

ROZDZIAŁ 3

NARZĘDZIA BADAWCZE I ICH WERYFIKACJA

- ZESPÓŁ PROGRAMÓW KOMPUTEROWYCH MESWIR
- WERYFIKACJA W SKALI LABORATORYJNEJ
- WERYFIKACJA NA OBIEKTACH RZECZYWISTYCH

Przedstawimy w tym rozdziale zespół programów komputerowych tworzących spójne środowisko o nazwie **MESWIR** i bazujących na modelach zaprezentowanych w rozdziałach 1 i 2. Zespół programów MESWIR a zwłaszcza program **NLDW** do analizy dynamiki w zakresie nieliniowym stanowią podstawowe narzędzia badawcze wykorzystywane w niniejszej monografii. Tego typu narzędzia umożliwiają zaawansowane aplikacje w diagnostyce różnych maszyn wirnikowych, a zwłaszcza dużych obiektów energetycznych takich jak turbozespoły dużej mocy. Możliwe bowiem staje się modelowanie różnego rodzaju defektów w pracy tych obiektów, a następnie analiza ich symptomów na podstawie nieeliptycznych kształtów trajektorii i widm drgań. Nieeliptyczne i niesinusoidalne przebiegi przemieszczeń dynamicznych wybranych węzłów układu kryją w sobie różnego rodzaju defekty, a ich analiza za pomocą widm drgań umożliwia budowę **katalogów relacji diagnostycznych** i tym samym „trenowanie” różnego rodzaju układów adaptacyjnych stosowanych przy bardzo już zaawansowanych systemach nadzoru i diagnostyki wykorzystujących np. elementy sztucznej inteligencji. Zaprezentowane zostaną też możliwe do zamodelowania **klasy defektów** typowe dla maszyn wirnikowych.

Przedstawimy również przykłady weryfikacji eksperymentalnej programów tworzących środowisko MESWIR. Badania weryfikacyjne przeprowadzone zostały zarówno w skali laboratoryjnej na unikalnym, wielkogabarytowym stanowisku badawczym jak i na obiektach rzeczywistych, takich jak turbozespoły energetyczne o mocy 200 MW. Wykorzystany tu został system diagnostyczny DT-200 zainstalowany na jednym z krajowych bloków energetycznych. System ten dostarczył wielu cennych danych eksperymentalnych niezbędnych dla procesu weryfikacji opracowanych narzędzi badawczych. Zwrócona została uwaga na fakt, iż w przypadku dużych maszyn energetycznych, tzw. **weryfikacja ilościowa** – typowa w badaniach laboratoryjnych – jest praktycznie niemożliwa, z uwagi na trudności w pozyskaniu wielu danych do obliczeń. Pozostaje nam wówczas do dyspozycji jedynie **weryfikacja jakościowa** realizowana drogą obliczeń parametrycznych i poprzez procedurę „**strojenia modelu**”.

Przedstawimy również przykład weryfikacji modelu na stanowisku badawczym po przekroczeniu przez układ granicy stabilności, a więc w warunkach występowania wirów i „bicia” olejowego w łożyskach ślizgowych. Tego typu badania eksperymentalne prowadzone są niezwykle rzadko z uwagi na bezpieczeństwo obsługi.

3.1 Środowisko MESWIR

Przedstawiona w rozdziałach 1 i 2 metodologia opisu matematycznego konstrukcji podpierającej, linii wirników i łożysk ślizgowych oraz zaprezentowane tam modele teoretyczne i algorytmy obliczeń wraz z dyskusją dotyczącą możliwości rozwiązania numerycznego przyjętego układu, stanowiły podstawę dla opracowania całego pakietu programów komputerowych, tworzących spójne i unikalne w skali kraju środowisko o nazwie **MESWIR** (Metoda Elementów Skończonych w analizie **WIR**ników). Środowisko MESWIR jest oryginalnym osiągnięciem ośrodka gdańskiego (Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku) i stanowi efekt wielu lat pracy kilkunastu osób bezpośrednio związanych z teorią i praktyką łożysk ślizgowych i maszyn wirnikowych.

Środowisko komputerowe MESWIR składa się z trzech zasadniczych modułów – rys. 3.1:

- zespołu programów do analizy poprzecznych i wzdłużnych łożysk ślizgowych,
- zespołu programów do analizy zagadnień kinetostatyki układów wirnik-łożyska-fundament,
- zespołu programów do analizy zagadnień dynamiki układów wirnik-łożyska-fundament.

Łożyska ślizgowe

Zespół programów łożyskowych stanowi punkt wyjścia w kompleksowej analizie całego zagadnienia. Moduł ten jest szczególnie istotny z uwagi na fakt, iż łożyska ślizgowe stanowią silnie nieliniowy element całego układu. Ponadto diagnostyka maszyn wirnikowych oparta na ocenie drgań czopów i panwi łożyskowych ciągle pozostaje głównym sposobem oceny stanu dynamicznego tych maszyn. Opracowane programy komputerowe bazują na trzech modelach cieplnych (rozdział 2.2), a mianowicie: izotermicznym, w którym zakłada się stałą lepkość oleju w całej szczelinie smarnej (programy IZOTER i IZOSLEW); diatermicznym, w którym lokalną lepkość określa się na podstawie wymiany ciepła w filmie smarnym i w pozostałych elementach łożyska wraz z otoczeniem (programy DIATER) oraz elastodiatermicznym, w którym dodatkowo uwzględnia się deformacje termosprężyste panwi (program DIADEF).

Wszystkie ww. programy mają możliwość praktycznie dowolnego zapisu kształtu szczeliny smarnej, co oznacza możliwość analizy charakterystyk łożysk zarówno z luzem kołowo-cylindrycznym jak i łożysk antywibracyjnych (soczewkowych, off-setowych czy wieloklinowych z dowolną kompozycją klinów smarnych).

Szczególnie interesujące możliwości kryje w sobie program IZOSLEW, który ponadto uwzględnia ewentualne nierównoległości osi czopa względem osi panwi (tzw. „przekoszenie” panwi) oraz kieszenie lewarowe dowolnie usytuowane w szczelinie smarnej. Przy zasilaniu zewnętrznym ciśnieniem lewarowym program IZOSLEW opisuje pracę łożyska w warunkach **smarowania hybrydowego**, a więc smarowania hydrodynamicznego skojarzonego z smarowaniem hydrostatycznym.

Wszystkie programy łożyskowe obliczają współczynniki sztywności i tłumienia filmu olejowego metodą perturbacji opisaną w rozdziale 2.2, a więc metodą dokładną i szybką. Ponadto zawierają one moduł DYNAMIKA, który sprzęga z łożyskiem w trybie *on-line* prosty, jednomasowy i symetryczny model wirnika, opisany szczegółowo w rozdziale 2.3. Pozwala nam to realizować obliczenia według koncepcji przedstawionej na rys. 2.36, z wykorzystaniem wszystkich równań analitycznych wyprowadzonych w rozdziale 2.3 i w efekcie otrzymywać bardzo użyteczne charakterystyki dynamiczne w postaci amplitudy drgań wymuszonych (półoś duża elipsy przemieszczeń czopa), tłumienia i częstości drgań własnych układu oraz granicę jego stabilności.

Zespół programów komputerowych o różnym stopniu złożoności i różnych możliwościach obliczeniowych, pracujących w jednym spójnym środowisku, stwarza szansę wielu wzajemnych kombinacji i tym samym kojarzenia rozwiązań optymalnych. Dla przykładu, z programów bardziej zaawansowanych opartych na diatermicznym modelu cieplnym, można wyznaczyć średnią temperaturę oleju wylotowego z łożyska i tym samym średnią efektywną lepkość dynamiczną i tak wyznaczoną wartość zastosować jako stałą w całej szczelinie smarnej w programach opartych wprowadzić na prostym modelu izotermicznym, ale posiadających za to inne możliwości opisu stanu łożyska (np. w programie IZOSLEW, co w efekcie stwarza szansę „pseudodiatermicznego” opisu wpływu „przekoszeń” panwi i smarowania hybrydowego przy jednocześnie krótkim czasie obliczeń). Tego rodzaju możliwości optymalizacji analizy przyjętego obiektu, z punktu widzenia modelowania defektów lub anormalnych jego stanów, a więc z punktu widzenia diagnostyki, mają kapitalne znaczenie.

Zagadnienia kinetostatyki

Zagadnienia kinetostatyki układów wirnik-łożyska-fundament stanowią wydzieloną grupę tematyczną i tym samym odrębny moduł środowiska MESWIR. Powody dla których takie ujęcie problemu jest właściwe zostały przedstawione w rozdziale 1. Bazując na omówionych wcześniej programach łożyskowych a następnie na modelu MES wielopodporowego wirnika i sprowadzając oddziaływania konstrukcji podpierającej do macierzy współczynników sztywności i tłumienia dla każdej z podpór (rozdział 1 i 2) można opracować kilka wariantów programów do analizy zagadnień kinetostatyki, tzn. zagadnień, w których interesują nas głównie oddziaływania podpór na obracający się wał i tym samym obciążenia statyczne łożysk. Z punktu widzenia mechaniki układy wielopodporowe są statycznie niewyznaczalne, co oznacza konieczność uciążliwego postępowania iteracyjnego w którym pętla

doboru odkształceń linii wirników musi być skorelowana z pętlą doboru położenia czopów łożyskowych w panwiach i położenia panwi w stosunku do linii geodezyjnej wirnika. W efekcie, po zakończeniu procedury iteracyjnej otrzymujemy linię ugięć kinetostatycznych wirnika i reakcje w poszczególnych podporach.

