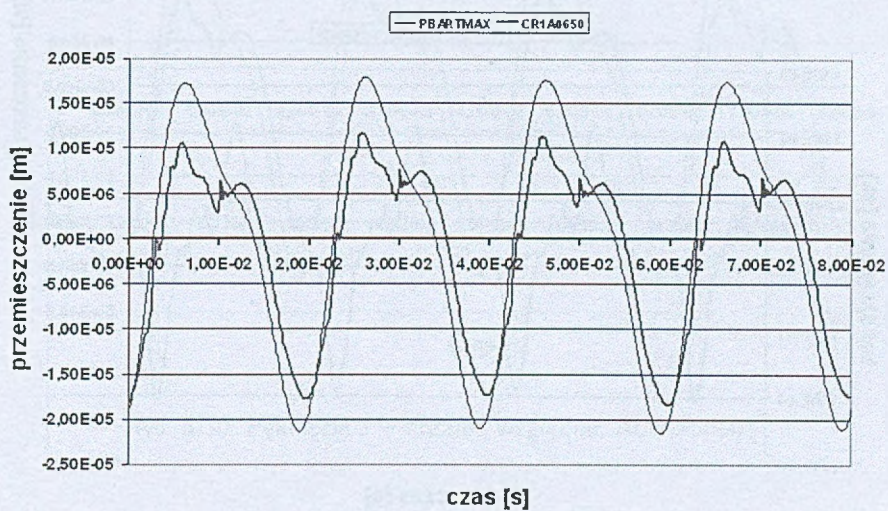
Rys. 5.22: Pęknięcie 1 – drgania skrętne, ALFAP=90°

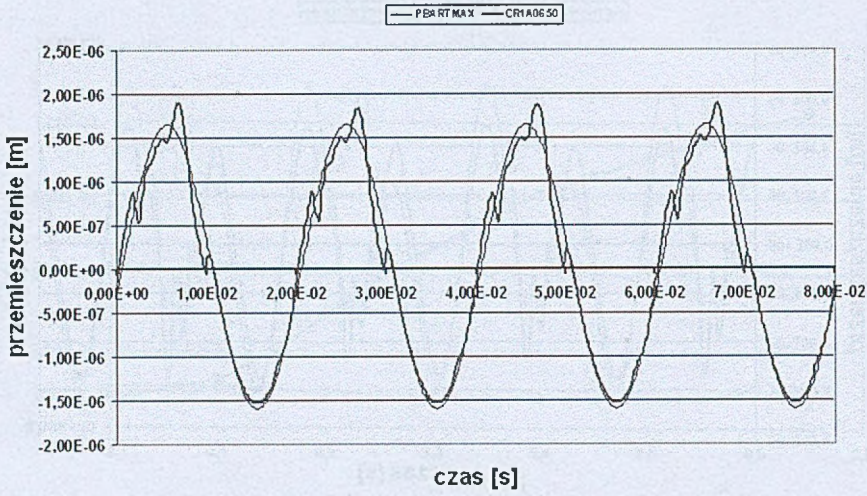
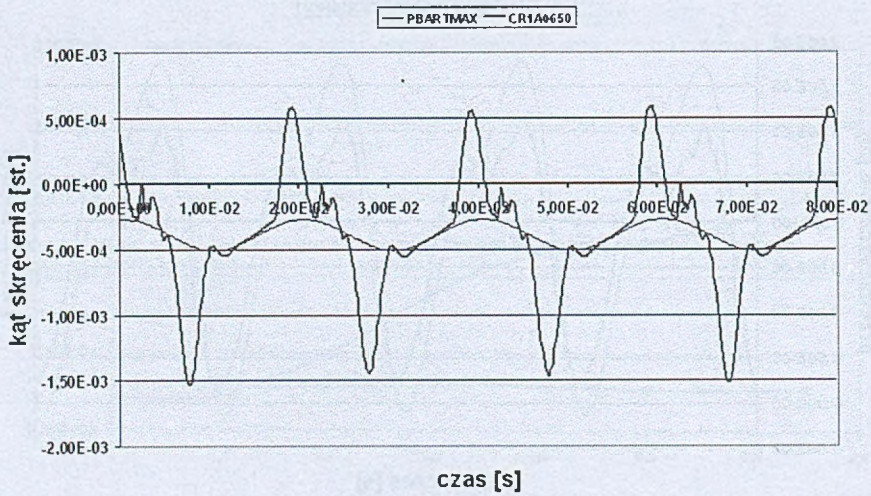


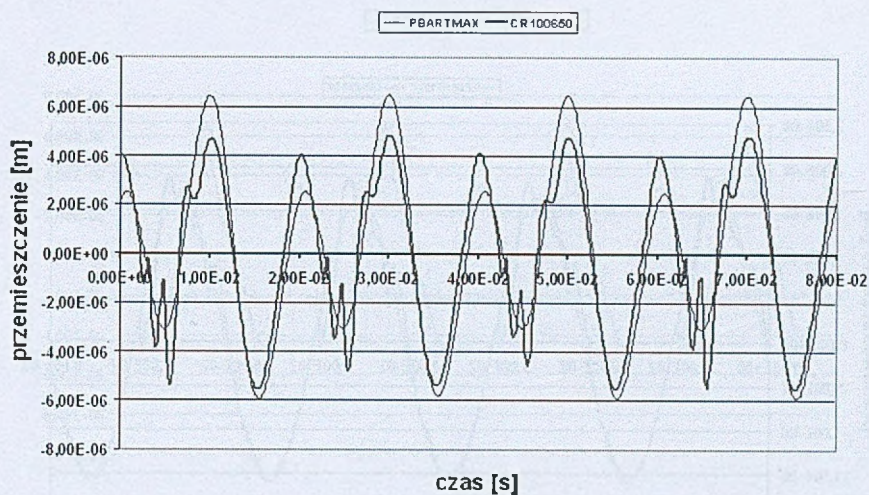
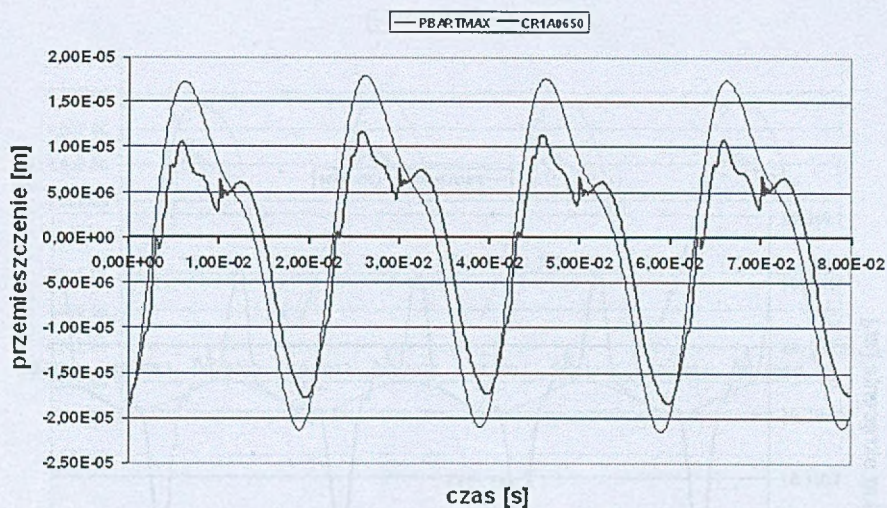
Rys. 5.23: Pęknięcie 1 – drgania skrętne, ALFAP=180°

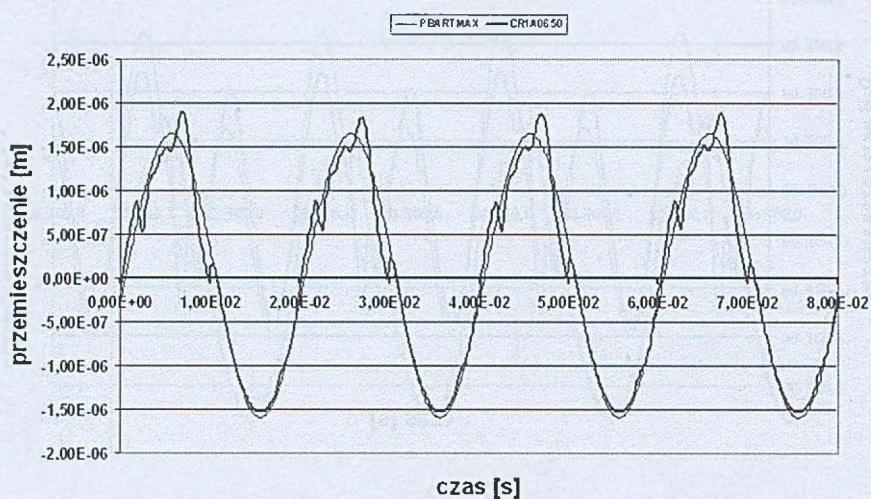


Rys. 5.24: Pęknięcie 1 – drgania skrętne, ALFAP=270°

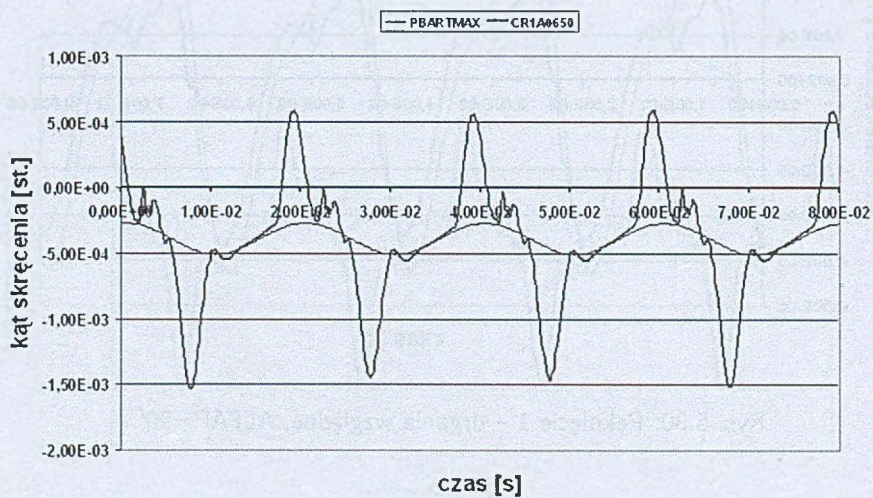
Rys. 5.25: Pęknięcie 1 – drgania bezwzględne, ALFAP=0^oRys. 5.26: Pęknięcie 1 – drgania względne, ALFAP=0^o

Rys. 5.27: Pęknięcie 1 – drgania wzdłużne, ALFAP=0^oRys. 5.28: Pęknięcie 1 – drgania skrętne, ALFAP=0^o

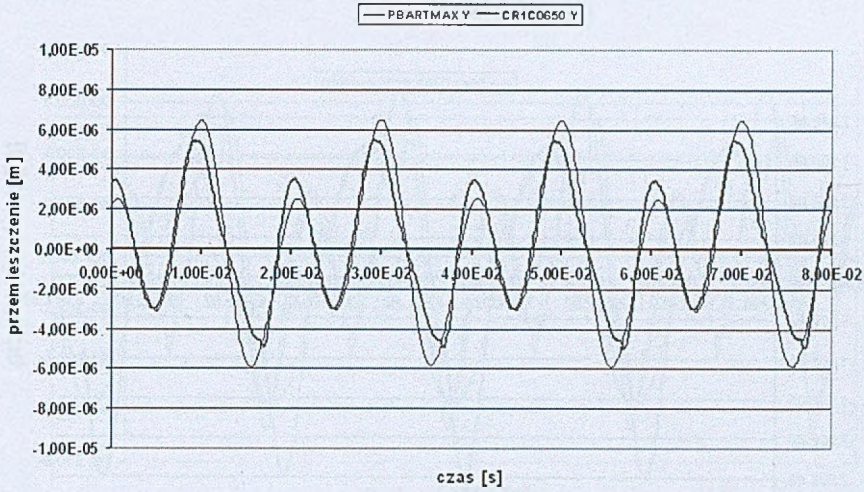
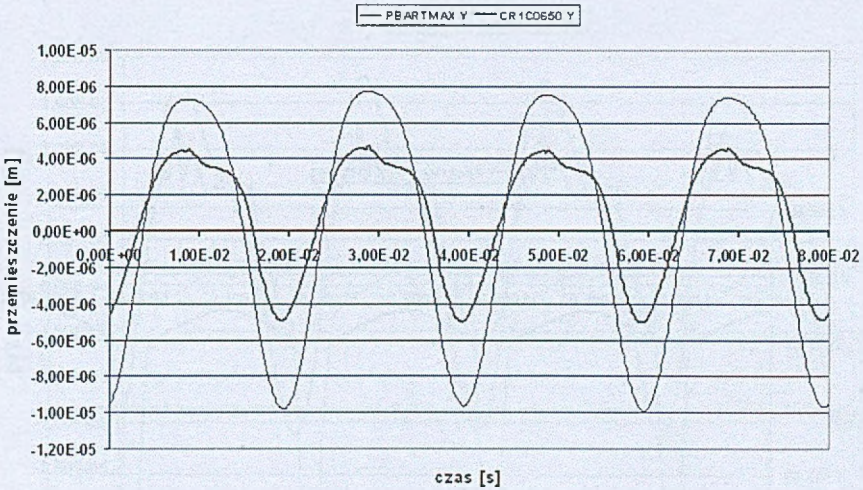
Rys. 5.29: Pęknięcie 1 – drgania bezwzględne, $ALFAP=90^\circ$ Rys. 5.30: Pęknięcie 1 – drgania względne, $ALFAP=90^\circ$