Opracowane zostały programy serii KINWIR, które w zależności od przyjętego modelu łożyska wyznaczają podstawowe parametry kinetostatyczne układu bazując na opisie izotermicznym (programy KINWIR-I, KINWIR-I-LEW), diatermicznym (program KINWIR-D) oraz elastodiatermicznym (program KINWIR-F) – rys. 3.1. Programy serii KINWIR określają podstawowe parametry statyczne łożysk w podporach (położenie środka czopa w płaszczyźnie luzów, nośność hydrodynamiczna, moc tarcia, zużycie oleju, minimalna grubość filmu olejowego itd.) oraz współczynniki sztywności i tłumienia filmu olejowego w punkcie równowagi statycznej, a także wyznaczają kształt linii ugięć wału wirnika.

Warto odnotować fakt, iż programy serii KINWIR umożliwiają obliczenia z uwzględnieniem przemieszczeń panwi łożyskowych w stosunku do linii geodezyjnej wirnika. Stwarza to szanse na modelowanie defektów w postaci dylatacji termicznych i eksploatacyjnych podpór łożyskowych i całej konstrukcji podpierającej czyli defekty w postaci **rozosiowania linii wirników**.

Charakterystyki konstrukcji podpierającej (podpory łożyskowe i fundament) w miejscu posadowienia linii wirników wprowadzane są do programów serii KINWIR w postaci macierzy współczynników sztywności i tłumienia opisującej zarówno lokalne charakterystyki podpory jak i sprzężenia pomiędzy nimi (patrz: rozdział 1). Wyznaczenie tych macierzy, jak pamiętamy, wymaga zastosowania przestrzennych modeli MES całej konstrukcji podpierającej lub też badań eksperymentalnych na obiekcie rzeczywistym i stanowi bardzo złożone zagadnienie. W programach serii KINWIR zastosowany został stosunkowo prosty model MES konstrukcji podpierającej o nazwie DNIEPR, który ma tę zaletę, iż jest bezpośrednio zintegrowany z programami kinetostatycznymi (obliczenia w trybie „on-line”). W przypadkach bardziej złożonych konieczne staje się zastosowanie narzędzi bardziej zaawansowanych np.: programów komercyjnych typu ABAQUS lub programów specjalistycznych różnych ośrodków. Narzędzia te jednak mogą współpracować z programami serii KINWIR jedynie w trybie *off-line*.

Zagadnienia dynamiki

Uzyskane parametry z analizy kinetostatycznej układu stanowią punkt wyjścia do analizy zagadnień dynamiki i to zarówno w ujęciu liniowym jak i nieliniowym. Jeśli na układ działają sinusoidalne wymuszenia zewnętrzne a ich amplituda jest na tyle mała, że przemieszczenia czopów łożyskowych wokół punktu równowagi statycznej są wystarczająco małe, to zasadnym staje się opis liniowy zagadnień dynamiki. Dla tego rodzaju przypadków opracowane zostały programy serii DYNWIR zarówno do analizy drgań wymuszonych (DYNWIR-W) jak i swobodnych (DYNWIR-S) – rys. 3.1. Warto zauważyć, że potrzebne tu współczynniki sztywności i tłumienia filmu olejowego oraz konstrukcji podpierającej wyznaczone mogą być w oparciu o zaawansowane programy kinetostatyczne, takie jak np. KINWIR-I-LEW lub

Środowisko MESWIR

ŁOŻYSKA ŚLIZGOWE

Model izotermiczny	Model diatermiczny	Model elastodiatermiczny
IZOTER, IZOSLEW, IZOWU (Wzdłużne)	DIATER	DIADEF

KINETOSTATYKA – Układ wirnik-łożyska-fundament

Model izotermiczny	Model diatermiczny	Model elastodiatermiczny
KINWIR-I, KINWIR-I-LEW (na bazie programów IZOTER , IZOSLEW)	KINWIR-D (na bazie Programu DIATER)	KINWIR-F (na bazie programu DIADEF)

Konstrukcja podpierająca/fundament:

- Program DNIEPR skojarzony z wszystkimi programami serii KINWIR
- Programy komercyjne np.: ABAQUS na zasadzie „of-line”

DYNAMIKA – Układ wirnik-łożyska-fundament

Opis liniowy		Opis nieliniowy	
Drgania wymuszone	Drgania swobodne	NLDW (na bazie IZOTER)	NLDW-LEW (na bazie IZOSLEW)
DYNWIR-W	DYNWIR-S		
Współczynniki sztywności i tłumienia filmu olejowego z programów: IZOTER, IZOSLEW, DIATER, DIADEF w zależności od potrzeby		Parametry kinetostatyczne z programów: KINWIR-I, KINWIR-I-LEW, KINWIR-D, KINWIR-F w zależności od potrzeby	

Rys. 3.1. Nazwy programów komputerowych do analizy złożonych układów typu: linia wirników-łożyska ślizgowe-konstrukcja podpierająca tworzących środowisko MESWIR

KINWIR-F, co znakomicie podnosi wartość opisu liniowego zagadnień dynamiki.

Z punktu widzenia diagnostyki według modelu największą jednak wartość mają programy do opisu zagadnień dynamiki w zakresie nieliniowym. Obciążenia zewnętrzne mają bowiem najczęściej charakter przebiegów niesinusoidalnych i ponadto zmiennych w czasie w sposób nieliniowy. Wartości tych obciążeń mogą być na tyle duże, że przemieszczenia czopów w obrębie luzów łożyskowych trudno uznać za małe. W takich przypadkach opis nieliniowy staje się po prostu niezbędny. Dodatkowym aspektem przemawiającym za opisem nieliniowym jest fakt, iż przy próbie uwzględnienia imperfekcji materiałowych wału (np. pęknięcia wirnika) lub eksploatacyjnych (np. rozosiowanie linii wałów) analizowany układ wyposażony zostaje w człony wzmacniające, tzw. nieliniowość strukturalną obiektu.

Do analizy w zakresie nieliniowym układów typu: linia wirników–łożyska–konstrukcja podpierająca opracowane zostały programy serii **NLDW** (**Nie**Liniowa **D**ynamika **W**irników) – rys. 3.1. Rozwiązują one nieliniowe równania ruchu całego układu (zw.(1.5) – rozdz.1) według algorytmu przedstawionego na rys. 1.2. Programy te łączą w sobie zalety wcześniej wymienionych programów łożyskowych, możliwości opisu dylatacji kinetostatycznych (cieplnych i eksploatacyjnych) podpór oraz zalety opisu MES linii wirników z imperfekcjami typu pęknięcia czy rozosiowania. Warto tu zaznaczyć, iż elementy pęknięte czy rozosiowane zostały w pełni zintegrowane z kinetostatycznym kształtem linii wałów i ich parametry są modyfikowane w każdym kroku czasowym procedury iteracyjnej. Jest to rozwiązanie oryginalne nie znane w pracach innych autorów. Takie podejście umożliwia wygenerowanie nieeliptycznych trajektorii i pełnych widm drgań, w których kształcie są zakodowane określone defekty i ich symptomy, w szczególności związane z przyjętymi imperfekcjami.

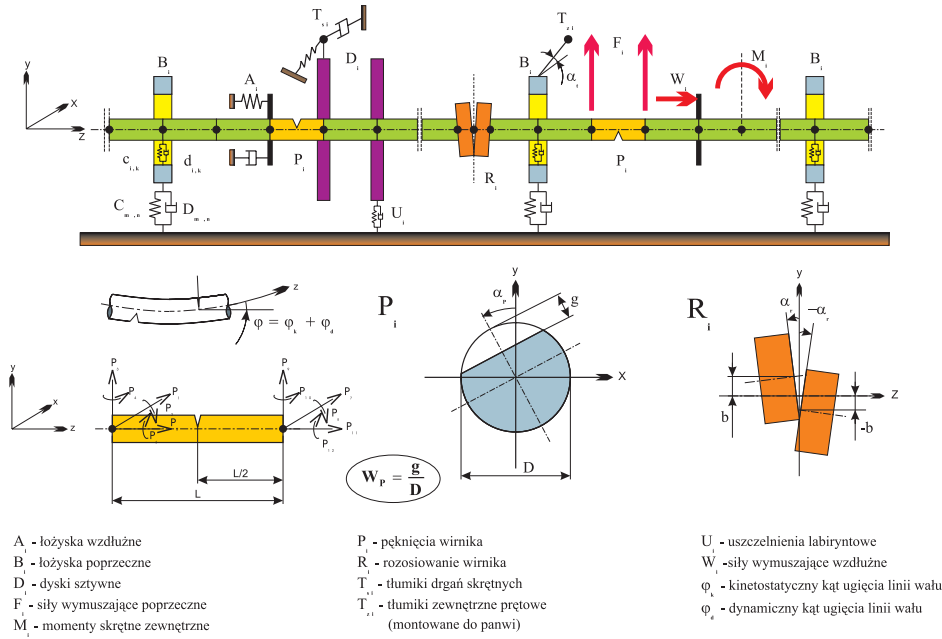
Wszystkie programy tworzące środowisko MESWIR zostały napisane w języku FORTRAN-90 i skompilowane oraz uruchomione pod systemem FORTRAN LAHEY-95. Opracowane też zostały nowoczesne pre-i postprocesory graficzne pracujące w środowisku WINTERACTER (komercyjna biblioteka graficzna systemu FORTRAN – LAHEY) oraz MATLAB. Część programów (np. NLDW) wyposażona została dodatkowo w pakiety do animacji uzyskanych rozwiązań. Szczegóły związane z opisem danych wejściowych i wynikowych, pakietów graficznych i animacyjnych do wszystkich programów tworzących środowisko MESWIR zawarte są w opracowaniach wewnętrznych Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku [3.7]÷[3.12].

Ponieważ programy serii NLDW zajmują szczególne miejsce w przyjętej w niniejszej monografii koncepcji badań, zostaną one dokładniej omówione w kolejnym podrozdziale.

3.1.1 Programy komputerowe serii NLDW – opis ogólny

Programy serii NLDW umożliwiają obliczenia dynamiki wirników w zakresie nieliniowym, co oznacza, iż w każdym kroku czasowym modyfikowane są wartości współczynników sztywności i tłumienia $c_{i,k}$, $d_{i,k}$ filmu olejowego łożysk ślizgowych oraz macierze sztywności linii wirników związane z imperfekcjami konstrukcyjnymi.

mi. Programy NLDW posiadają bowiem niezależne moduły do obliczeń łożysk ślizgowych, które są automatycznie uruchamiane. Powyższa procedura oznacza, iż członem nieliniowym w analizowanym układzie są łożyska ślizgowe, imperfekcje konstrukcyjne typu pęknięcia lub rozosiowania linii wałów raz uszczelnienia labiryntowe. Wartości współczynników sztywności i tłumienia podpór (fundament) $C_{m,n}$ i $D_{m,n}$ są stałe dla danej prędkości obrotowej ω .



Rys. 3.2. Możliwości obliczeniowe programów serii NLDW. Oznaczenia i układy współrzędnych

Rysunek 3.2 przedstawia szkic linii wirników i oznaczeń właściwych dla programów serii NLDW. Procedura postępowania numerycznego i algorytm obliczeń właściwy dla zagadnień nieliniowych przedstawione zostały w rozdziale 1 – rys. 1.2. W postępowaniu iteracyjnym w każdym kroku czasowym t_k globalne macierze tłumienia $\mathbb{D}$ i sztywności $\mathbb{K}$ układu (zw.(1.5) – rozdz.1) są modyfikowane o nowe wartości współczynników sztywności i tłumienia filmu olejowego i dodatkowe sztywności wynikające z imperfekcji konstrukcyjnych typu pęknięcia i rozosiowania. Oznacza to zależność funkcyjną macierzy $\mathbb{D}$ i $\mathbb{K}$ od parametrów $\mathbf{x}$ i $\dot{\mathbf{x}}$ w równaniach ruchu (zw.(1.5) – rozdział 1) i to zależność silnie nieliniową. **Równania ruchu tworzą więc układ dziesiątków lub setek (w zależności od ilości stopni swobody układu) równań różniczkowych zwyczajnych nieliniowych wzajemnie sprzężonych.** Rozwiązanie numeryczne uzyskane zostało w oparciu o metodę Newmarka, przy czym zaszła konieczność jej modyfikacji z uwagi na silnie nieliniowe własności łożysk ślizgowych.

Wyniki obliczeń stanowią trajektorie przemieszczeń wybranych węzłów układu. Korzystne jest, z uwagi na analizę widmową drgań, rejestrowanie przemieszczeń węzłów z ostatnich 12 obrotów wału czyli dla wartości $OKRES = 12 \cdot 360^\circ = 4320^\circ$. Umożliwia to dokładny zapis subharmonicznych typu $1/3X$ i wystarczającą rozdzielczość analizy FFT (np. dla $n = 3000$ obr/min $\Delta f = 4,17$ Hz). Przy takim założeniu obliczenia winny być kontynuowane do wartości $TALMAX = m \cdot OKRES$ przy czym m powinno być ≥ 3 , w zależności od analizowanych przypadków. Dla małych wirników (2- i 3-podporowych) wartość m można przyjąć jako równą 3, a wówczas $TALMAX = 12960^\circ$. Dla dużych wirników (np. turbozespołów dużej mocy) zaleca się stosowanie $m > 3$, np. 5 czyli $TALMAX = 21600^\circ$. W przypadkach szczególnie trudnych zaleca się stosować wyższe wartości m i analizować zbieżność procesu iteracyjnego (np. $m = 10$).

Jeżeli chcemy analizę widmową przeprowadzać z rozdzielczością np. 1 Hz, to dla $n = 3000$ obr/min otrzymamy: $OKRES = 50 \cdot 360^\circ = 18000^\circ$; przyjmując $m = 3$ $TALMAX = 3 \cdot 18000^\circ = 54000^\circ$. Oznacza to, iż w tym przypadku obliczenia trwają aż do czasu bezwymiarowego $\tau = \omega t$ odpowiadającego 150 obrotom wału, a przy średnim kroku czasowym $\Delta \tau = 2,5^\circ$ obliczenia łożysk i modyfikacje macierzy $\mathbb{D}$ i $\mathbb{K}$ są przeprowadzane 21600 razy!!! Przykład ten daje wyobrażenie o czasochłonności obliczeń numerycznych w zakresie nieliniowym dla przypadków bardziej złożonych.

Pęknięcia wału

Pojawienie się pęknięcia wywołuje dodatkową energię odkształcenia sprężystego, co matematycznie opisują odpowiednie zmodyfikowane macierze podatności – patrz rozdz.2 .1. Przyjęto dwupołożeniowy model zachowania się pęknięcia: pełne otwarcie lub pełne zamknięcie. Model taki jest powszechnie stosowany w literaturze. Nowością w przyjętym programie jest to, iż sterowanie procesem zamknięcia i otwarcia uzależnione jest zarówno od kształtu linii kinetostatycznej φ_k jak i chwilowego „dynamicznego” kształtu linii wirników φ_d spowodowanego oddziaływaniem sił zewnętrznych. Tak więc podczas wirowania wału czas otwarcia lub zamknięcia pęknięcia uzależniony jest od aktualnego kształtu linii wirników:

$$\varphi = \varphi_k + \varphi_d.$$

Ponadto, istnieje w przyjętym modelu i programie możliwość uwzględnienia fazowych opóźnień lub przyspieszeń położenia pęknięcia w stosunku do kolejnych pęknięć wzdłuż linii wirników i w stosunku do położenia fazowego wymuszeń zewnętrznych. Opisują to kąty $\pm \alpha_p$ liczone od osi pionowej y – rys. 3.2. Szczegóły zawarte są w rozdziale 2.1.

Elementy rozosiowane

Niewspółosiowe odcinki wału modelują przesunięcia elementu w kierunku osi x o wielkość a i w kierunku osi y o wielkość b oraz obrót o kąt $\pm \alpha_r$ w stosunku dla płaszczyzny pionowej – rys. 3.2. Korzystając ze sformułowania podatnościowego metody elementów skończonych można wyprowadzić zależności na dodatkowe momenty

gnące i skręcające występujące w układzie i zbudować odpowiednio zmodyfikowaną macierz podatności analizowanego elementu. Kolejnym krokiem jest budowa macierzy transformacji i sztywności elementu skończonego – patrz: rozdz. 2.1.

Powyższy model umożliwia modelowanie nie tylko „czystego” rozosiowania ale również stopnia nieprzylegania powierzchni np. sprzęgieł poprzez kąt $\pm \alpha_r$. Szczegóły zawarte są w rozdziale 2.1.

Poprzeczne łożyska ślizgowe

Programy serii NLDW posiadają wbudowane moduły do obliczeń współczynników sztywności $c_{i,k}$ i tłumienia $d_{i,k}$ filmu olejowego. Moduły łożyskowe są automatycznie uruchamiane dla każdego kroku czasowego t_k . W pierwszym kroku dla $t_k = 0$ program samoczynnie określa położenie czopa ε_0 i γ_0 dla zadanych obciążeń łożyska:

$$p_x = -q_x, \quad p_y = -q_y,$$

gdzie: q_x, q_y – reakcje kinetostatyczne podpór.

Wartościom ε_0 i γ_0 odpowiada więc stałe, kinetostatyczne obciążenie łożyska uwzględniane w dalszych obliczeniach dynamicznych.

Z uwagi na silnie nieliniowe własności łożysk ślizgowych, bezpośrednie wprowadzenie do równań ruchu współczynników $c_{i,k}, d_{i,k}$ często prowadzi do niestabilności rozwiązań numerycznych (proces iteracyjny nie zbiega się). Z tego też względu tradycyjna metoda całkowania równań ruchu Newmarka została odpowiednio zmodyfikowana. Wprowadzona tu została zasada relaksacji rozwiązań. Model MES łożysk przedstawiony został w rozdziale 2.1 natomiast model cieplny i numeryczny MRS w rozdziale 2.2.

Tłumiki zewnętrzne

W przyjętym modelu istnieje możliwość przyłożenia do układu zewnętrznych tłumików prętowych T_{zi} i tłumików bezстыkowych T_{si} . Tłumiki prętowe w formie masy usytuowanej na końcu podatnego pręta mogą być oczywiście mocowane tylko do nieruchomych panwi łożyskowych pod kątem α_t . Zmieniają one właściwości dynamiczne całego układu.

Tłumiki drgań skrętnych T_{si} przykładane mogą być do dowolnego węzła wału. Ich charakterystyki to: sztywność w [N·m/rd] i tłumienie w [N·m·s/rd] – rys. 3.2. Szczegóły zawarte są w rozdziale 2.1.

Łożyska wzdłużne

Istnienie łożysk wzdłużnych modelowane jest poprzez przyjęcie stałego jednego współczynnika sztywności w [N/m] i tłumienia w [N·s/m] w kierunku osi z . Wartości tych współczynników wyznaczone są za pomocą programu IZOWU – rys. 3.1.

Łożysko to może być usytuowane w dowolnym węźle wału. Szczegóły modelu MES zawarte są w rozdziale 2.1.

Wymuszenia zewnętrzne

Na układ oddziaływać mogą wymuszenia spowodowane niewyważeniem wirujących elementów oraz zewnętrzne wymuszenia periodyczne, dowolnie zmienne w czasie poprzeczne, wzdłużne i skrętne. Wymuszenia zewnętrzne mogą być synchroniczne lub asynchroniczne, co otwiera szerokie możliwości modelowania oddziaływań zewnętrznych. Szczegóły związane z matematycznym zapisem tych sił przedstawione są w rozdziale 2.1.