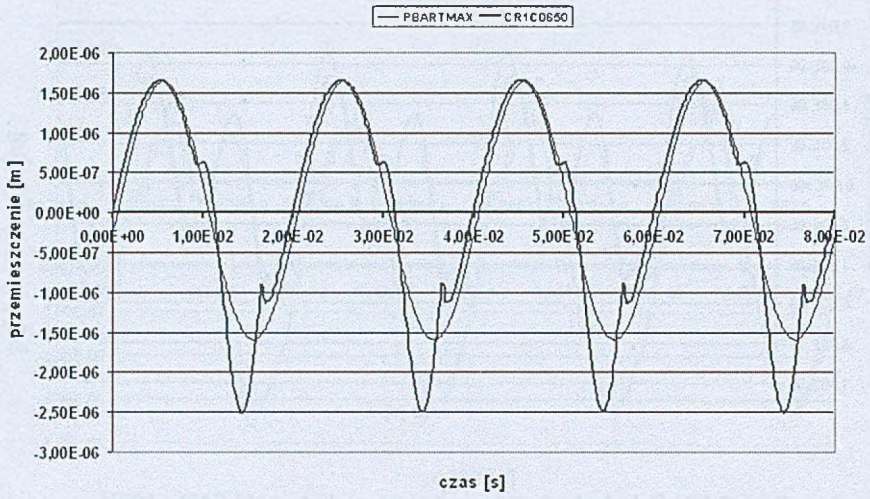


Rys. 5.31: Pęknięcie 1 – drgania wzdłużne, ALFAP=90°

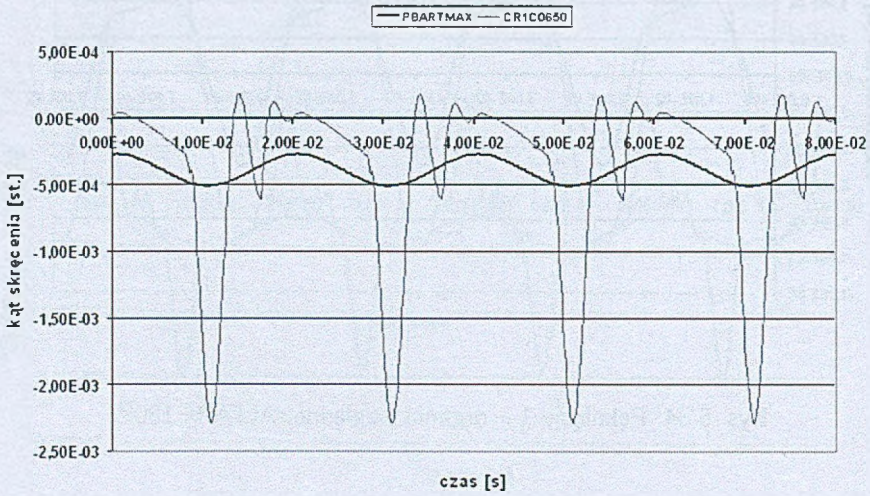


Rys. 5.32: Pęknięcie 1 – drgania skrętne, ALFAP=90°

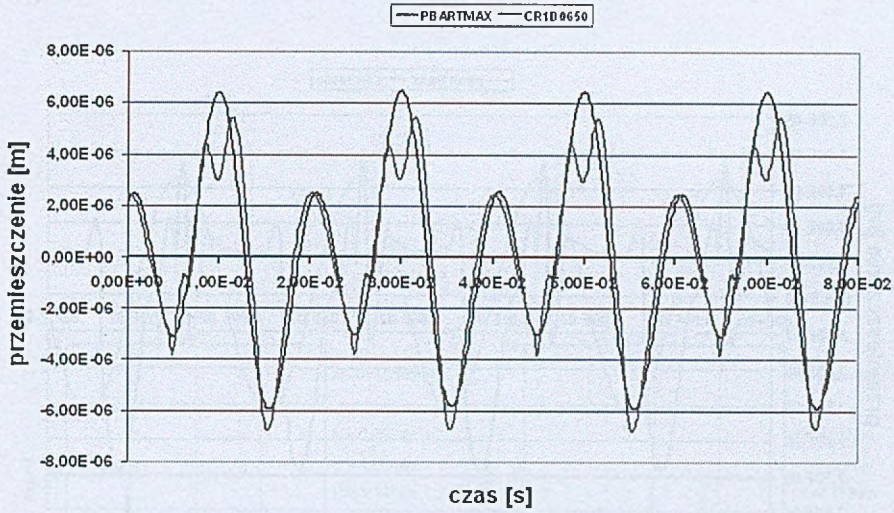
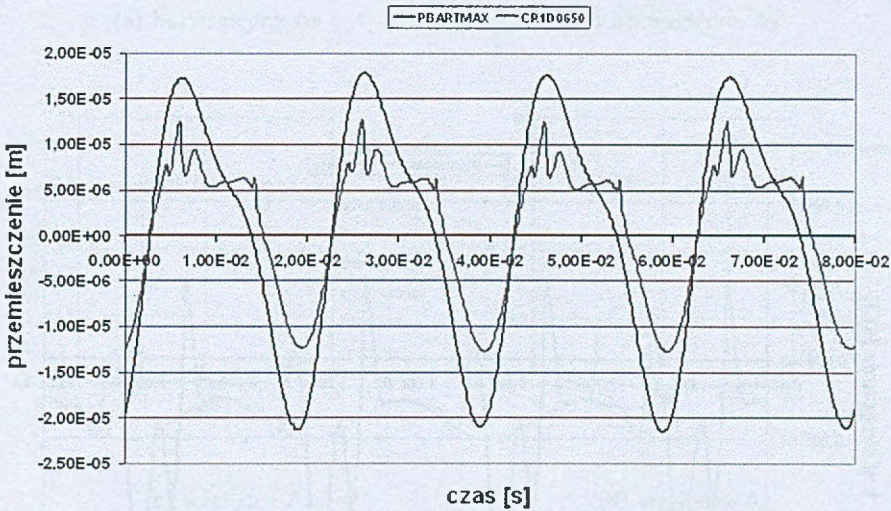
Rys. 5.33: Pęknięcie 1 – drgania bezwzględne, ALFAP= 180° Rys. 5.34: Pęknięcie 1 – drgania względne, ALFAP= 180°

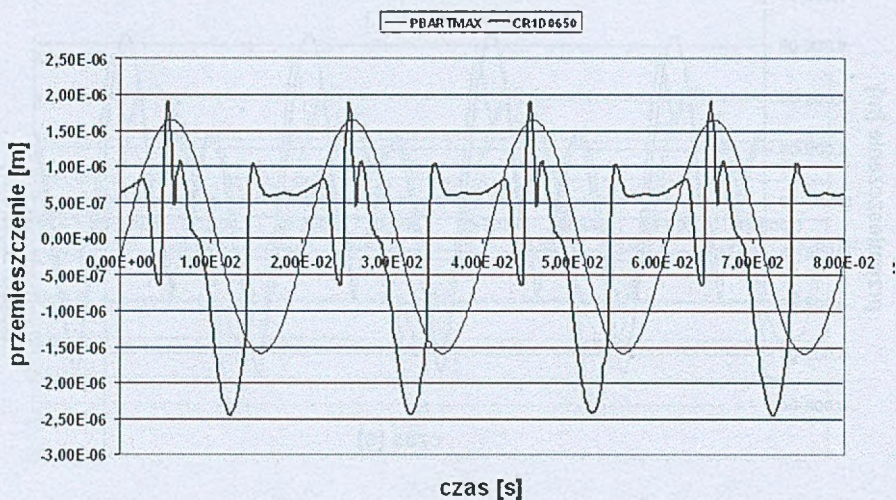


Rys. 5.35: Pęknięcie 1 – drgania wzdłużne, ALFAP=180°

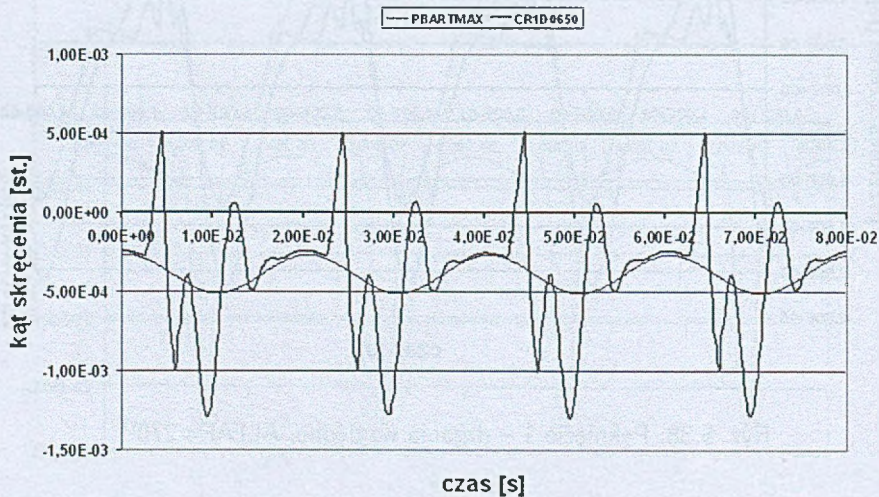


Rys. 5.36: Pęknięcie 1 – drgania skrętne, ALFAP=180°

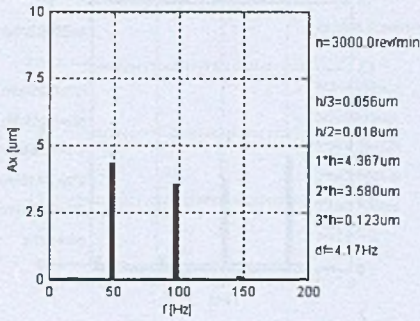
Rys. 5.37: Pęknięcie 1 – drgania bezwzględne, $ALFAP=270^\circ$ Rys. 5.38: Pęknięcie 1 – drgania względne, $ALFAP=270^\circ$



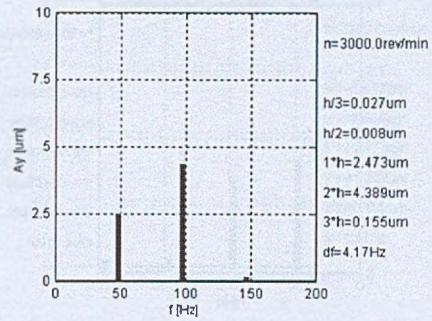
Rys. 5.39: Pęknięcie 1 – drgania wzdłużne, ALFAP=270°



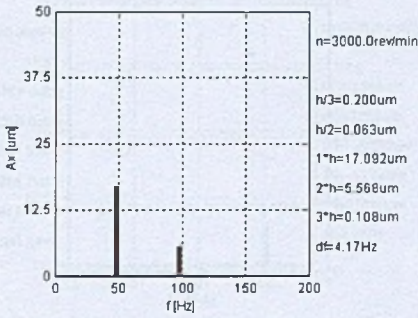
Rys. 5.40: Pęknięcie 1 – drgania skrętne, ALFAP=270°



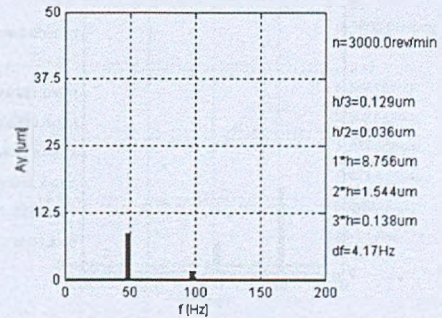
(a) bezwzględne Ax



(b) bezwzględne Ay

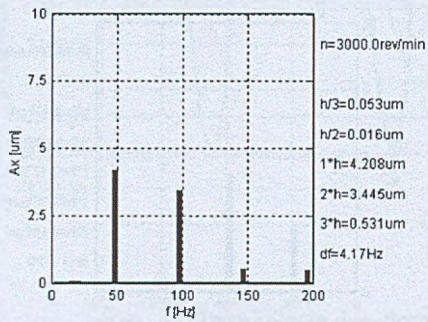


(c) względne Ax

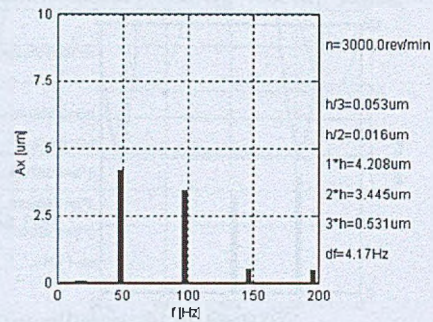


(d) względne Ay

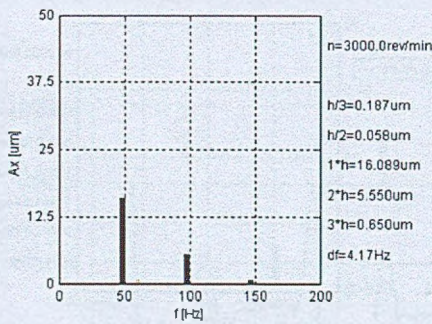
Rys. 5.41: Widma amplitudowe drgań poprzecznych – przypadek bazy (Łożyisko nr 6)



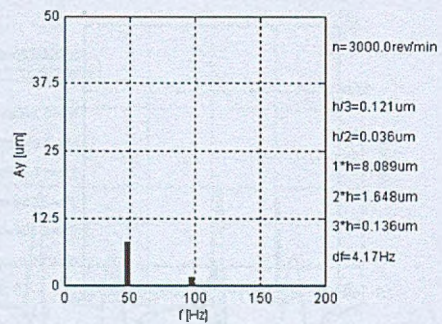
(a) bezwzględne Ax



(b) bezwzględne Ay

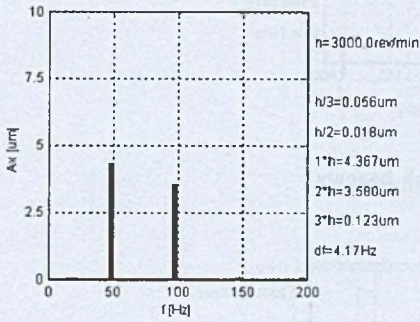
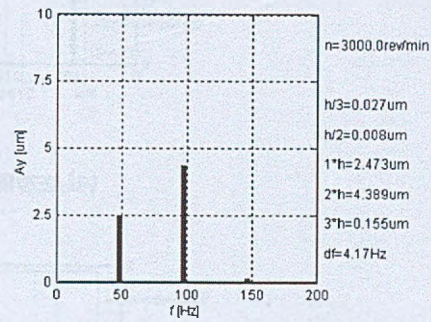
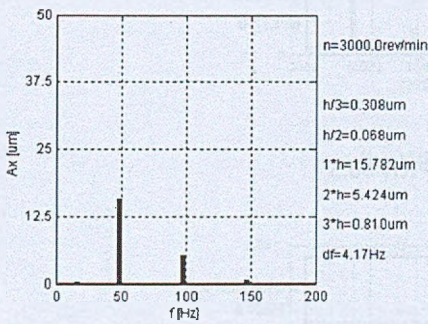
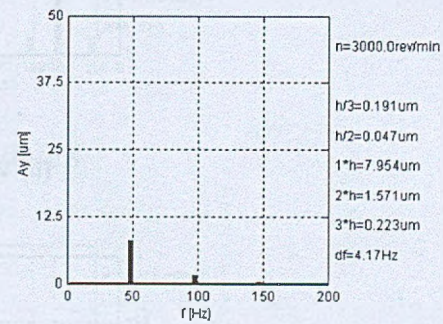


(c) względne Ax

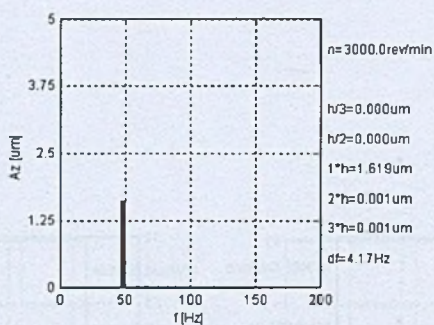


(d) względne Ay

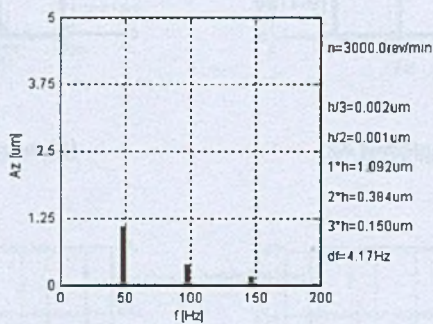
Rys. 5.42: Widma amplitudowe drgań poprzecznych – pęknięcie 1, ALFAP=90°, WPKN=0.5