3.1.2 Możliwości obliczeniowe programów serii NLDW

Zbudowanie modelu układu wirnik-łożyska-podpory za pomocą elementów skończonych o 12 stopniach swobody i przyjęcie modelu pęknięć z uwzględnieniem wpływu aktualnego kształtu linii ugięć wirnika φ i położenia pęknięć $\pm\alpha_p$ a także modelu rozosiowań uwzględniającego również nieprzyleganie płaszczyzn $\pm\alpha_r$, stwarza unikalne możliwości analizy drgań układu w zakresie nieliniowym. Przede wszystkim możliwa staje się analiza **sprzężonych drgań giętno-wzdłużno-skrętnych** spowodowanych imperfekcjami typu pęknięcia czy rozosiowania lub wymuszeniami zewnętrznymi. Programy te umożliwiają:

- modelowanie linii wirników za pomocą MES z uwzględnieniem pęknięć i rozosiowania wybranych jego elementów oraz z uwzględnieniem elementów pełnych lub drażonych;
- modelowanie zmiennego w czasie tłumienia zewnętrznego poprzez przyłączenie do układu tłumików umocowanych na sztywno do panwi lub stykowo bądź bezstykowo do dowolnego odcinka obracającego się wału;
- modelowanie tłumienia wewnętrznego (materiałowego) za pomocą współczynników α i β proporcjonalnych do macierzy bezwładności i sztywności;
- przykładanie do układu dowolnie zmiennych w czasie (synchronicznych i asynchronicznych) wymuszeń zewnętrznych poprzecznych, wzdłużnych i skrętnych;
- obliczenia dla każdego kroku czasowego t , nowych wartości współczynników sztywności i tłumienia filmu olejowego poprzecznych łożysk ślizgowych o dowolnej geometrii szczeliny smarnej, co umożliwia śledzenie rozwoju tzw. niestabilności hydrodynamicznej łożysk ślizgowych;
- przyłożenie do układu dowolnej liczby łożysk wzdłużnych o zadanych współczynnikach sztywności i tłumienia;
- uwzględnienie sztywności i tłumienia konstrukcji podpierającej (fundamentu) w postaci macierzy współczynników sztywności i tłumienia uwzględniającej zarówno charakterystyki lokalne podpory jak i sprzężenia między nimi;
- wygenerowanie przemieszczeń poprzecznych, wzdłużnych i skrętnych dowolnych węzłów układu w funkcji czasu (kąta obrotu wału), co umożliwia budowę nieeliptycznych trajektorii drgań poprzecznych oraz niesinusoidalnych przebiegów drgań wzdłużnych i skrętnych.

Programy serii NLDW stanowią więc złożony system komputerowy, umożliwiający analizę wpływu wybranych imperfekcji konstrukcyjnych oraz analizę wymuszeń zewnętrznych i sprzężonych form drgań w zakresie nieliniowym. Odnoszą się one do wielopodporowych wirników ułożyskowanych ślizgowo.

3.1.3 Programy serii NLDW – wyszczególnienie

W zależności od potrzeb opracowany został cały pakiet programów serii NLDW. Różnią się one stopniem zaawansowania modelu (4 lub 6 stopni swobody w węźle co oznacza możliwość opisu tylko drgań poprzecznych lub sprzężonych drgań poprzeczno-wzdłużno-skrętnych) lub przystosowaniem do konkretnego zapisu obciążeń zewnętrznych (np.: NLDW-LEW-75). Zestawienie tych programów przedstawia poniższa tabela. Z punktu widzenia założonych celów niniejszej monografii i przyjętego obiektu badań, do dalszych konkretnych obliczeń wykorzystany został głównie program NLDW-LEW-75.

PROGRAM	OPIS
NLDW-60	Elementy o czterech stopniach swobody w węźle; bez pęknięć i rozosiowań.
NLDW-LEW-60	Elementy o czterech stopniach swobody w węźle; bez pęknięć i rozosiowań. Program umożliwia analizę łożysk ślizgowych z uwzględnieniem kieszeni lewarowych i „przekoszeń” panwi.
NLDW-65	Elementy o czterech stopniach swobody w węźle; bez pęknięć i rozosiowań. Program umożliwia wprowadzanie zewnętrznych obciążeń w formie dodatkowych (poza niewyważeniami) sił poprzecznych.
NLDW-70	Elementy o sześciu stopniach swobody w węźle; z uwzględnieniem pęknięć i rozosiowań.
NLDW-LEW-70	Elementy o sześciu stopniach swobody w węźle; z uwzględnieniem pęknięć i rozosiowań. Program umożliwia analizę łożysk ślizgowych z uwzględnieniem kieszeni lewarowych i „przekoszeń” panwi.

3.2 Możliwości modelowania defektów i budowy relacji diagnostycznych

Jak wynika z rozważań przeprowadzonych w podrozdziale 3.1 narzędzia badawcze w postaci środowiska MESWIR – rys. 3.1 – stwarzają unikalne możliwości modelowania różnego rodzaju defektów czy też stanów anormalnych w pracy maszyny wirnikowej a następnie pozyskiwania symptomów tych defektów. Tym samym staje się możliwe generowanie tak wartościowych z punktu widzenia diagnostyki relacji

NLDW-75	Elementy o sześciu stopniach swobody w węźle; z uwzględnieniem pęknięć i rozosiowań. Program umożliwia wprowadzanie zewnętrznych obciążeń w formie dodatkowych (poza niewyważeniami) sił poprzecznych, wzdłużnych oraz momentów skrętnych.
NLDW-LEW-75	Elementy o sześciu stopniach swobody w węźle; z uwzględnieniem pęknięć i rozosiowań. Program umożliwia wprowadzanie zewnętrznych obciążeń w formie dodatkowych (poza niewyważeniami) sił poprzecznych, wzdłużnych oraz momentów skrętnych. Program umożliwia dodatkowo analizę łożysk ślizgowych z uwzględnieniem kieszeni lewarowych i „przekoszeń” panwi.
NLDW-ANIZ-75	Elementy o sześciu stopniach swobody w węźle; z uwzględnieniem pęknięć i rozosiowań. Program umożliwia wprowadzanie zewnętrznych obciążeń w formie dodatkowych (poza niewyważeniami) sił poprzecznych, wzdłużnych oraz momentów skrętnych. Dodatkowo program umożliwia obliczenia z uwzględnieniem anizotropii przekrojów wybranych elementów wału.
NLDW-LEW-ANIZ-75	Elementy o sześciu stopniach swobody w węźle; z uwzględnieniem pęknięć i rozosiowań. Program umożliwia wprowadzanie zewnętrznych obciążeń w formie dodatkowych (poza niewyważeniami) sił poprzecznych, wzdłużnych oraz momentów skrętnych. Program umożliwia dodatkowo analizę łożysk ślizgowych z uwzględnieniem kieszeni lewarowych i „przekoszeń” panwi oraz obliczenia z uwzględnieniem anizotropii przekrojów wybranych elementów wału.
NLDW-80	Elementy o czterech stopniach swobody w węźle; bez pęknięć i rozosiowań; z uwzględnieniem sprzężeń między podporami.
NLDW-90	Elementy o sześciu stopniach swobody w węźle; z uwzględnieniem pęknięć i rozosiowań i sprzężeń między podporami.
NLDW-60-USZCZ NLDW-60-USZCZ-LOZ	Wersja NLDW-60 z uwzględnieniem uszczelnień labiryntowych. Istnieją dwie wersje tego programu: – opis uszczelnień w postaci współczynników sztywności i tłumienia (model liniowy), – model nieliniowy uszczelnień tzw. „łożyskowy”.

typu **defekt – symptom**. Relacje te stanowią podstawę dla przyjętej koncepcji „trenowania” układów adaptacyjnych i tym samym budowy zaawansowanych systemów diagnostycznych bazujących na sztucznej inteligencji.

Podsumowując w pewnym sensie rozważania dotyczące środowiska MESWIR spróbujemy zestawić najistotniejsze możliwości budowy relacji diagnostycznych, a więc związków typu defekt-symptom. Możliwości te przedstawimy określając ty-

powe uszkodzenia lub też inaczej tzw. klasy defektów a mianowicie:

I. Przemieszczenia termiczne, montażowe lub eksploatacyjne podpór łożyskowych

Z sytuacją przemieszczeń podpór łożyskowych w stosunku do linii geodezyjnej linii wirników wskutek ich dylatacji termicznych lub też zmian w trakcie eksploatacji z reguły mamy do czynienia w przypadku dużych, wielopodporowych maszyn wirnikowych takich jak np. turbozespoły energetyczne dużej mocy. Znajomość skutków takich przemieszczeń lub też informacja o dopuszczalnych lub granicznych przemieszczeniach poszczególnych podpór z uwagi na przyjęte kryteria (np. naciski w łożyskach lub amplitudy drgań czopów) stanowi kluczowy czynnik w procesie diagnozowania stanu przyjętego obiektu i tym samym niezmiernie cenną przesłanką w budowie baz wiedzy zaawansowanych systemów diagnostycznych. Połączenie programów serii KINWIR z programami serii NLDW stwarza taką możliwość. W efekcie możemy otrzymać obszary dopuszczalnych położań czopów łożyskowych (tzw. mapy akceptacji) dla wszystkich podpór i odpowiadające im widma drgań bezwzględnych panwi i względnych filmu olejowego.

II. Zmiany sztywności podpór łożyskowych

Macierze sztywności konstrukcji podpierającej w programach serii NLDW mogą być modyfikowane w sposób uwzględniający zmiany jej charakterystyk wskutek niewłaściwej eksploatacji lub awarii maszyny. Niektóre typowe defekty mogą bowiem wyrażać się pewnymi zmianami współczynników sztywności i tłumienia podpór (np. wskutek obłuzowania się śrub mocujących, lub spadku sztywności fundamentu spowodowanej zmianami własności gruntu).

III. Imperfekcje montażowe lub eksploatacyjne wałów typu pęknięcia lub rozosiowania

Narzędzia badawcze w postaci środowiska MESWIR stwarzają możliwości oceny wpływu nie tylko samego pęknięcia wału i jego lokalizacji wzdłuż linii wirników, ale również jego stopniowej propagacji w głąb materiału. Nieliniowy opis tego zjawiska umożliwia wygenerowania złożonych widm drgań lub widm kaskadowych. Analogiczne wyniki otrzymujemy w przypadku analizy wpływu rozosiowania poszczególnych elementów wirnika (np. sprzęgieł). Jak wiadomo, obecność w układzie pęknięć lub rozosiowań, może wywołać sprzężone formy drgań. Programy NLDW-70, NLDW-75 oraz NLDW-75-LEW stwarzają możliwości analizy drgań giętno-wzdłużno-skrętnych całego układu, co otwiera nowe możliwości w poszukiwaniu tzw. wyróżników diagnostycznych stanu obiektu i ocenie przydatności niektórych sposobów monitorowania maszyn wirnikowych.

IV. Zmiany charakteru i wielkości sił, momentów i tłumików zewnętrznych działających na układ

Programy serii NLDW umożliwiają przyłożenie do układu dowolnych sił i momentów zewnętrznych a następnie analizowanie wpływu zmiany ich przebiegów w czasie. Stwarza to doskonale warunki do oceny wpływu np.: zmian momentów skrętnych w generatorze lub oddziaływań aerodynamicznych w poszczególnych stopniach turbiny.

V. Nierównoległości osi panwi i czopów (tzw. „przekoszenie” panwi)

Jest to typowy defekt montażowy lub eksploatacyjny właściwy dla wszystkich maszyn wirnikowych łożyskowanych ślizgowo. Program łożyskowy IZO-SLEW skojarzony z programami serii KINWIR i NLDW (rys. 3.1) stwarza takie możliwości. Na bazie otrzymanych widm drgań lub też widm kaskadowych możemy wnioskować o wpływie wielkości i położenia „przekoszenia” na pracę całego układu. Możliwe też jest uzyskanie informacji na temat łącznego wpływu przekoszeń w kilku łożyskach jednocześnie.

VI. Niestabilność hydrodynamiczna węzłów łożyskowych

Opis nieliniowy drgań czopów łożyskowych zarówno przy małych jak i dużych ich wartościach stwarza niezwykle interesującą możliwość stopniowego prześledzenia fazy jakościowej transformacji obrazu drgań układu wywołanego zjawiskami hydrodynamicznymi. Chodzi tu o zjawisko małych a następnie dużych drgań olejowych występujące po przekroczeniu przez układ granicy stabilności. Drgania te określane są często w literaturze wirami olejowymi i biciem olejowym (*oil whirl and oil whip*). Charakterystycznym ich symptomem są subharmoniczne składowe w widmie drgań. Drgania olejowe są przyczyną wielu awarii i kłopotów eksploatacyjnych, stąd możliwość ich dokładnego prześledzenia może mieć niekiedy kluczowe znaczenie. Uwaga ta jest tym bardziej zasadna, że w wirnikach wielopodporowych często dochodzi do utraty stabilności w jednym z łożysk w postaci małych drgań olejowych i pomimo to cały układ zachowuje się stabilnie. Niebezpieczne stają się dopiero duże drganienia olejowe, czyli bicie olejowe lub też jednoczesne wystąpienie małych drgań w formie wirów olejowych w kilku łożyskach. Możliwość prześledzenia drgań olejowych (niestabilności hydrodynamicznej) i oceny, kiedy sytuacja jest naprawdę groźna, stwarzają wszystkie programy serii NLDW.

VII. Zmiany kształtu szczeliny smarnej i warunków smarowania łożysk

Programy do analizy pracy łożysk ślizgowych tworzące środowisko MESWIR umożliwiają ocenę wpływu nagłej zmiany ciśnienia zasilania lub ciśnienia lewarowego. Z kolei silne deformacje termiczne i sprężyste panwi mogą dość istotnie zmienić założony konstrukcyjny kształt szczeliny smarnej. Analizę tego rodzaju przypadków umożliwia program DIADEF. Programy łożyskowe w powiązaniu z programami do analizy zagadnień kinetostatyki i dynamiki – rys. 3.1 – umożliwiają budowę symptomów tych defektów i zestawienia

gotowych relacji w formie bardzo wygodnych tzw. kart diagnostycznych.

VIII. Przypadki kombinowane

Możliwa jest oczywiście kombinacja wymienionych wyżej klas defektów i ocena wpływu ich łącznego oddziaływania. Możemy w ten sposób otrzymać złożone relacje diagnostyczne. Metoda kombinowana jest bardzo użyteczna w badaniach czułości układu na określone defekty i w badaniach zmierzających do określenia stopnia jednoznaczności relacji diagnostycznych. Są to aktualnie najtrudniejsze zagadnienia diagnostyki według modelu, często powiązane z zagadnieniem poszukiwania modeli odwrotnych (zagadnieniem inwersji).

3.3 Weryfikacja eksperymentalna

W przypadku tak złożonych narzędzi badawczych w postaci środowiska MESWIR weryfikacja eksperymentalna jest szczególnie istotna.

Przedstawimy teraz fragment badań weryfikacyjnych opracowanych modeli i programów przeprowadzonych na przykładzie dwóch obiektów:

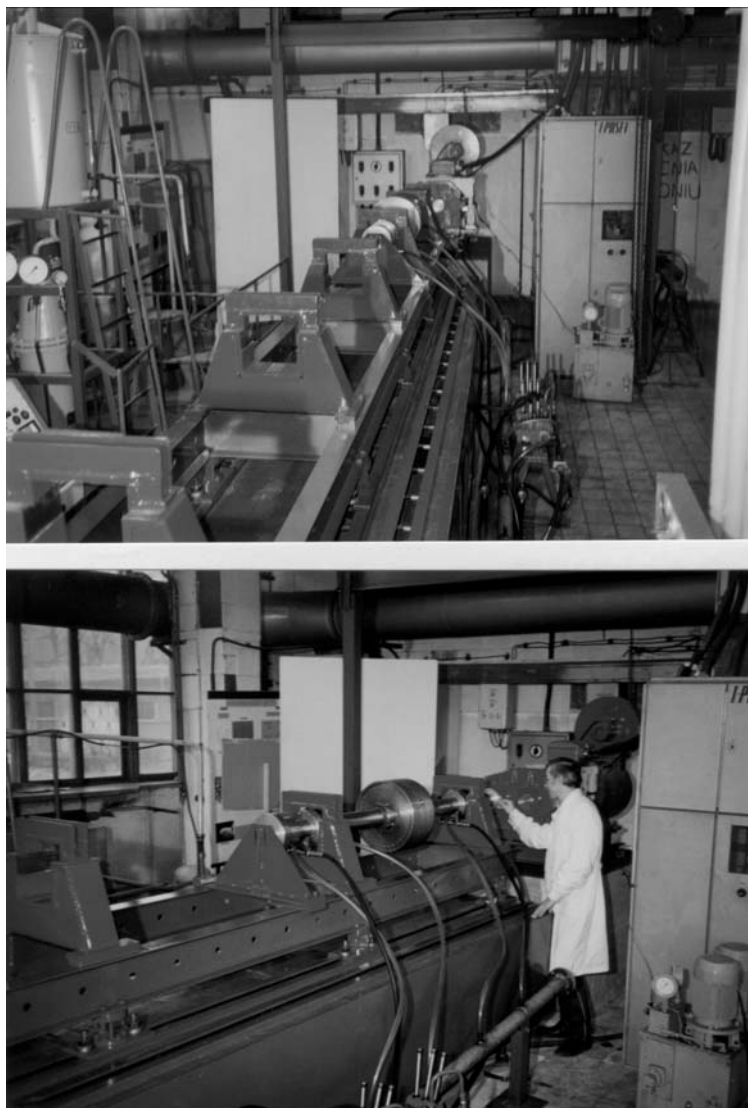
- wielkogabarytowego stanowiska laboratoryjnego,
- dużej maszyny energetycznej – turbozespołu o mocy 200 MW.

Powyższe obiekty stanowiły źródło danych eksperymentalnych niezbędnych dla przeprowadzenia stosownej weryfikacji.

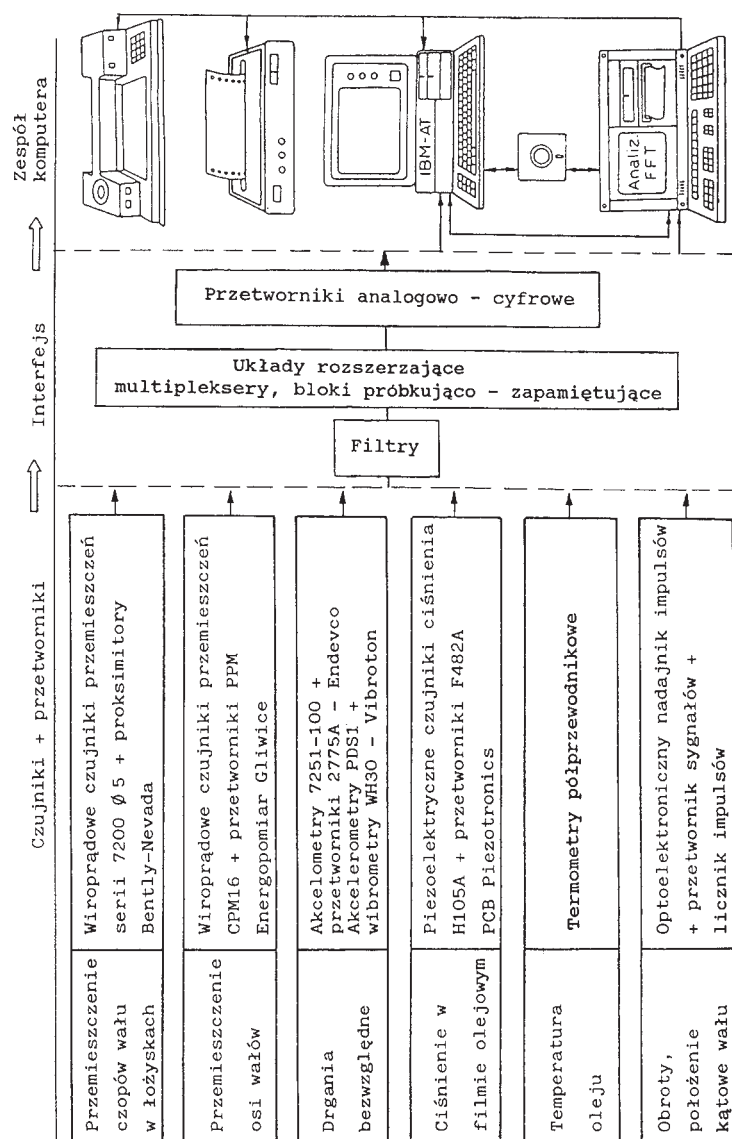
3.3.1 Obiekt laboratoryjny – wirnik dwupodporowy