(a) bezwzględne A_x (b) bezwzględne A_y (c) względne A_x (d) względne A_y

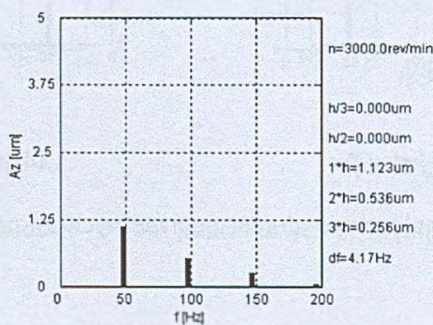
Rys. 5.43: Widma amplitudowe drgań poprzecznych – pęknięcie 1, ALFAP=90°, WPKN=0.65



(a) przypadek bazowy

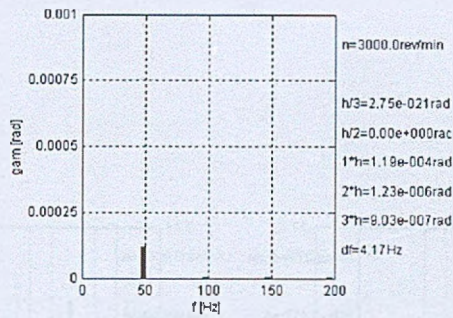


(b) WPKN=0.5

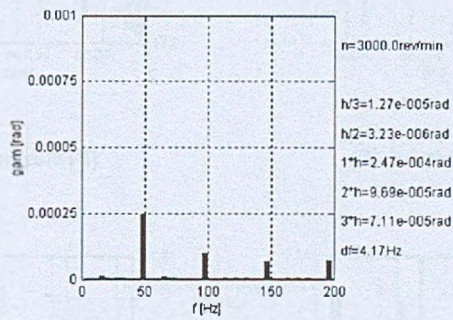


(c) WPKN=0.65

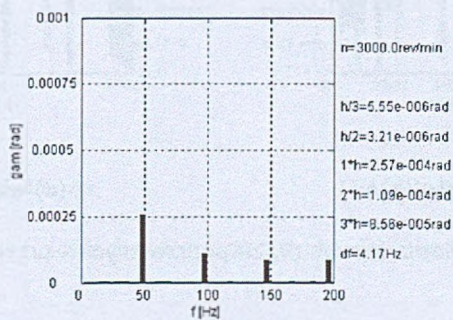
Rys. 5.44: Widma amplitudowe drgań wzdłużnych



(a) przypadek bazowy

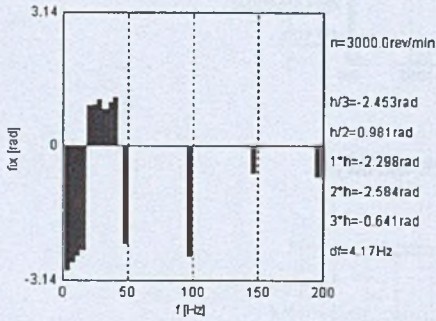
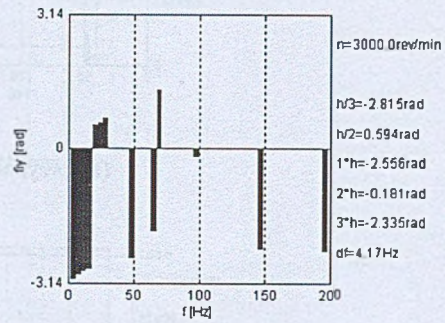
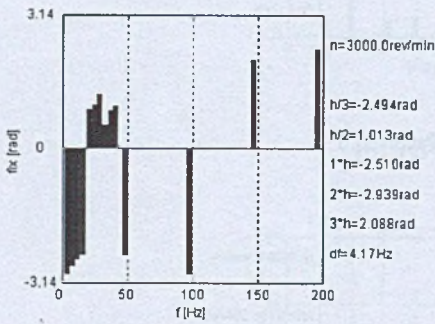
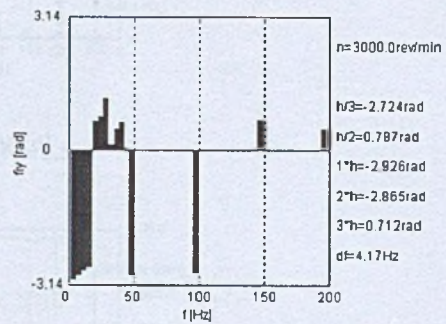


(b) WPKN=0.5

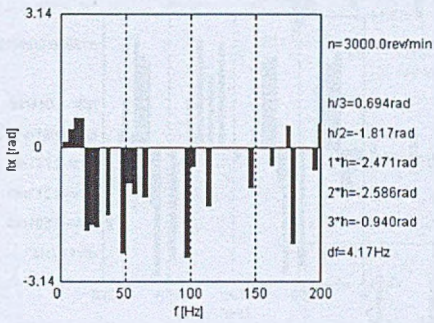


(c) WPKN=0.65

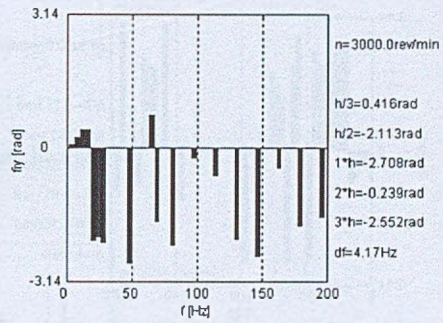
Rys. 5.45: Widma amplitudowe drgań skrętnych

(a) bezwzględne A_x (b) bezwzględne A_y (c) względne A_x (d) względne A_y

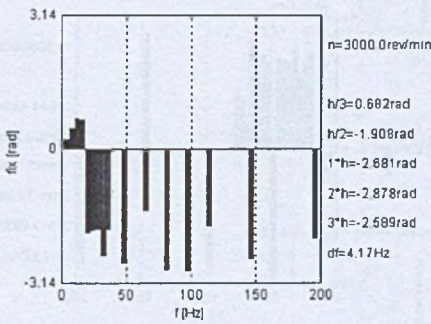
Rys. 5.46: Widma fazowe drgań poprzecznych - przypadek bazowy



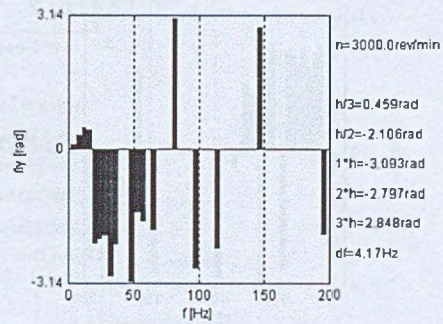
(a) bezwzględne Ax



(b) bezwzględne Ay

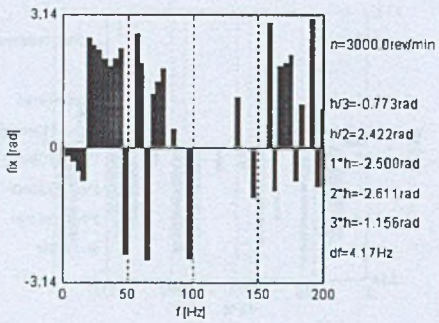
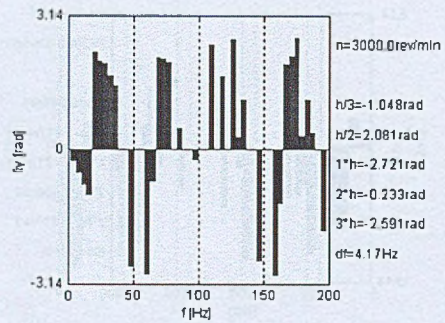
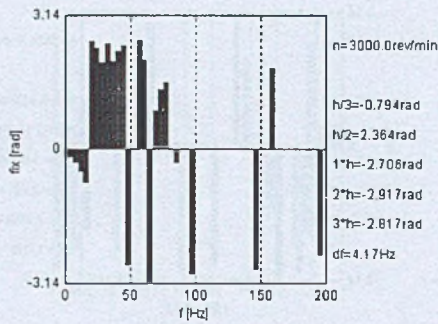
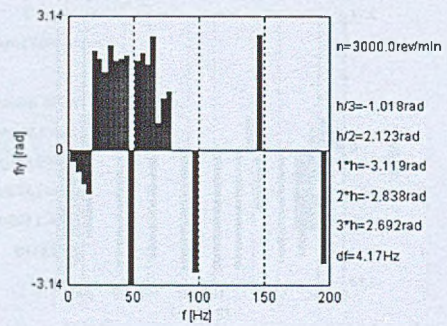


(c) względne Ax



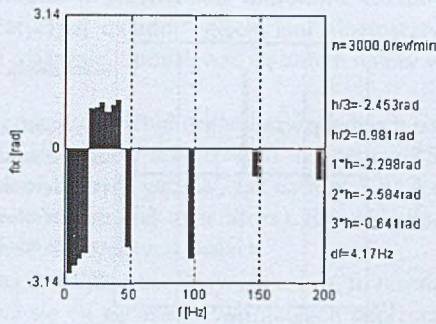
(d) względne Ay

Rys. 5.47: Widma fazowe drgań poprzecznych - Pęknięcie 1, WPKN=0.5

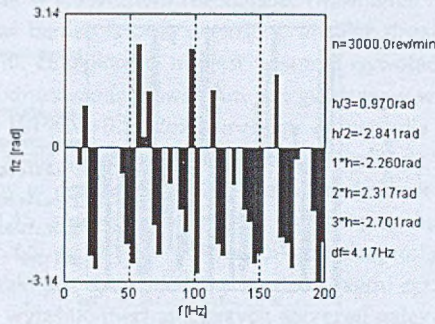
(a) bezwzględne A_x (b) bezwzględne A_y (c) względne A_x (d) względne A_y

Rys. 5.48: Widma fazowe drgań poprzecznych - Pęknięcie 1, WPKN=0.65

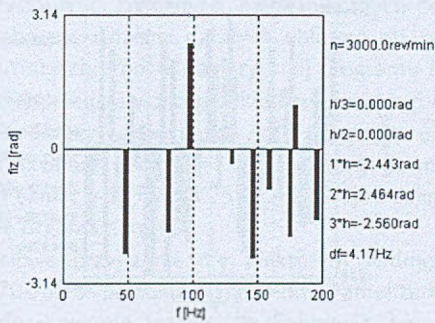
5.3 Pęknięcie 2



(a) przypadek bazowy

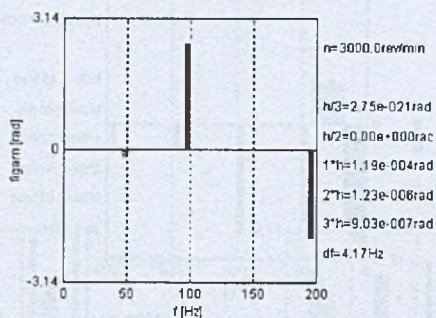


(b) WPKN=0.5

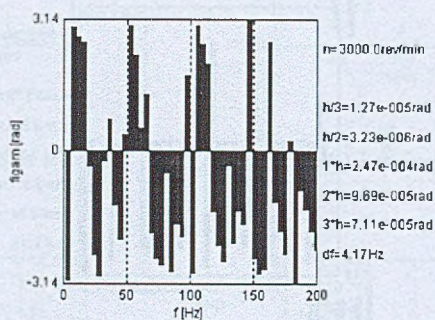


(c) WPKN=0.65

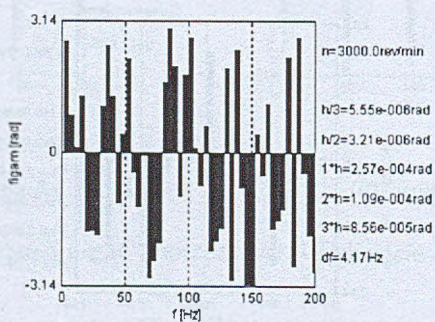
Rys. 5.49: Widma amplitudowe drgań wzdłużnych



(a) przypadek bazowy



(b) WPKN=0.5



(c) WPKN=0.65

Rys. 5.50: Widma amplitudowe drgań skrętnych

5.3. Pęknięcie 2

Pęknięcie 2 jest umiejscowione w przybliżeniu w połowie rozstawu łożysk generatora. Jak wynika z analizy kinetostatycznej układu, ugięcie linii kinetostatycznej wirnika jest w tym miejscu największe w całej maszynie. Spodziewać się zatem należy wyraźnych efektów „pracy” szczeliny.

Rys. 5.51 przedstawia zmiany amplitud drgań bezwzględnych panwi, zaś Rys. 5.52 – zmiany amplitud drgań względnych czopów łożyskowych. Na rysunku 5.53 przedstawiono zmiany amplitud drgań wzdłużnych wybranych węzłów, zaś na Rys. 5.54 – drgań skrętnych węzła 125 (czop łożyska nr 6) i węzła nr 138 (środek generatora). Rysunki odpowiadające poszczególnym rodzajom drgań utworzono w identycznych skalach.

Warto zwrócić uwagę na dwa zjawiska. Pierwsze z nich, to rezonans drgań w funkcji współczynnika pęknięcia. Ujawnia się on zwłaszcza w drganiach poprzecznych dla wartości WPKN około $0.2 \div 0.25$. Rys. 5.55 przedstawia kartę diagnostyczną dla WPKN=0.2 i ALFAP=180°, a więc właśnie w zakresie rezonansowym. Zauważyć można wzrost składowych subharmonicznych 1/3X i 1/2X, jak również składowej 3X. Wzrosty te są szczególnie widoczne w łożysku nr 6. Warto dodać, iż dla większych wartości WPKN drgania *uspokajają się* (patrz Rys. 5.56). Układ zachowuje się więc jak w klasycznym rezonansie. Ujawnienie tego rezonansu w obliczeniach symulacyjnych stanowi bardzo istotną nowość w analizie drgań wirników z pęknięciem. Dotychczas uważano bowiem, że pęknięcie nie jest w stanie wywołać drgań rezonansowych.

Drugim wymagającym odnotowania zjawiskiem jest gwałtowny wzrost drgań układu wirnikowego dla ALFAP=180° i WPKN>0.5. Rozmiary tego wzrostu dla poszczególnych pokazuje Rys. 5.57–5.60, na którym skale dobrano do największej amplitudy drgań. Warto jednak zauważyć, iż pewne symptomy w postaci niestabilności hydrodynamicznej łożysk pojawiają się już nieco poniżej WPKN=0.45, a powyżej WPKN=0.5 układ przechodzi w silną niestabilność. Pokazują to rysunki 5.61÷5.65, na których pokazano karty diagnostyczne tych przypadków.