Przyjęty do badań obiekt stanowi część linii wirników wielkogabarytowego stanowiska do badania dynamiki wirników będącego na wyposażeniu laboratorium wibrodiagnostyki Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku. Fotografię stanowiska przedstawia rys. 3.3, natomiast schematy konstrukcyjne i schematy układów pomiarowych stanowiska przedstawiają rys. 3.4 i rys. 3.5.

Zasadniczą część stanowiska stanowi modelowy wirnik, podparty w dwóch łożyskach ślizgowych i napędzany silnikiem elektrycznym. Łożyska osadzone są w stojakach łożyskowych posadowionych na ramie głównej. Rama oparta jest na ciężkim bloku betonowym pełniącym rolę gruntu i układu odniesienia dla mierzonych przemieszczeń bezwzględnych elementów stanowiska. Statyczne obciążenie łożysk wynika z ciężaru wirnika. Dynamiczne obciążenie łożysk realizowane jest poprzez montaż na wirniku ciężarków powodujących stan niewyważenia wirnika, jest zatem synchroniczne z obrotami.



Rys. 3.3. Fotografia przyjętego do badań obiektu – wirnika laboratoryjnego dwupodporowego



Rys. 3.5. Układy pomiarowe stanowiska badawczego [3.3, 3.5]

Podstawowe dane techniczne wirnika laboratoryjnego

- średnica wału $D = 0,1$ m;
- średnica tarczy $D = 0,4$ m, grubość $g = 0,2$ m (jedna tarcza o masie $m_t = 180$ kg usytuowana w przybliżeniu pośrodku podpór);
- dwa poprzeczne łożyska ślizgowe z luzem kołowo-cylindrycznym i szerokości względnej $L/D = 0,5$; przy czym wielkość luzu bezwzględnego promieniowego ΔR dla obu łożysk jest różna:

dla łożyska w podporze 1 – $\Delta R = 78,15 \mu\text{m}$,

dla łożyska w podporze 2 – $\Delta R = 90,35 \mu\text{m}$,

- ciśnienie zasilania $p_0 = 2,2$ at;
- temperatura oleju zasilającego $t_0 = 31^\circ\text{C}$; do badań zastosowano olej maszynowy Z-26 o następującej charakterystyce lepkość-temperatura:

dla $t_0 = 31^\circ$ $\mu_0 = 0,075$ [Pa·s],

dla $t_0 = 50^\circ$ $\mu_0 = 0,03$ [Pa·s];

- każde z łożysk posiada w płaszczyźnie poziomej dwie kieszenie smarne o rozpiętości 20° ;
- rozpiętość podpór wirnika 1 = 1,4 m;
- sztywność dynamiczna utwierdzeń zewnętrznych panwi

dla podpory 1. $\lambda_{11} = 90 \cdot 10^6$ N/m (poziom)

$\lambda_{22} = 330 \cdot 10^6$ N/m (pion),

dla podpory 2. $\lambda_{11} = 65 \cdot 10^6$ N/m (poziom)

$\lambda_{22} = 305 \cdot 10^6$ N/m (pion)

(są to podpory „sztywne”, dla których współczynniki tłumienia dynamicznego można przyjąć jako pomijalnie małe);

- tłumienie materiałowe wirnika (wg zaleceń firmy HKS producenta systemu ABAQUS dla pomierzonych częstości drgań własnych układu):

$$\alpha = 3,04, \quad \beta = 0,00003294;$$

- masa panwi łożyskowych $m_p = 15$ kg.

W laboratorium IMP PAN przeprowadzone zostały badania eksperymentalne odnoszące się do pomiarów drgań wymuszonych układu spowodowanych niewyważeniem wirującej tarczy. Z boków tarczy na promieniu $rnw = 0,18$ m wyfrezowane zostały dwa rowki, w których mocowane były odpowiednie masy niewyważenia mnw . W trakcie badań, za pomocą wiropędowych przetworników firmy Bently-Nevada w układzie poziomym i pionowym, mierzone były przemieszczenia (trajektorie) następujących charakterystycznych punktów układu:

- bezwzględne tarczy (środku wirnika),
- bezwzględne panwi (w podporze 1. i 2.),
- względne panwi i czopów łożysk w podp. 1. i 2. (drgania filmu olejowego).

Badania eksperymentalne przeprowadzone zostały w zakresie prędkości obrotowych wirnika do $n = 5000$ obr/min i dla mas niewyważenia $m_{nw} = 0,005$ kg do $m_{nw} = 0,02$ kg. Na układ działały zatem zawsze dwie niewyważki:

$$NW1 = m_{nw1} \cdot r_{nw1} \cdot \omega^2,$$

$$NW2 = m_{nw2} \cdot r_{nw2} \cdot \omega^2$$

przytwierdzone sztywno do bloków tarczy (co oznacza $m_{nw1} = m_{nw2}, r_{nw1} = r_{nw2}$ oraz brak kątów fazowych $FI1 = FI2 = 0$).

Do rejestracji wyników badań zastosowano skomputeryzowany system pomiarowy. Wszystkie mierzone wielkości były przetwarzane do postaci cyfrowej za pomocą programowanych przetworników analogowo-cyfrowych i utrwalane na dysku komputera. Przetworniki A/C mają wbudowane wkłady *sample and hold*, dzięki czemu próbki sygnałów z wszystkich kanałów zebrane w trakcie jednego cyklu próbkowania dotyczą tego samego momentu czasowego. Próbkowanie jest ponadto ściśle zsynchronizowane z kątowym położeniem wału dzięki temu, że rejestracja danych jest inicjowana impulsem z optoelektronicznego nadajnika impulsów związanego z określonym położeniem kątowym wału, a częstość próbkowania jest automatycznie dostosowywana do prędkości obrotowej wału.

Celem wyeliminowania zakłóceń pomiarowych spowodowanych niejednorodnością magnetyczną wału wirnika i tarczy (tzw. *runout*) opracowana została specjalna metoda komputerowej ich rejestracji a następnie „odsiewu” od sygnału mierzonego. Jak wielkie mogą to być zakłócenia przedstawia rys. 3.6 [3.5, 3.6].

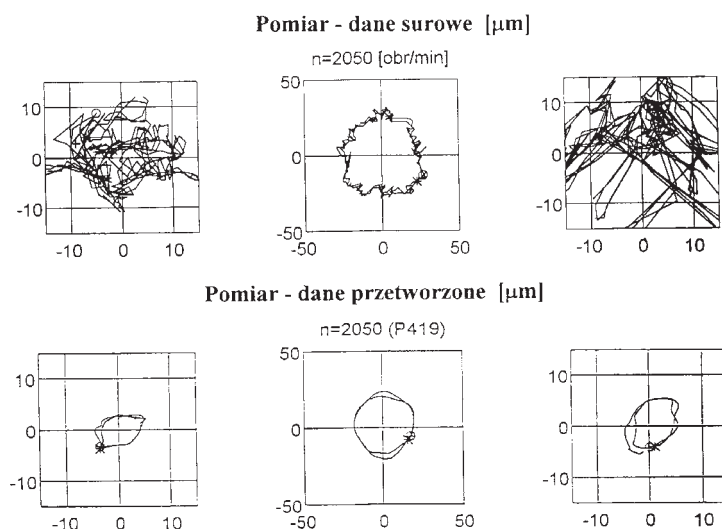
Stanowisko umożliwia badania eksperymentalne wzajemnych zależności pomiędzy zamodelowanymi defektami i symptomami. Zależności te tworzą wystarczająco „gęstą” sieć powiązań, co w poglądowy sposób przedstawia rys. 3.8.

Model obliczeniowy dwupodporowego wirnika laboratoryjnego, wraz z dyskretyzacją i numeracją poszczególnych jego elementów przedstawia rys. 3.7.

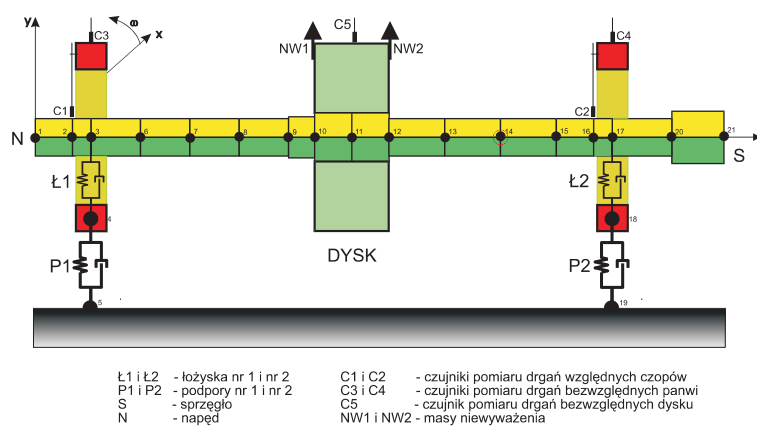
Wszystkie wyżej wymienione dane konstrukcyjne i eksploatacyjne stanowiska wprowadzone zostały do programów serii NLDW celem przeprowadzenia badań weryfikacyjnych.