Należy sądzić, że stan taki jest spowodowany bardzo silnymi sprzężeniami drgań wywołanymi pęknięciem. Próbuąc wyjaśnić mechanizm tych sprzężeń należy zauważyć, iż dla innych kątów ALFAP tak silny wzrost drgań nie nastąpił. Oznaczać to może, iż istotne znaczenie dla powstawania sprzężeń drgań ma wzajemne fazowe położenie pęknięcia oraz układu sił działających na wirnik, a zwłaszcza sił cyklicznych. W zależności od tego efekty dynamiczne wywołane wymuszeniami zewnętrznymi i pęknięciami mogą się wzajemnie osłabiać, lub – jak w tym przypadku – wzmacniać, aż do wystąpienia znacznych, niebezpiecznych drgań w maszynie. W tym miejscu warto dodać, iż próba prowadzenia dalszych obliczeń dla wyższych współczynników pęknięcia doprowadziła do utraty zbieżności numerycznej programu NLDW dla WPKN=0.7.

Na rysunkach (5.66÷5.69) przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe drgań w łożysku nr 6 we wszystkich kierunkach dla przypadku bazowego i przypadku dla którego zarejestrowano najwyższy poziom drgań (CR2C0600, WPKN=0.6). Przebiegi te mogą być porównywane z przebiegami czasowymi dla Pęknięcia 1 (Rys. 5.25÷5.40). Najbardziej wrażliwe na defekt typu pęknięcie wirnika okazały się drgania skrętne.

Wydaje się również celowe przyjrzenie się niektórym widmom amplitudowym i fazowym drgań. Rysunki 5.70÷5.75 przedstawiają widma amplitudowe drgań, zaś rysunki 5.76(a)÷5.76(d) – przykładowe widma fazowe dla Pęknięcia 2 umieszczonego pod kątem ALFAP=180°, a więc przypadku najbardziej niebezpiecznego z wziętych pod uwagę. Uzyskano również widma dla następujących wielkości współczynnika pęknięcia:

WPKN=0.2 – sygnalizowany rezonans drgań w funkcji głębokości pęknięcia,

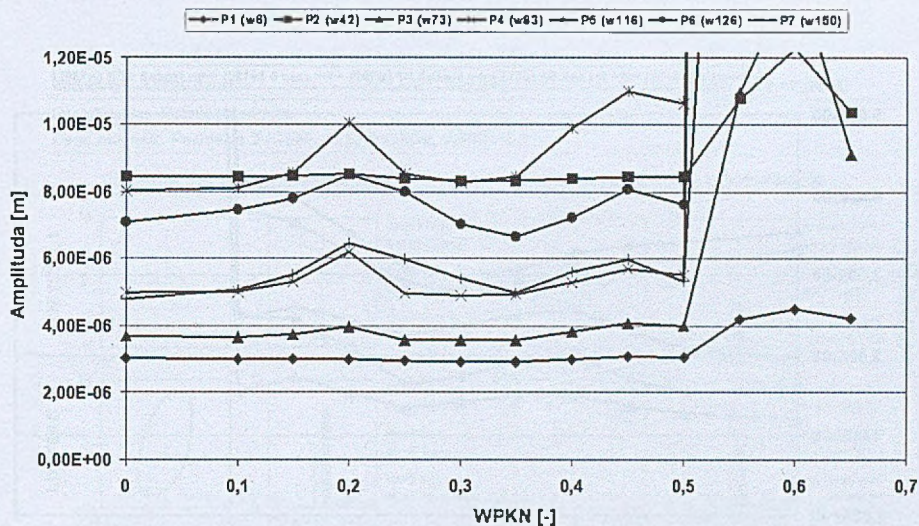
WPKN=0.35 – jeden z przypadków po „przejściu” rezonansu,

WPKN=0.5 – tuż przed gwałtownym wzrostem drgań,

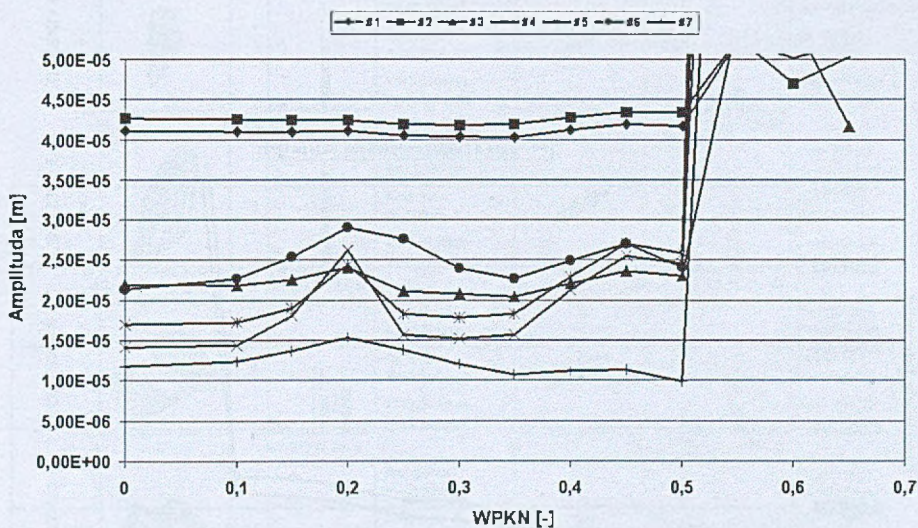
WPKN=0.65 – największe policzone pęknięcie.

Na ich podstawie można zauważyć pewne zjawiska. W drganiach z zakresu rezonansu ($WPKN=0.2$) w funkcji wielkości pęknięcia pojawia się pewna niestabilność hydrodynamiczna, na którą wskazuje wyraźny prążek $1/3X$. Niestabilność ta zanika po przejściu rezonansu ($WPKN>0.25$). Wyraźnie widoczne są wtedy wyższe harmoniczne, choć nie są one dominujące. Dla $WPKN=0.5$ z kolei obserwujemy wzrost niestabilności hydrodynamicznej. Pojawiają się prążki subharmoniczne, jak też ich wielokrotności (np. $4/3X$ w drganiach wzdłużnych, patrz Rys. 5.74). Ponieważ dla większych głębokości pęknięcia następuje skokowy wręcz wzrost drgań w układzie, sugerować by to mogło, iż wirnik wchodzi w stan niestabilnej pracy spowodowanej właśnie pęknięciem. Dla $WPKN=0.65$ niestabilność ta jest już w pełni rozwinięta, a dominują prążki subharmoniczne $1/3X$ (z wyjątkiem drgań wzdłużnych, gdzie dominującym jest prążek $3X$).

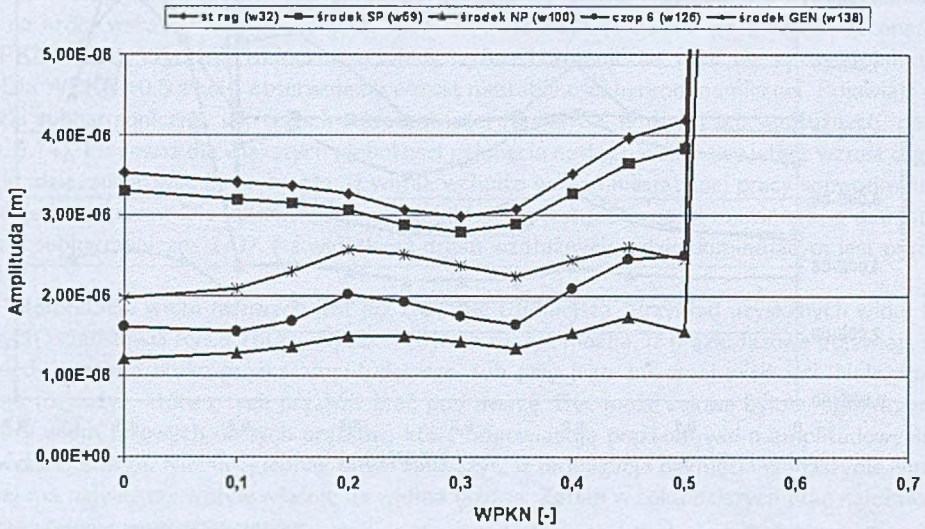
Interpretacja widm fazowych jest już znacznie trudniejsza. Przykład uzyskanych widm fazowych przedstawia Rys.5.76(a)÷Rys.5.76(d). Zauważyć można, iż prążki fazowe pojawiają się niekiedy pomimo braku prążka amplitudowego, lub przy jego znikomej wielkości. Należałoby zatem rozważyć, które z tych prążków brać pod uwagę. Być może celowe byłoby ograniczenie analizy widm fazowych do tych prążków, które odpowiadają prążkom amplitudowych o najwyższej energii. Niemniej jednak łatwo zauważyć, iż propagacja pęknięcia w maszynie wirnikowej ma największy wpływ właśnie na widma fazowe. Zatem w toku dalszych prac należałoby to zagadnienie usystematyzować.



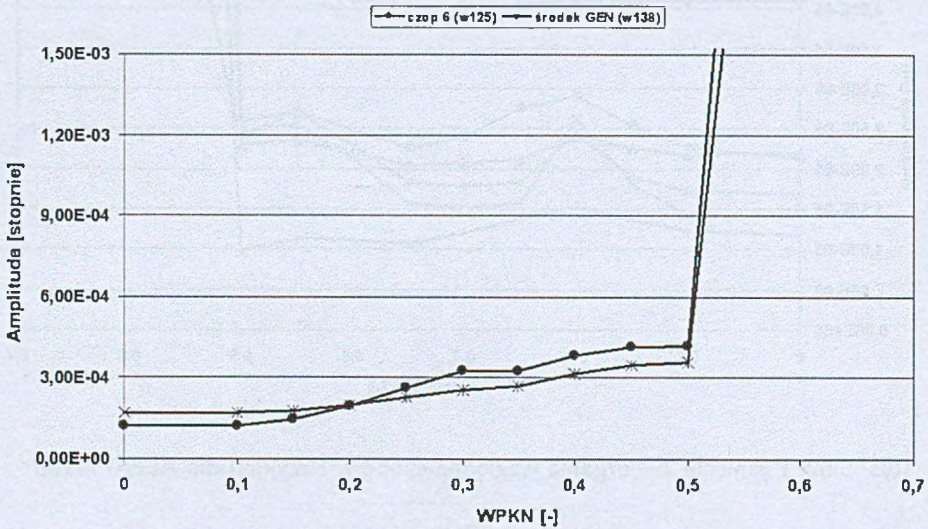
Rys. 5.51: Pęknięcie 2 – drgania bezwzględne. Przykład dla ALFAP=180°



Rys. 5.52: Pęknięcie 2 – drgania względne czopów. Przykład dla ALFAP=180°

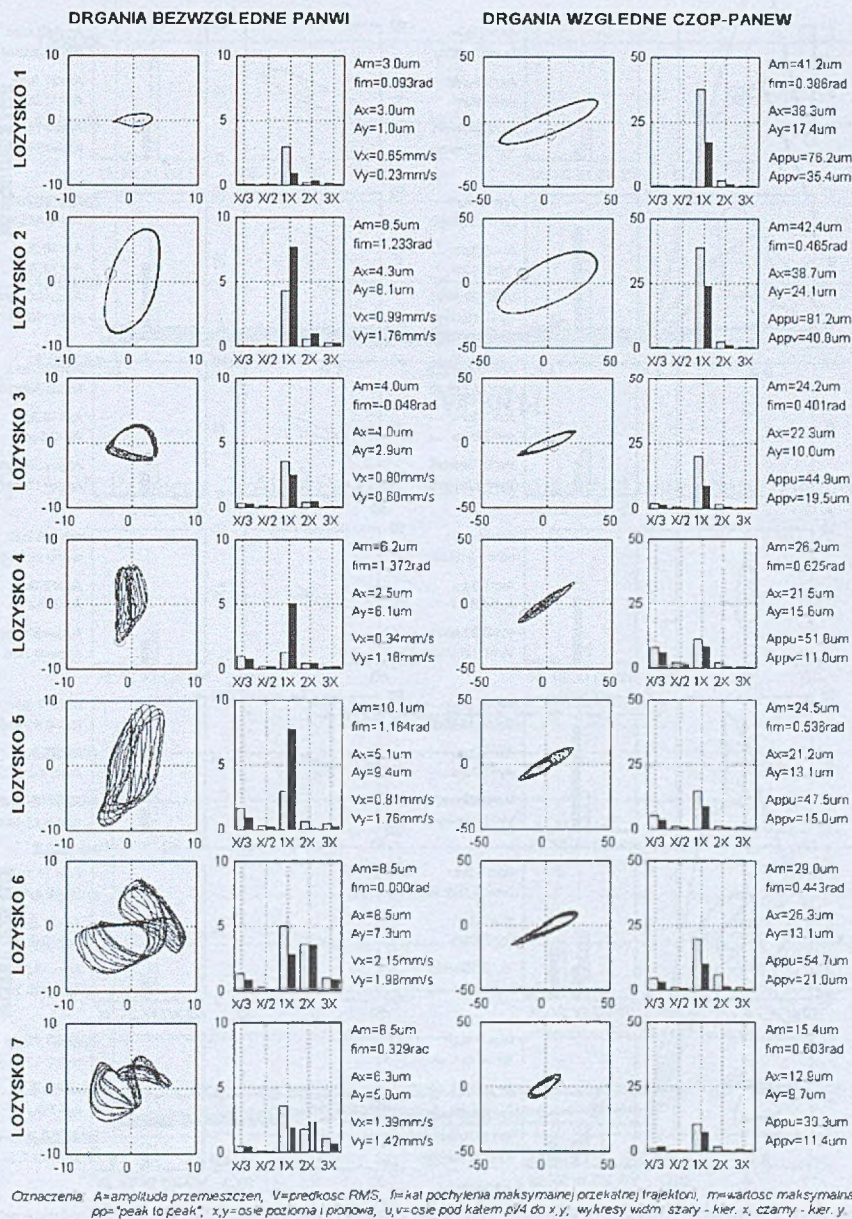


Rys. 5.53: Pęknięcie 2 – drgania wzdłużne. Przykład dla ALFAP=180°



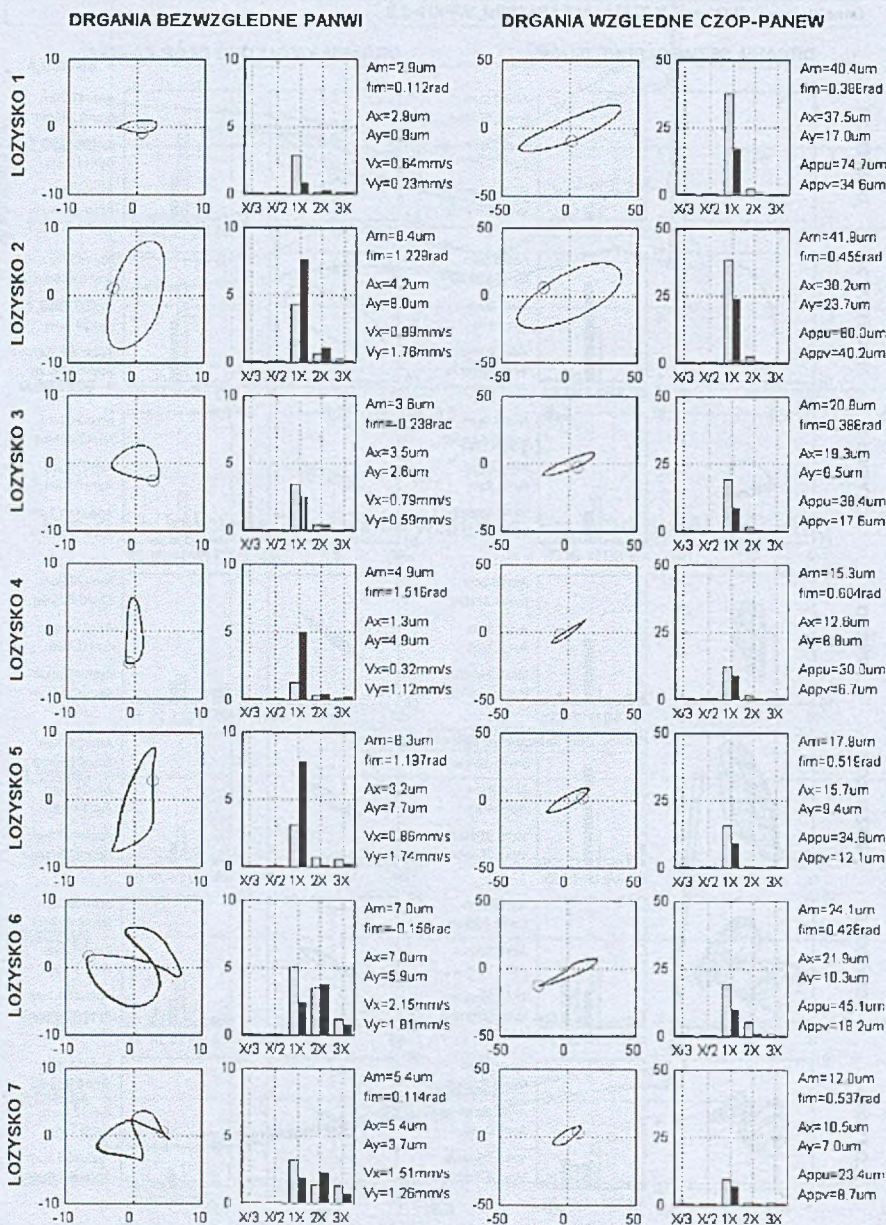
Rys. 5.54: Pęknięcie 2 – drgania skrętne. Przykład dla ALFAP=180°

Kod karty: CR2C0200	Chinik: 13K215	Data: 12.02.2004
Opis defektu: Pekniecie wirnika		
Dane zmienne: Pekniecie 2 (GEN), ALFAP=180st, WPKN=0.2		



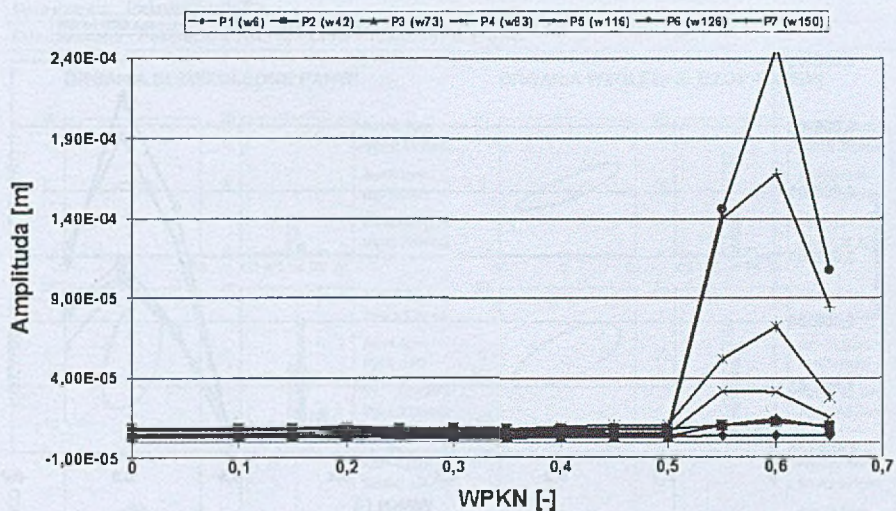
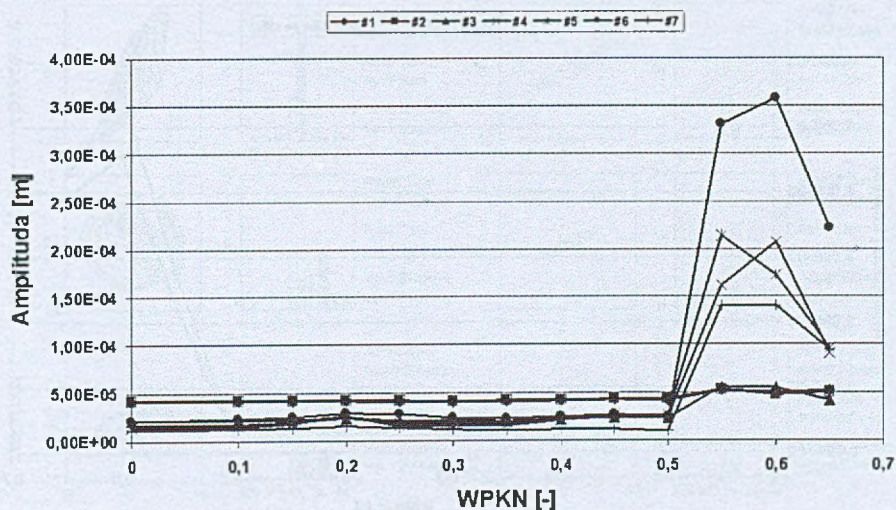
Rys. 5.55: Pęknięcie 2, WPKN=0.2, ALFAP=180° – karta diagnostyczna

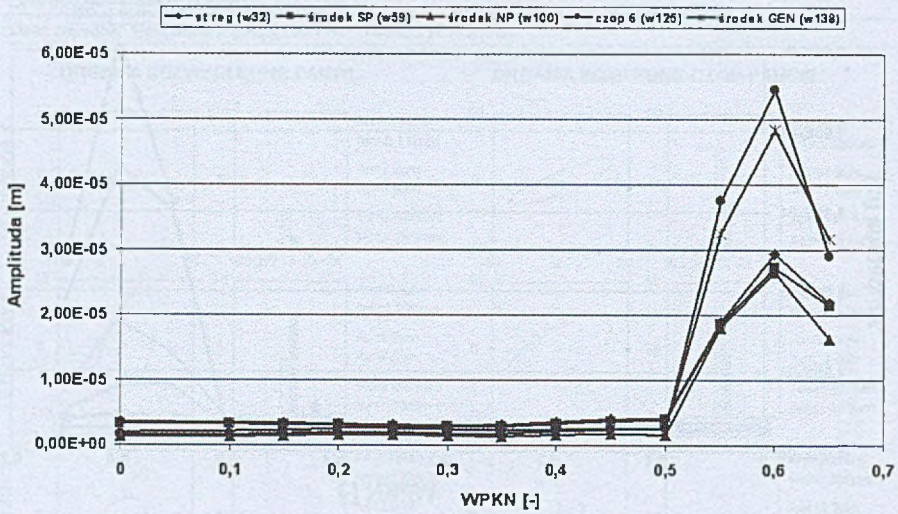
Kod karty: CR2C0300	Obiekt: 13K215	Data: 12.02.2004
Opis defektu: Pekniecie wirnika		
Dane zmienne: Pekniecie 2 (GEN), ALFAP=180st, WPKN=0.3		



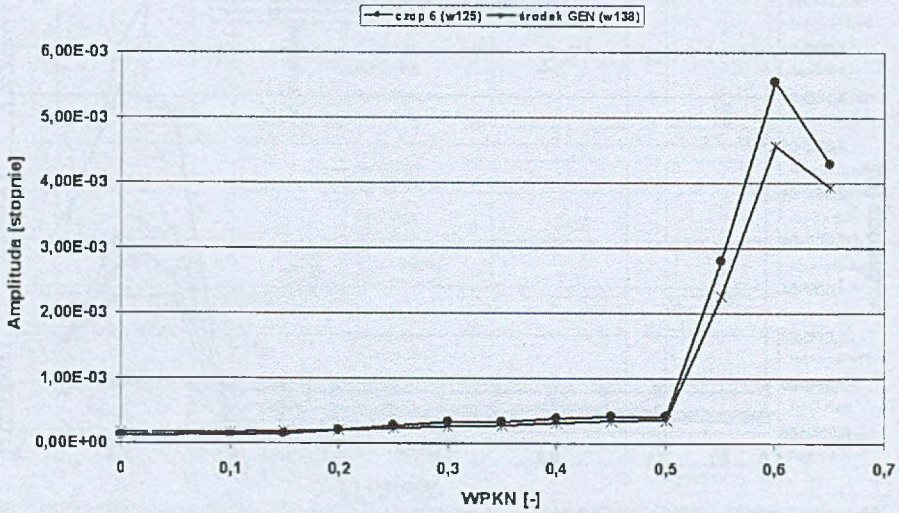
Czynnienia: A=amplituda przemieszczenia, V=prędkość RMS, f=kat pochylecia maksymalnej, przeklatnej trajektorii, m=wartosc maksymalna, pp="peak to peak", x,y=oscie pozioma i pionowa, u,v=oscie pod katem pi/4 do x,y, wykresy wzdmi: szary - kier. x, czarny - kier. y.

Rys. 5.56: Pęknięcia 2, WPKN=0.3, ALFAP=180° – karta diagnostyczna

Rys. 5.57: Pęknięcie 2, ALFAP=180⁰ – zmiany amplitud drgań bezwzględnychRys. 5.58: Pęknięcie 2, ALFAP=180⁰ – zmiany amplitud drgań względnych