Zakres badań

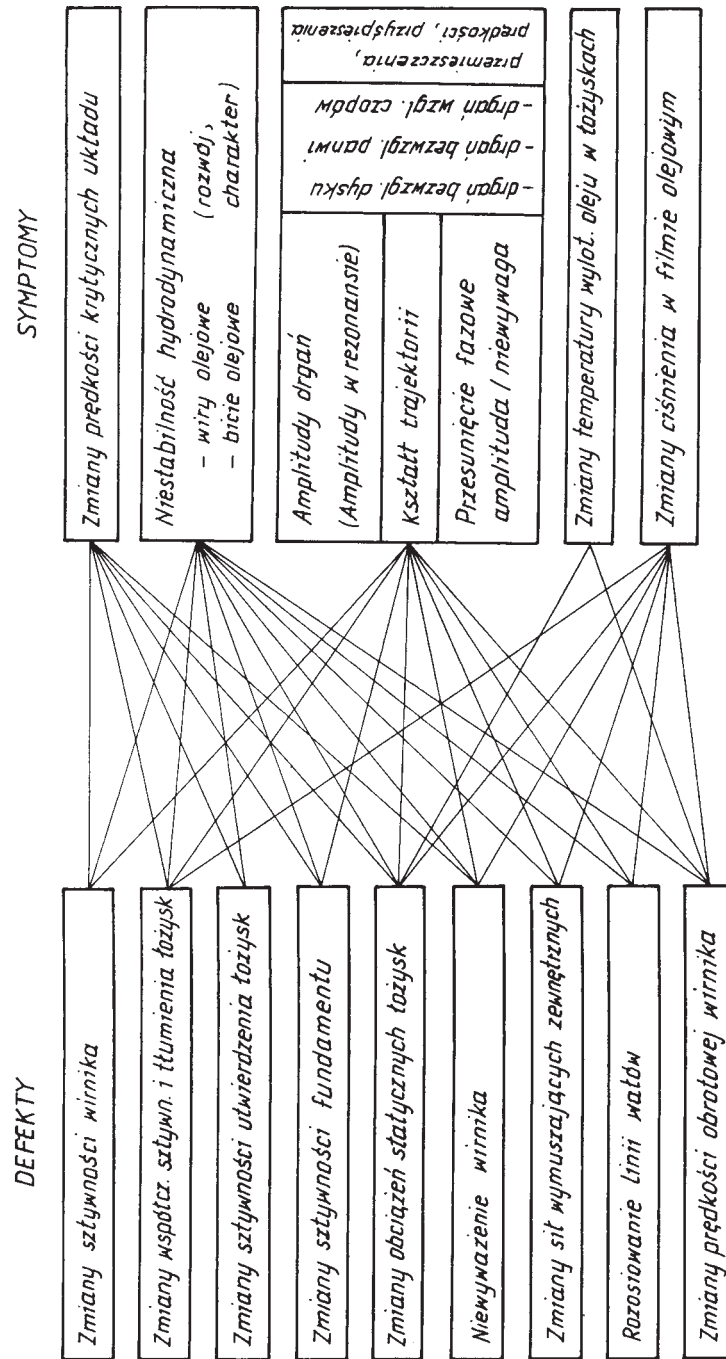
Obliczenia dynamiczne przeprowadzone zostały za pomocą programów serii NLDW oraz KINWIR (kinetostatyka). Przeprowadzone też zostały obliczenia za pomocą programu DYNWIR-W celem oceny zasadności opisu za pomocą modeli prostszych – rys. 3.1. Wyniki uzyskane za pomocą programu NLDW i DYNWIR-W w stabilnym zakresie pracy wirnika i przy małych jego drganiach powinny być bowiem podobne. Oczywiście po przekroczeniu granicy stabilności układu lub przy dużych drganiach wirnika wiarygodne wyniki możemy uzyskać jedynie w oparciu o program NLDW.



Rys. 3.6. Przykład wpływu różnego rodzaju zakłóceń, błędów pomiaru i „runout’u”.
 Rysunki górne – pomiar surowy; rysunki dolne – pomiar przetworzony po komputerowym „odsianiu” niejednorodności magnetycznych; rysunki lewe – drgania względne czopa łożyska nr 1; rysunki środkowe – drgania bezwzględne tarczy; rysunki prawe – drgania względne czopa łożyska nr 2 [3.3, 3.5]



Rys. 3.7. Model obliczeniowy wirnika laboratoryjnego dwupodporowego



Rys. 3.8. Możliwości badania związków typu defekt-symptom na stanowisku badawczym

Założono, że na układ działają dwie siły wymuszające spowodowane niewyważeniem tarczy o następujących wartościach iloczynu masy niewyważenia mnw i promienia rnw :

$$mnw \cdot rnw = 0,005 \text{ kg} \cdot 0,18 \text{ m} = 0,0009 \text{ kgm},$$

$$mnw \cdot rnw = 0,0125 \text{ kg} \cdot 0,18 \text{ m} = 0,00225 \text{ kgm},$$

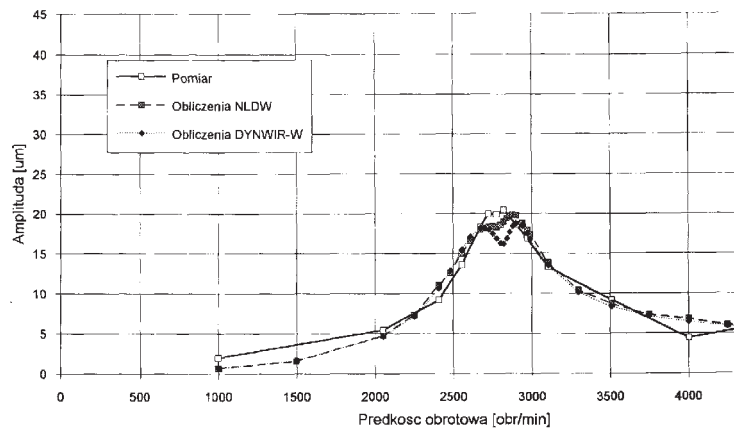
$$mnw \cdot rnw = 0,020 \text{ kg} \cdot 0,18 \text{ m} = 0,0036 \text{ kgm}.$$

Siły te $NW1 = NW2 = mnw \cdot rnw \cdot \omega^2$ działają zgodnie w fazie po obu stronach tarczy (a więc $FI1 = FI2 = 0$). Zarówno obliczenia jak i badania eksperymentalne przeprowadzono w zakresie prędkości obrotowych wirnika dla których zachowana została stabilność układu.

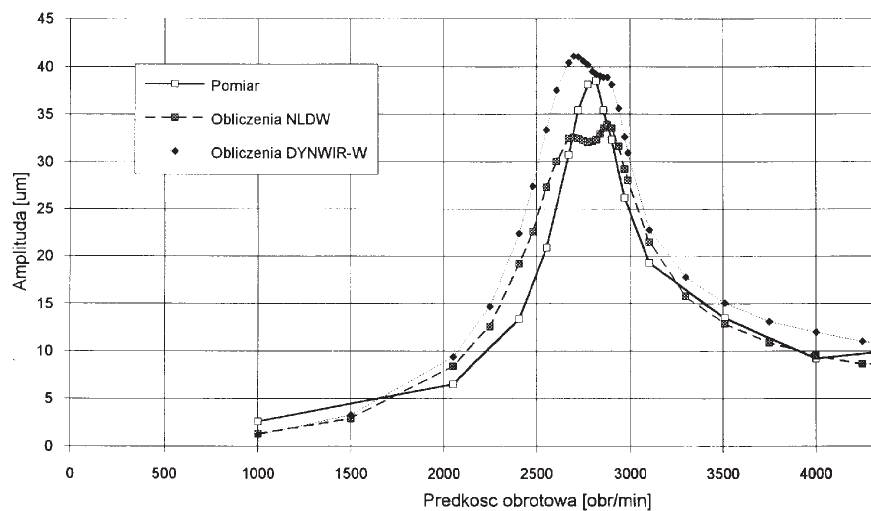
Wielkość sił wymuszających $NW1$, $NW2$ została dobrana w taki sposób, aby trajektorie względne czopów w łożyskach były dostatecznie małe w porównaniu do koła luzów. W ten sposób zachowany został wymóg adekwatności opisu liniowego.

Wyniki badań i wnioski

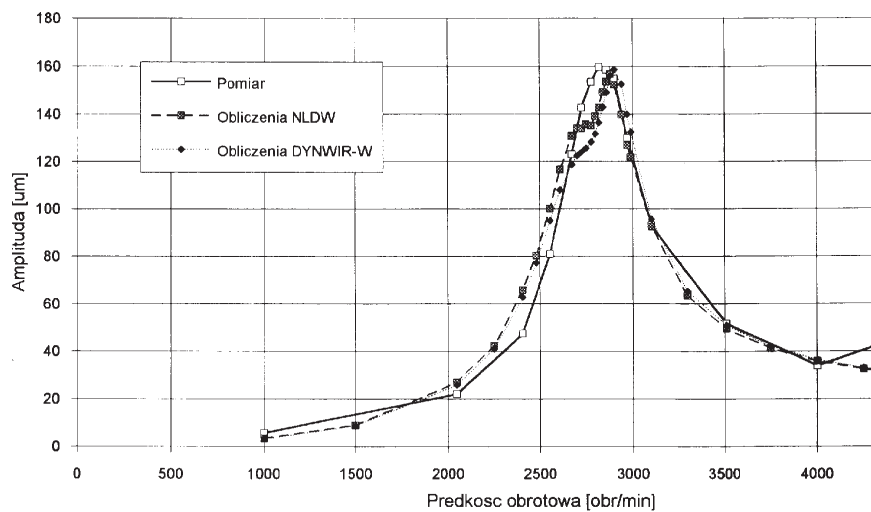
Przykładowe (tylko dla wartości iloczynu $mnw \cdot rnw = 0,00225 \text{ kgm}$) wyniki pomiarów eksperymentalnych drgań wymuszonych układu w zestawieniu z wynikami teoretycznymi uzyskanymi za pomocą programów DYNWIR – W i NLDW przedstawiają rys. 3.9 do 3.14. Zgodność wyników teoretycznych i eksperymentalnych można uznać za zupełnie wystarczającą. Podobne wnioski wyciągnąć można dla pozostałych (nie przedstawianych w monografii) wartości wymuszeń zewnętrznych (iloczynów $mnw \cdot rnw$).