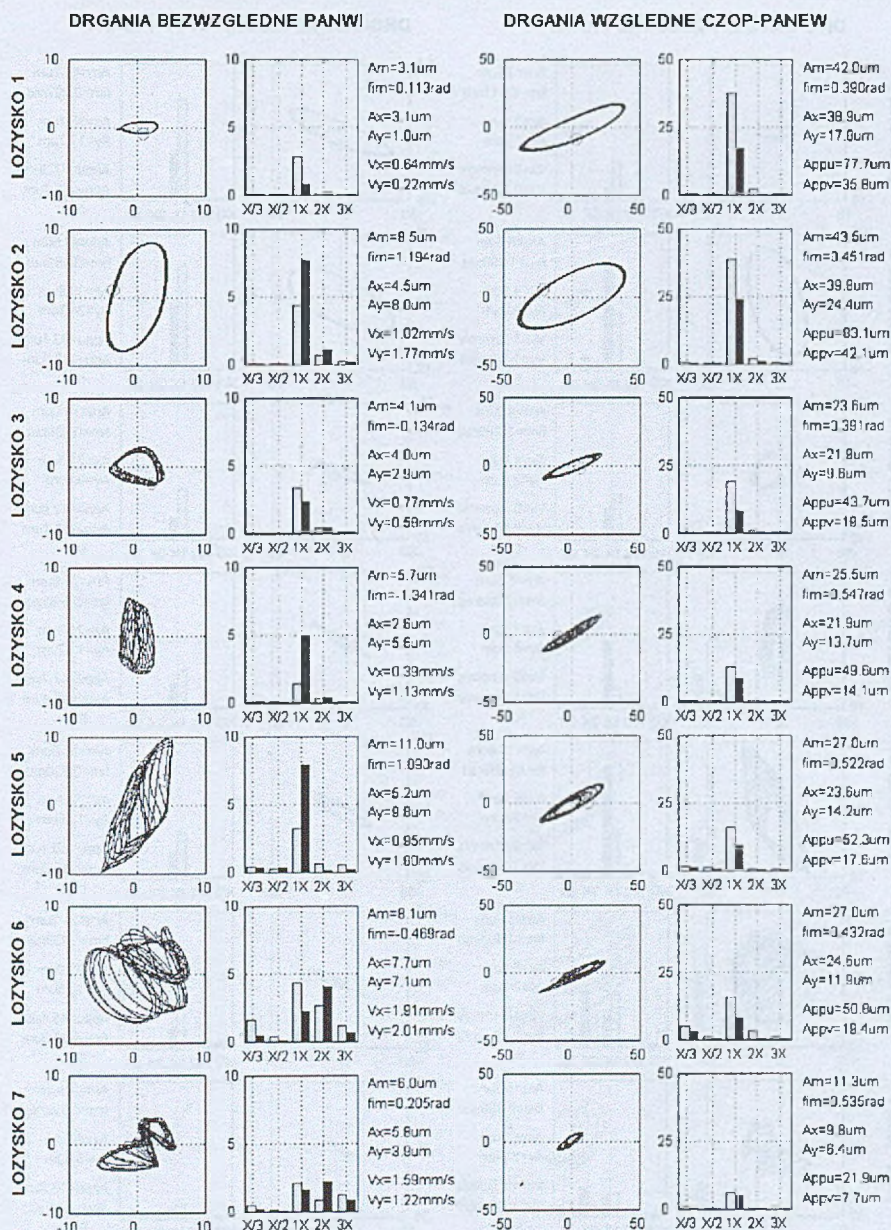


Rys. 5.59: Pęknięcie 2, ALFAP=180^o – zmiany amplitud drgań wzdłużnych



Rys. 5.60: Pęknięcie 2, ALFAP=180^o – zmiany amplitud drgań skrętnych

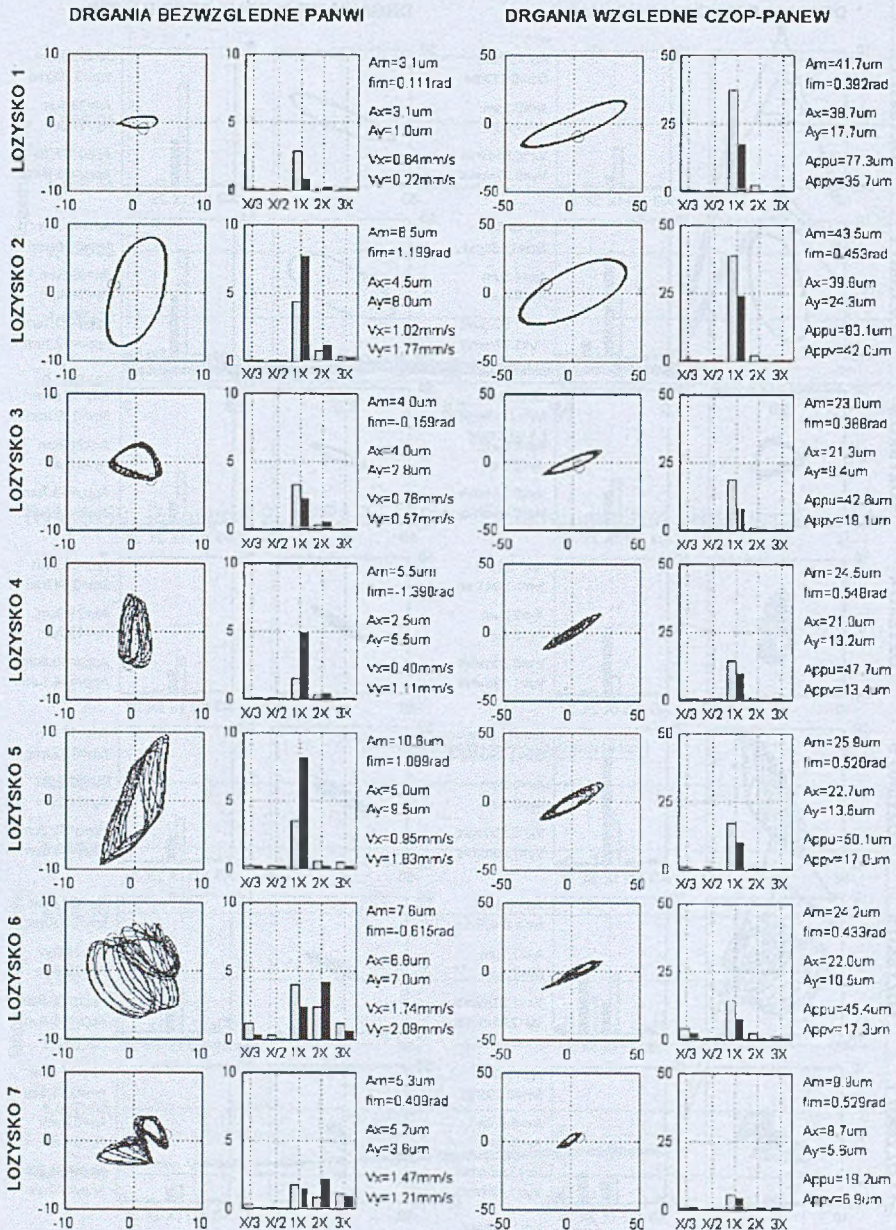
Kod karty: CR2C0450	Obiekt: 13K215	Data: 18.02.2004
Opis defektu: Pęknięcie wirnika		
Dane zmienne: Pęknięcie 2 (GEN), ALFAP=180st, WPKN=0.45		



Oznaczenia: A - amplituda przemieszczeń, V - prędkość RMS, f_m - kąt pochylenia maksymalnej prostej trajektorii, m - wartość maksymalna, pp - "peak to peak", x, y - osie pozioma i pionowa, u, v - osie pod kątem $\pi/4$ do x, y , wykresy widm: szary - kier. x , czarny - kier. y .

Rys. 5.61: Pęknięcia 2, WPKN=0.45, ALFAP=180° – karta diagnostyczna

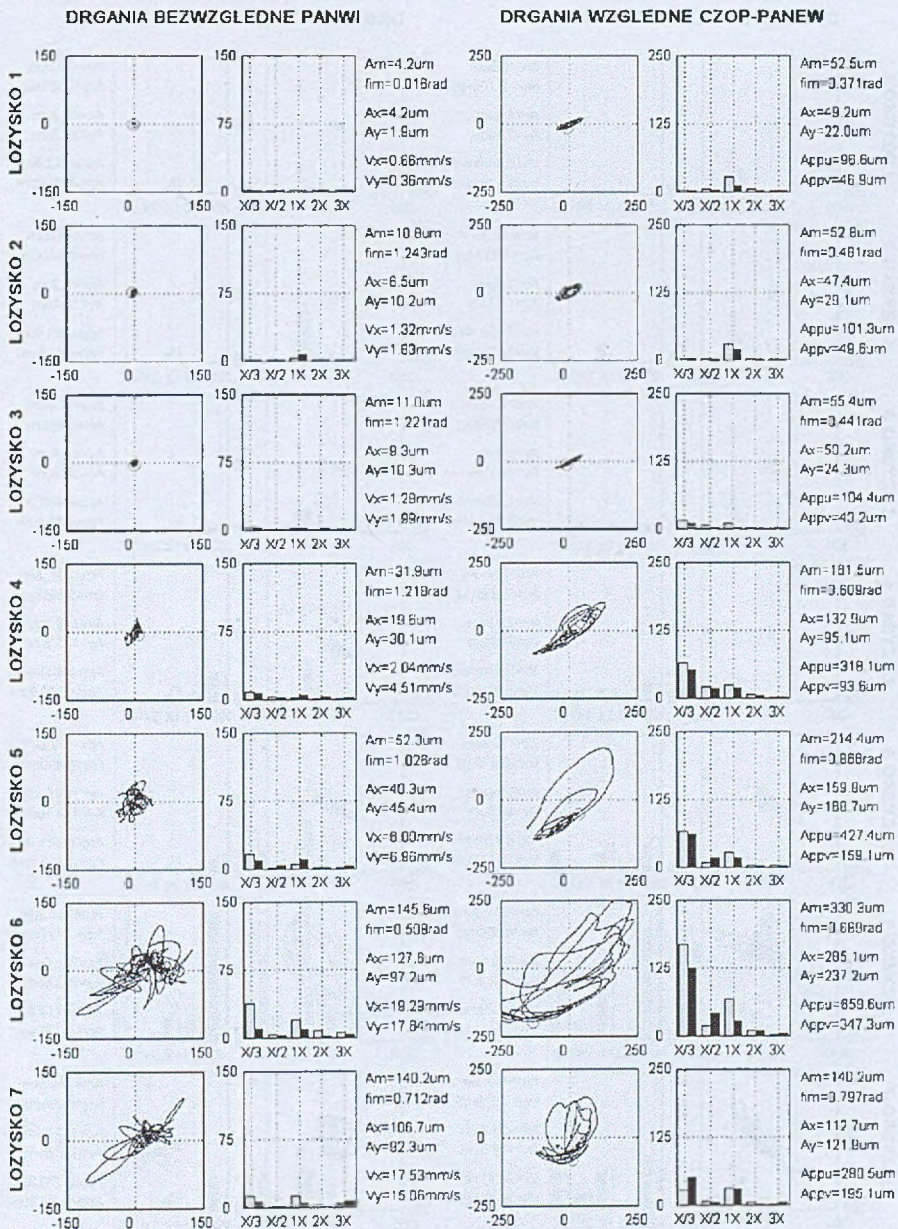
Kod karty: CR2C0500	Obiekt: 13K215	Data: 18.02.2004
Opis defektu: Pęknięcie wirnika		
Dane zmienne: Pęknięcie 2 (GEN), ALFAP=180st, WPKN=0.5		



Oznaczenia: A=amplituda przemieszczeń, V=prędkość RMS, fm=kąt pochylenia maksymalnej przekątnej trajektorii, m=wartość maksymalna, po="peak to peak", x,y=osię pozioma i pionowa, u,v=osię pod kątem pi/4 do x,y; wykresy wdm: szary - kier x, czarny - kier y

Rys. 5.62: Pęknięcia 2, WPKN=0.5, ALFAP=180° – karta diagnostyczna

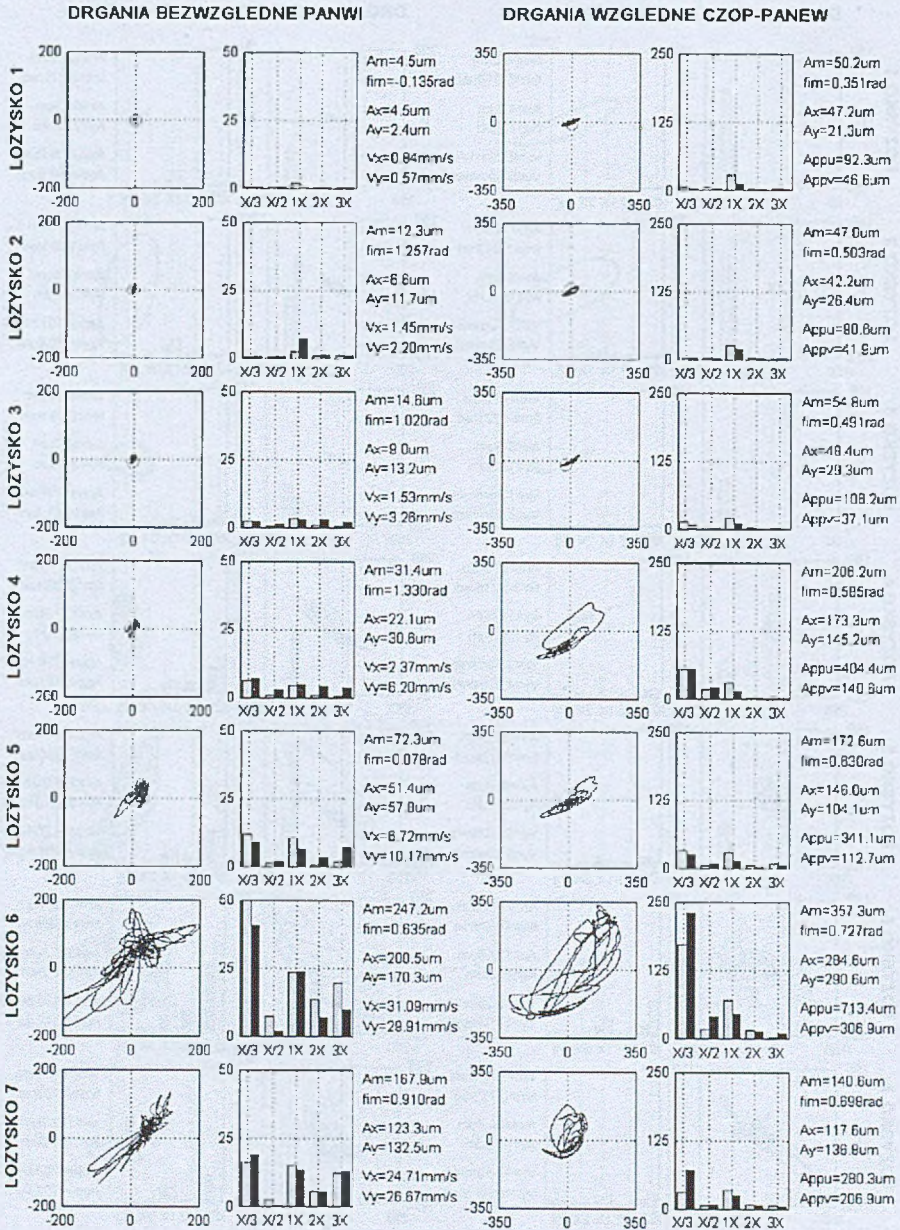
Kod karty: CR2C0550	Objekt: 13K215	Data: 24.02.2004
Opis dołączu: Pęknięcie wirnika		
Dane zmienne: Pęknięcie 2 (GEN), ALFAP=180st, WPKN=0.55		



Oznaczenia: A_m - amplituda przemieszczeń, V - predkosć RMS, f_m - kąt pochyleńia maksymalnej oszalnej trajektorii, m - wartość maksymalna, pp - "peak to peak", x, y - osie pozioma i pionowa, u, v - osie pod kątem 45° do x, y , wykresy widm szary - kier x , czarny - kier y

Rys. 5.63: Pęknięcia 2, WPKN=0.55, ALFAP=180° – karta diagnostyczna

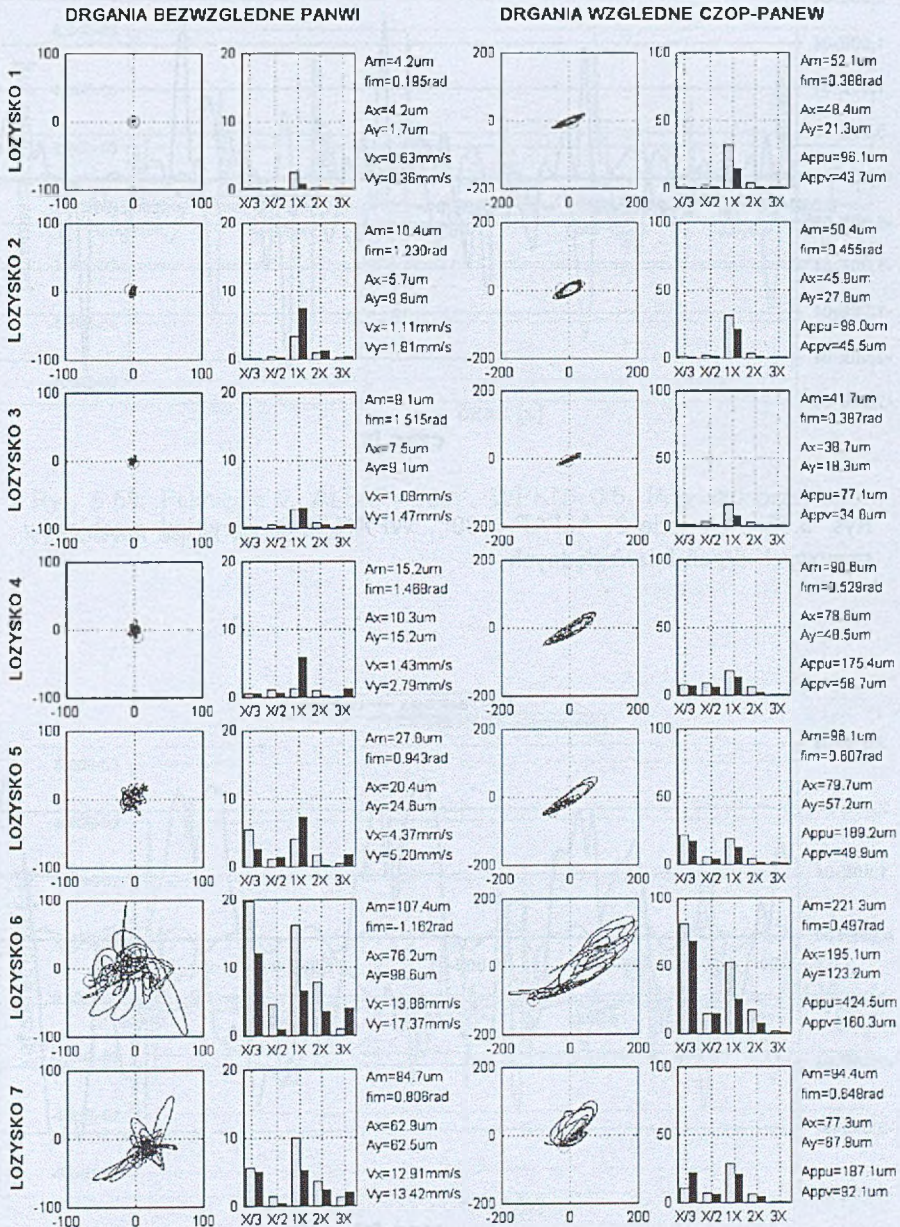
Kod karty: CR2C0600	Obiekt: 13K215	Data: 12.02.2004
Opis defektu: Pekniecie wirnika		
Dane zmiennu: Pekniecie 2 (GEN), ALFAP=180st, WPKN=0.6		



Oznaczenia: A=amplituda przemieszczeń, V=prędkość RMS, f_m=kąt pochylenia maksymalnej przekalnej trajektorii, m=wartość maksymalna, pp="peak to peak", x,y=osi pozioma i pionowa, u,v=osi pod kątem π/4 do x,y, wykresy widm szary - kier x, czarny - kier y

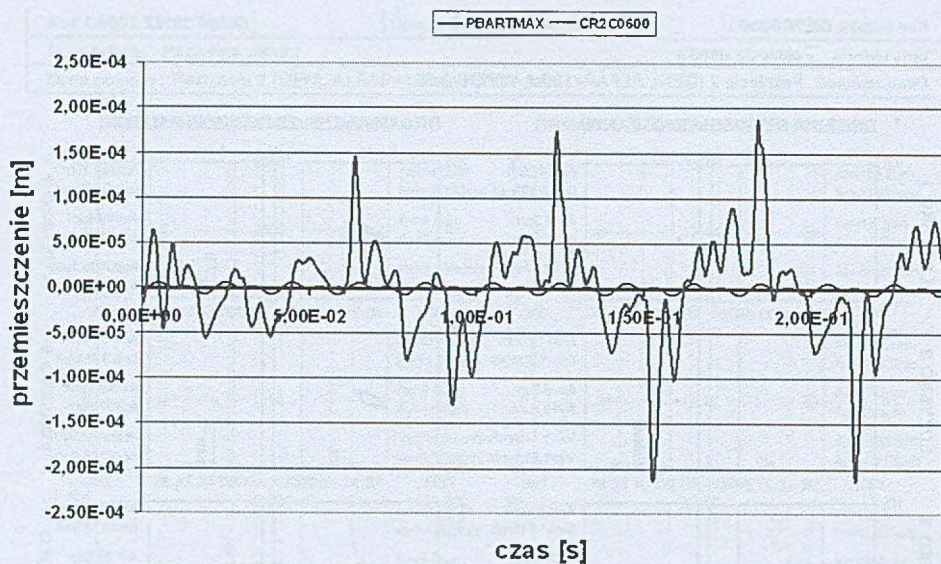
Rys. 5.64: Pęknięcia 2, WPKN=0.6, ALFAP=180° – karta diagnostyczna

Kod karty: CR2C0650	Obiekt: 13K215	Data: 12.02.2004
Opis detektu: Pęknięcie wirnika		
Dane zmienne: Pęknięcie 2 (GEN), ALFAP=180st, WPKN=0.65		

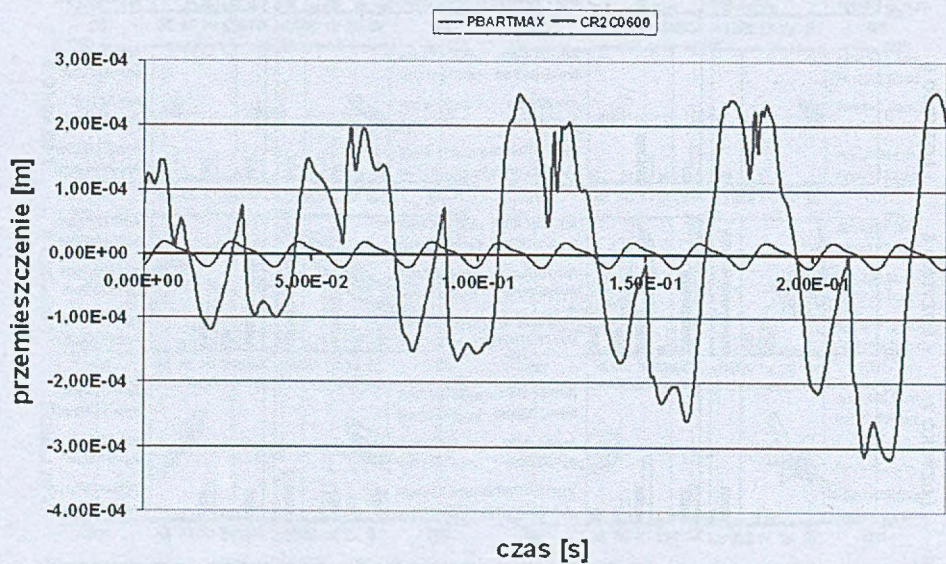


Oznaczenia: A = amplituda przemieszczeń, V = predkosć RMS, f = kąt pochylenia maksymalnej, przekrojonej trajektorii, m = wartość maksymalna, pp - "peak to peak", x, y = osie pozioma i pionowa, u, v = osie pod kątem $\pi/4$ do x, y, wykresy węgry szary - kier x, czarna - kier y

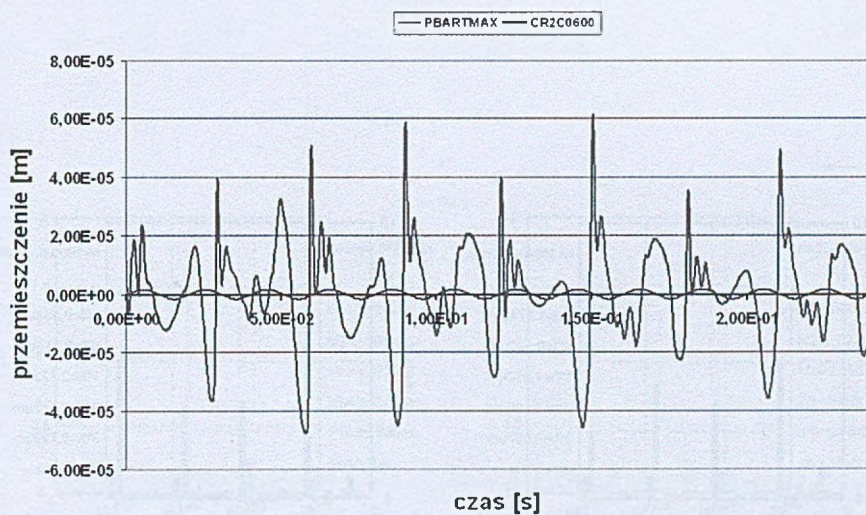
Rys. 5.65: Pęknięcia 2, WPKN=0.65, ALFAP=180° – karta diagnostyczna



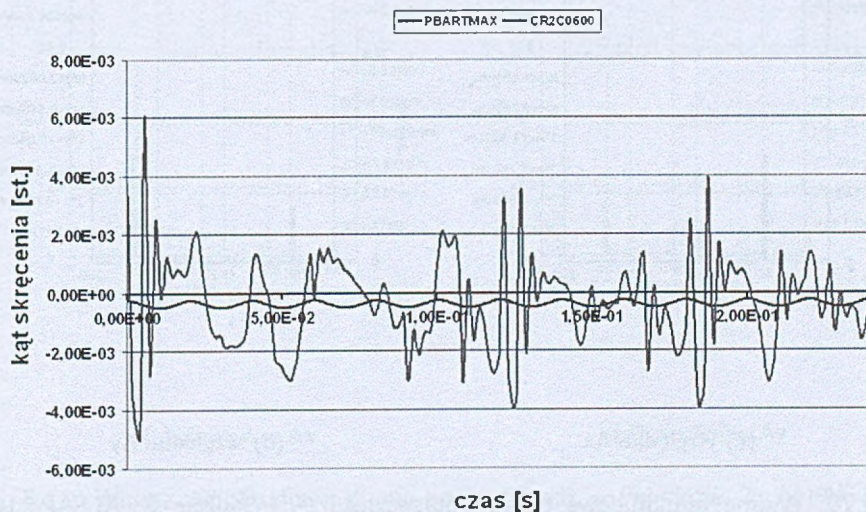
Rys. 5.66: Pęknięcie 2, ALFAP=180^o, WPKN=0.6. Przykład przebiegów czasowych drgań bezwzględnych



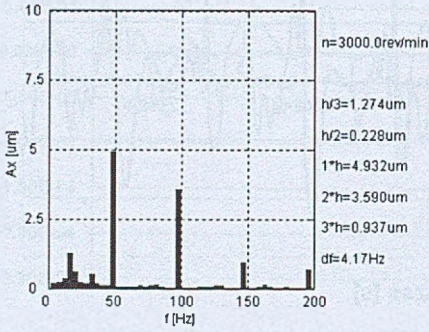
Rys. 5.67: Pęknięcie 2, ALFAP=180^o, WPKN=0.6. Przykład przebiegów czasowych drgań względnych



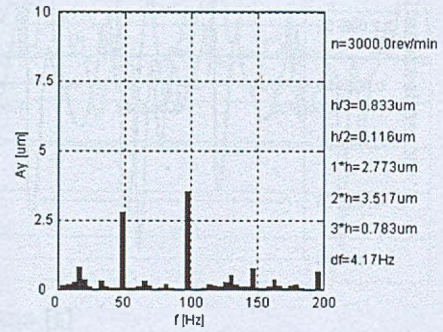
Rys. 5.68: Pęknięcie 2, ALFAP=180°, WPKN=0.6. Przykład przebiegów czasowych drgań wzdłużnych



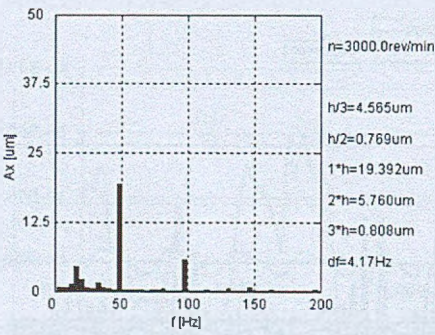
Rys. 5.69: Pęknięcie 2, ALFAP=180°, WPKN=0.6. Przykład przebiegów czasowych drgań skrętnych



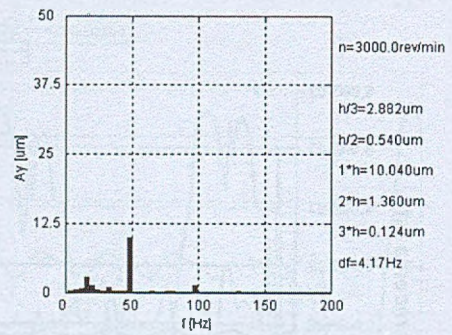
(a) bezwzględne Ax



(b) bezwzględne Ay

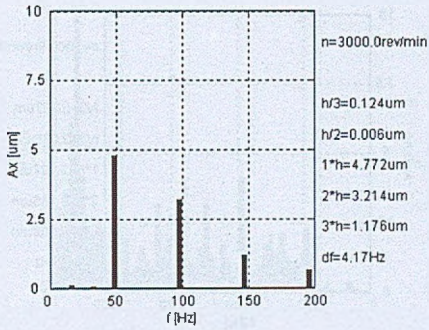


(c) względne Ax

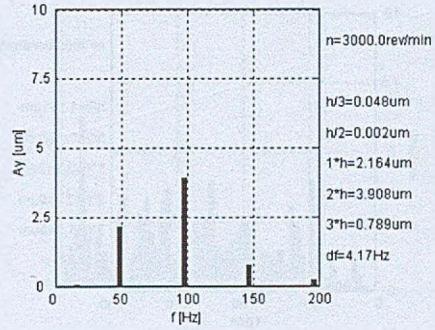


(d) względne Ay

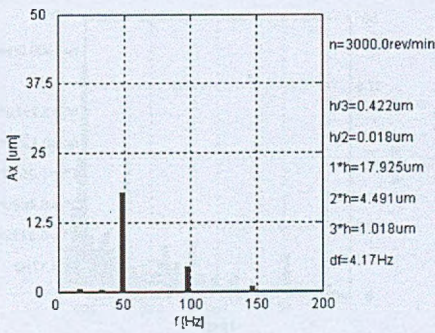
Rys. 5.70: Widma amplitudowe drgań poprzecznych – Pęknięcie 2, ALFAP=180°, WPKN=0.2



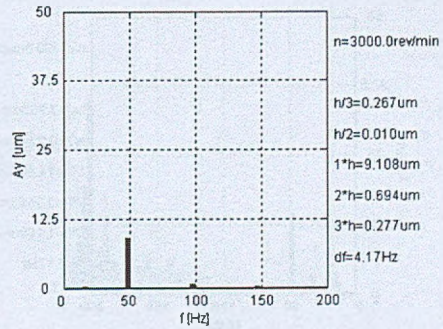
(a) bezwzględne Ax



(b) bezwzględne Ay

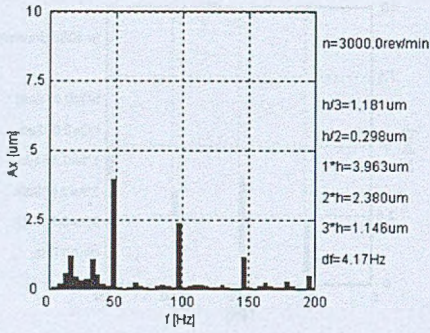


(c) względne Ax

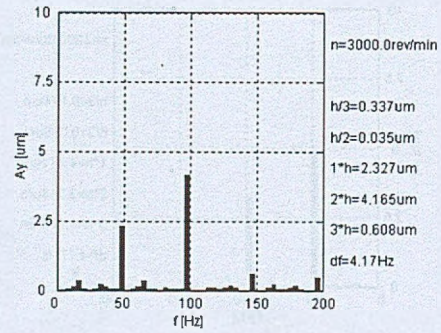


(d) względne Ay

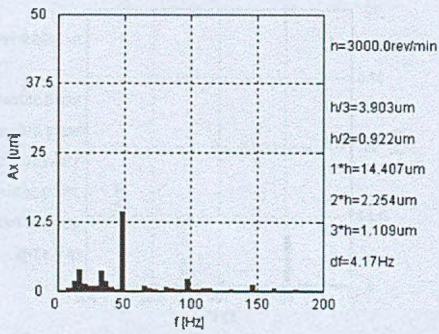
Rys. 5.71: Widma amplitudowe drgań poprzecznych – Pęknięcie 2, ALFAP=180^o, WPKN=0.35



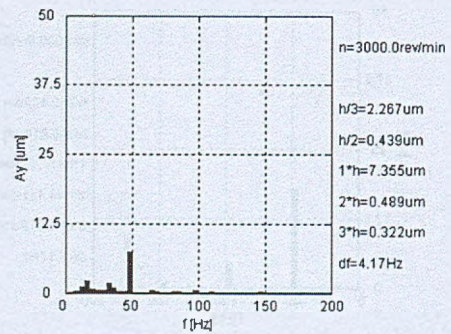
(a) bezwzględne Ax



(b) bezwzględne Ay

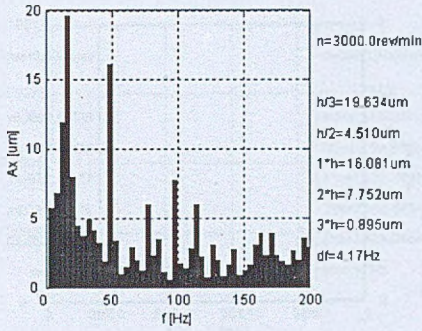


(c) względne Ax

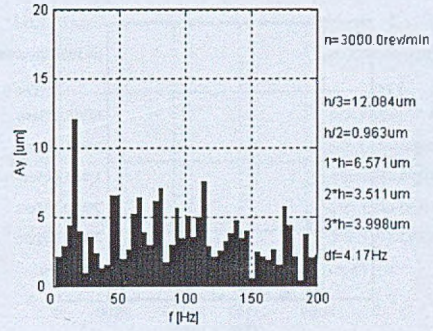


(d) względne Ay

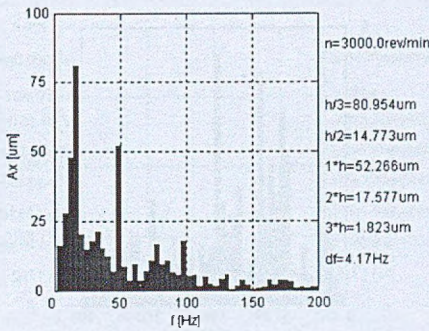
Rys. 5.72: Widma amplitudowe drgań poprzecznych – Pęknięcie 2, ALFAP=180°, WPKN=0.5



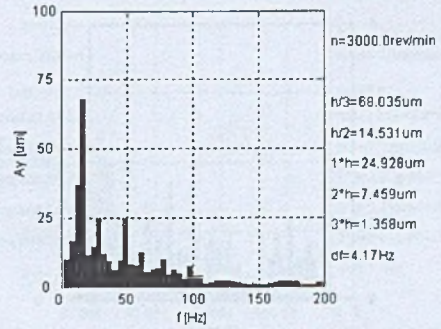
(a) bezwzględne Ax



(b) bezwzględne Ay

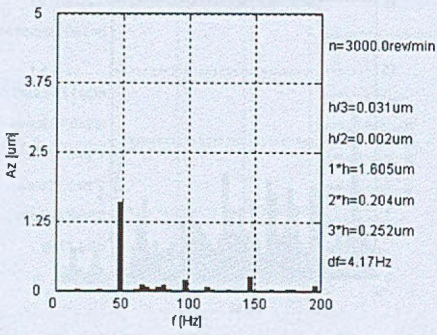


(c) względne Ax

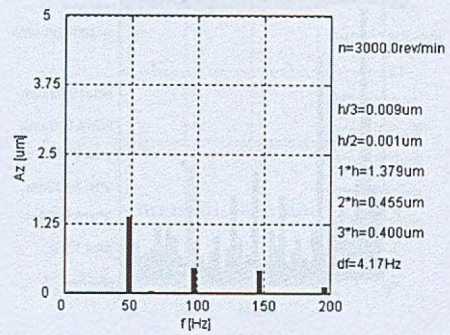


(d) względne Ay

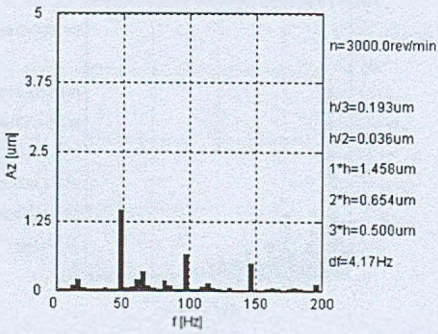
Rys. 5.73: Widma amplitudowe drgań poprzecznych – Pęknięcie 2, ALFAP=180°, WPKN=0.65



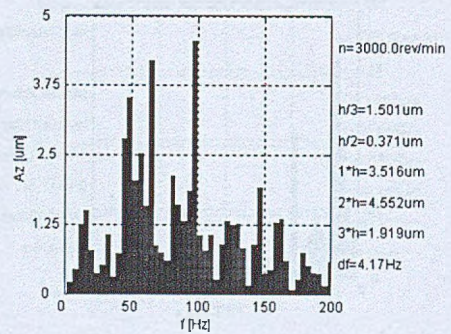
(a) bezwzględne Ax



(b) bezwzględne Ay



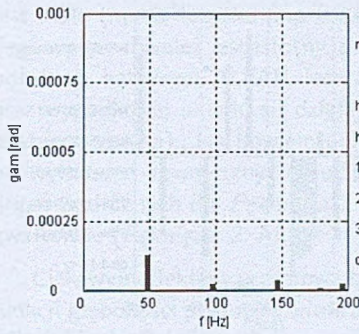
(c) względne Ax



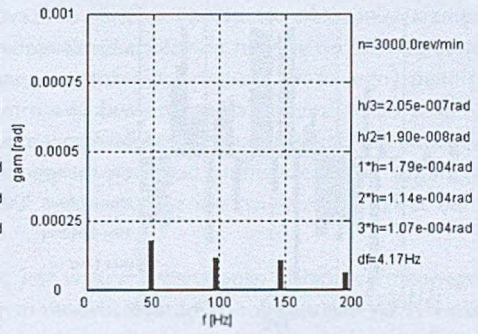
(d) względne Ay

Rys. 5.74: Widma amplitudowe drgań wzdłużnych – Pęknięcie 2, ALFAP=180°

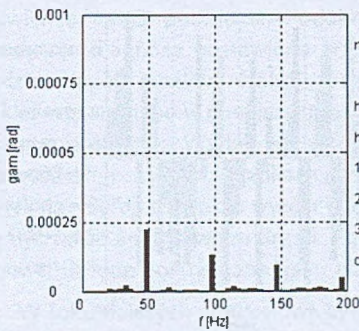
5.4. Podsumowanie



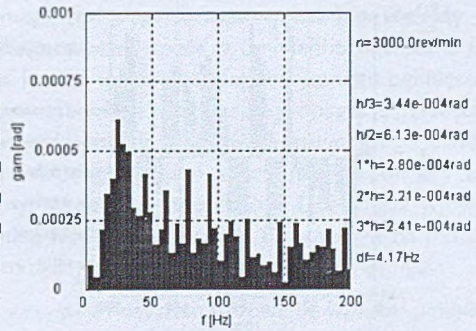
(a) bezwzględne Ax



(b) bezwzględne Ay

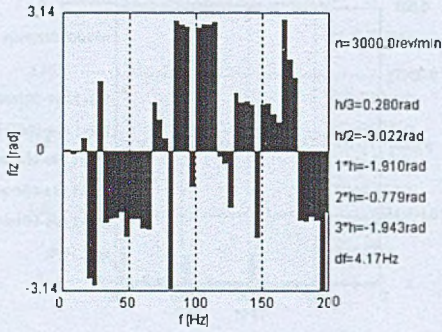


(c) względne Ax

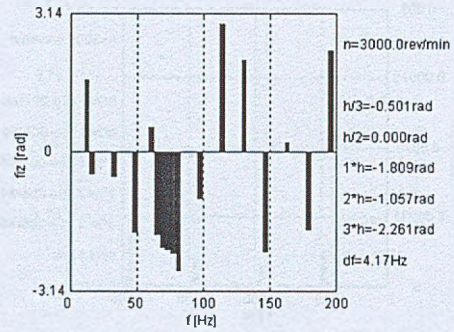


(d) względne Ay

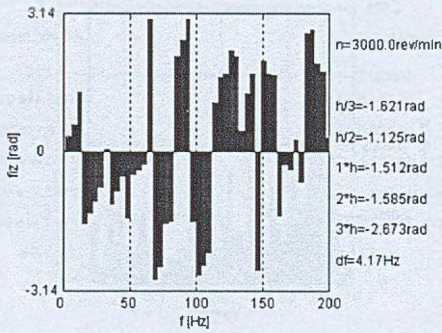
Rys. 5.75: Widma amplitudowe drgań wzdłużnych – Pęknięcie 2, ALFAP=180^o



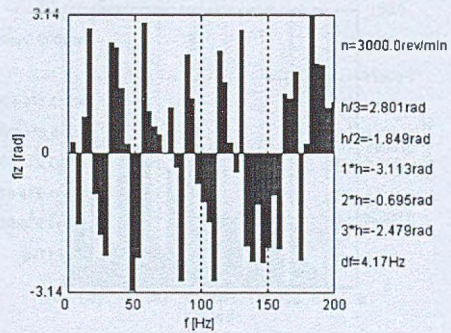
(a) WPKN=0.2



(b) WPKN=0.35



(c) WPKN=0.5



(d) WPKN=0.65

Rys. 5.76: Widma fazowe drgań wzdłużnych, Pęknięcie 2, ALFAP=180°

5.4. Podsumowanie

Spróbujmy dokonać pewnego podsumowania przedstawionych wyników prac. Ich analiza pokazuje, że wpływ pęknięcia na stan dynamiczny dużej maszyny wirnikowej jest niejednoznaczny. Zauważyć można zależność zarówno od głębokości pęknięcia, jak też od jego umiejscowienia w wirniku. Generalnie można powiedzieć, iż wpływ ten jest większy, gdy pęknięcie znajduje się w obszarze wirnika o dużym ugięciu kinetostatycznym (np. środek generatora), niż gdy to ugięcie jest małe (np. w łożysku poprzecznym). Rozważano również obwodowe położenie pęknięcia. Jego wpływ również jest istotny, przy czym wydaje się, iż zależy on nie tyle od bezwzględного położenia kąтового ALFAP, lecz od wzajemnego położenia kąтового (fazowego) pęknięcia oraz wypadkowej układu sił działających na wirnik (lub wymuszenia dominującego w danym obszarze wirnika). Jak bowiem pokazano, nałożenie się efektów dynamicznych pochodzących od wymuszeń zewnętrznych i od pęknięcia mogą spowodować zmniejszenie się drgań (np. drgań wzdłużnych dla *Pęknięcia 1* i ALFAP=90°), jak również ich zwiększenie, nawet bardzo gwałtowne (*Pęknięcia 2*, ALFAP=180°).

Ciekawym efektem przeprowadzonych prac jest wykrycie rezonansu układu wirnikowego w funkcji głębokości pęknięcia wirnika. W badanym modelu wystąpił on w zakresie WPKN około 0.2÷0.25 dla *Pęknięcia 2*.

Istotną kwestią z punktu widzenia diagnostyki jest określenie odpowiednio wiarygodnego wyróżnika diagnostycznego dla defektu typu pęknięcie wirnika. Okazuje się, iż o ile nie wystąpi jakiś przypadek szczególnie, powodujący znaczący wzrost drgań (jak np. dla *Pęknięcia 2*, ALFAP=180°), wykrycie pęknięcia na podstawie obserwacji drgań poprzecznych (które są w dużych maszynach standardowo monitorowane) jest niezmiernie trudne. Trudność tą powoduje przede wszystkim fakt, iż zmiany amplitud w większości policzonych przypadków okazały się niewielkie, wręcz pomijalne. Podobne zmiany mogą być wygenerowane przez inne defekty, a wtedy np. diagnoza postawiona przez system diagnostyczny może być niejednoznaczna, o ile będzie w ogóle możliwa. Należy zatem poszukać innego wyróżnika diagnostycznego pęknięcia. Jak to wspomiano w niniejszej pracy, stosunkowo najbardziej wrażliwe na propagację pęknięcia są drgania skrętne. Wydaje się zatem, że prowadzenie pomiarów drgań skrętnych poprawiłoby trafność diagnozy w przypadkach pęknięć, pomimo trudności technicznych, jakie te pomiary napotyka. Byłby to lepszy wyróżnik diagnostyczny, niż drgania poprzeczne. Obiecująca wydaje się być także analiza widm drgań. Pęknięcie wirnika wywiera szczególnie duży wpływ na widma fazowe. Są one postrzegane, jako potencjalnie możliwy wyróżnik diagnostyczny pęknięcia.

W toku dalszych prac celowe byłoby przede wszystkim usystematyzowanie wpływu pęknięć na widma drgań, zwłaszcza fazowe. Celowe byłoby tu na przykład dokonanie obliczeń z mniejszym krokiem czasowym, jak również określenie kryteriów według których brane byłyby pod uwagę prążki widmowe do analizy fazowej.

Nie bez znaczenia byłoby również bardziej szczegółowe określenie zjawisk zachodzących w momencie, w którym, na skutek odpowiednio dużej głębokości pęknięcia, układ wirnikowy zaczyna pracować niestabilnie. Taka sytuacja miała miejsce dla *Pęknięcia 2*, ALFAP=180°, WPKN=0.5. Dokładniejsze rozpoznanie tych zjawisk pozwoliłoby być może na wykrywanie stanu *granicznego* maszyny, po przekroczeniu którego jej dalsza eksploatacja byłaby niebezpieczna.

Niniejsza praca pozwoliła na określenie wpływu pęknięcia na stan dynamiczny turbozespołu dużej mocy. Jak to jednak widać, w jej wyniku pojawiły się nowe, ciekawe zagadnienia, którymi warto byłoby się zająć w przyszłości. Praca ta stanowi zatem pewien przyczynek do dalszych prac badawczych pęknięć wirnika dużych maszyn energetycznych.

Bibliografia

- [5.1] S. Banaszek. Obliczenia pęknięć wirnika turboszespołu 13K215. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN w Gdańsku, 2004.
- [5.2] J. Kiciński. Identyfikacja modelu obliczeniowego turboszespołu 13K215. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN, nr arch. 4068/2004, GDAŃSK, 2004.
- [5.3] J. Kiciński. Sprzężone formy drgań nieliniowych jako nowe narzędzie w badaniach pęknięć wirujących wałów. Opracowanie wewnętrzne, IMP PAN, 2004.



BG Politechniki Śląskiej w Gliwicach
nr inw.: 102 - 112885



Mg 112885

Ostatnio ukazały się:

- 124 M. Bednarski, W. Cholewa, W. Frid, M. Galek *Simulation of nuclear reactors accidents*, Gliwice 2004
- 123 M. Fidali *Metody łącznej analizy sygnałów w wielokanałowych układach diagnozujących maszyny wirnikowych*, Gliwice 2003
- 122 P. Czop *Diagnostic models of rotating machinery under transient operating conditions*, Gliwice 2002
- 121 P. Kostka *Metody klasyfikacji postaci kinetostatycznych linii wałów maszyn wirnikowych*, Gliwice 2001
- 120 W. Cholewa, J. Kiciński (red.) *Diagnostyka techniczna. Metody odwracania nieliniowych modeli obiektów*, Gliwice 2001
- 119 K. Psiuk *Obiektowe modele procesu propagacji stanów w układach maszyn*, Gliwice 2001
- 118 K. Ciupke *Metody selekcji i redukcji informacji w diagnostyce maszyn*, Gliwice 2001
- 117 P. Chrzanowski *Metody jakościowej oceny cech sygnałów diagnostycznych*, Gliwice 2001
- 116 P. Maniak *Badanie przydatności metod indukcyjnych do pozyskiwania wiedzy projektowej*, Gliwice 2000
- 115 M. Wyleżoł *Metody pozyskiwania procedur i relacji diagnostycznych od specjalistów w dziedzinie eksploatacji maszyn*, Gliwice 2000