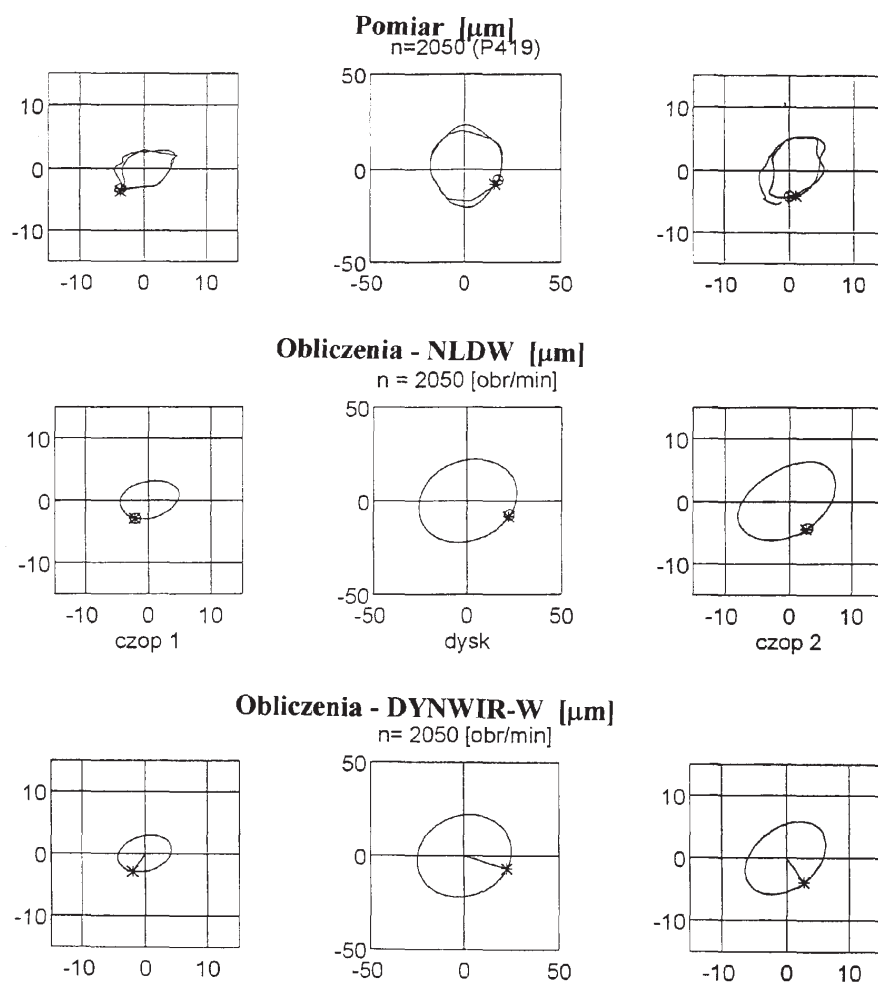
Rys. 3.9. Weryfikacja modelu obiektu. Przebieg amplitudy drgań względnych czopa w łożysku nr 1



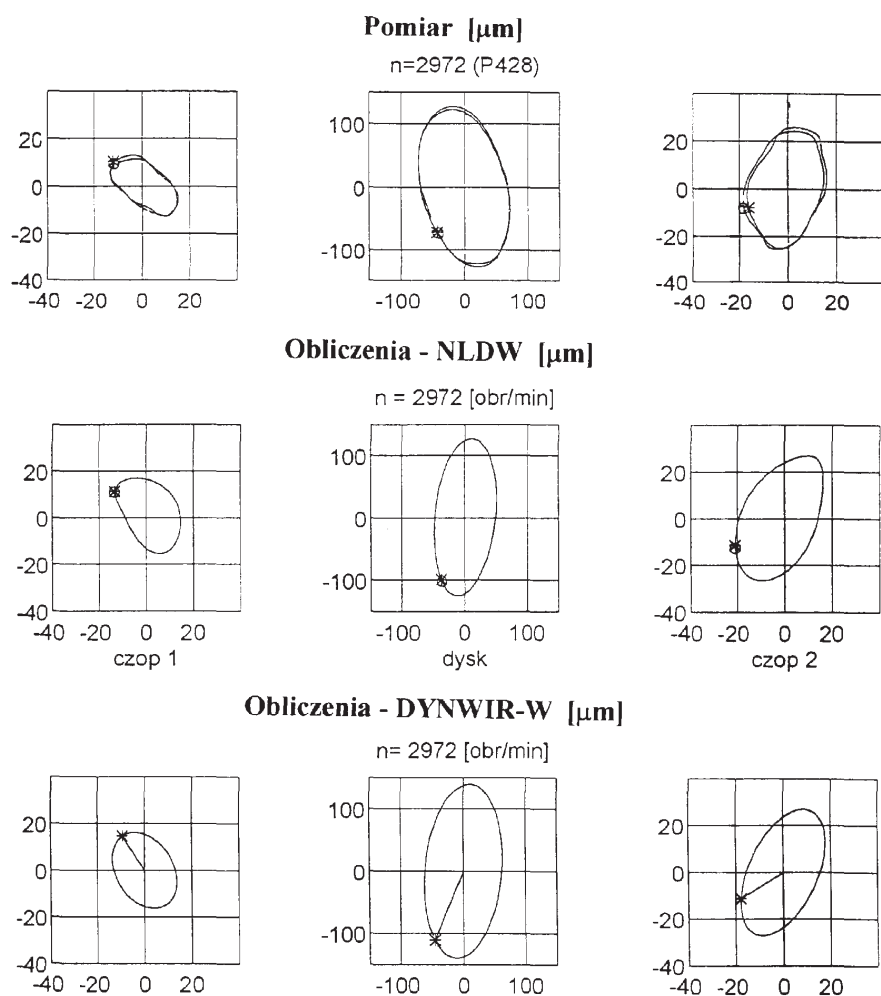
Rys. 3.10. Weryfikacja modelu obiektu. Przebieg amplitudy drgań względnych czopa w łożysku nr 2



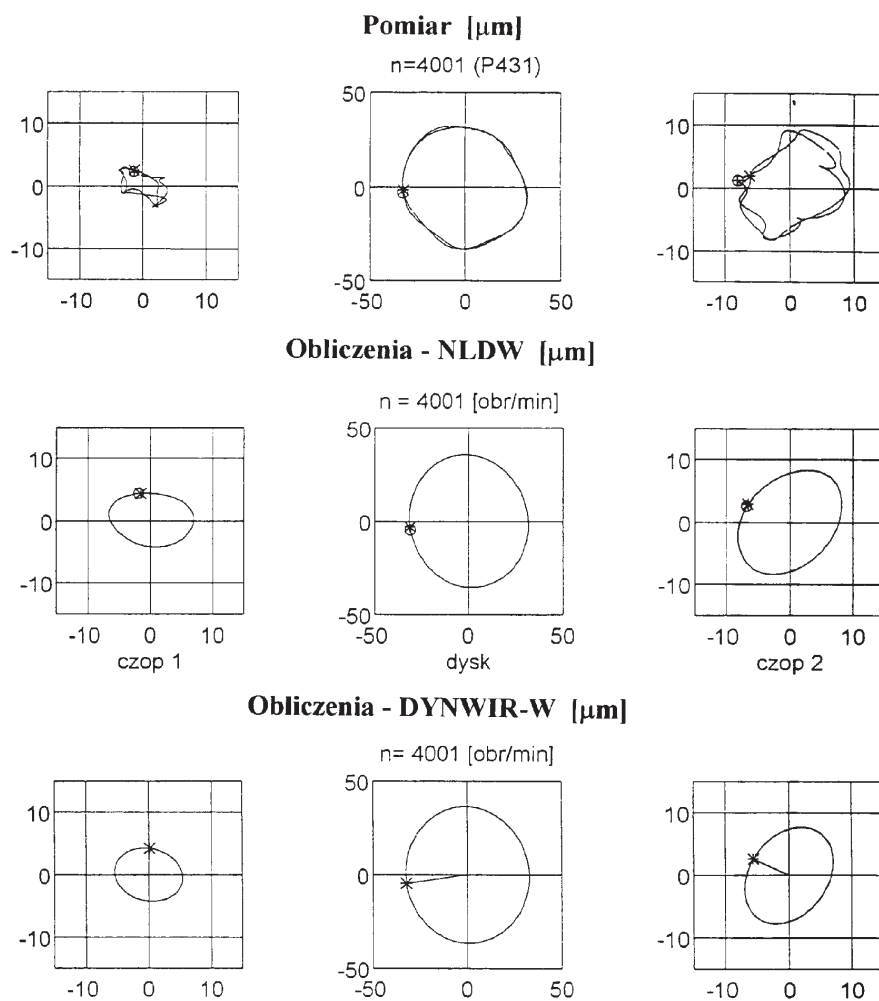
Rys. 3.11. Weryfikacja modelu obiektu. Przebieg amplitudy drgań bezwzględnych tarczy



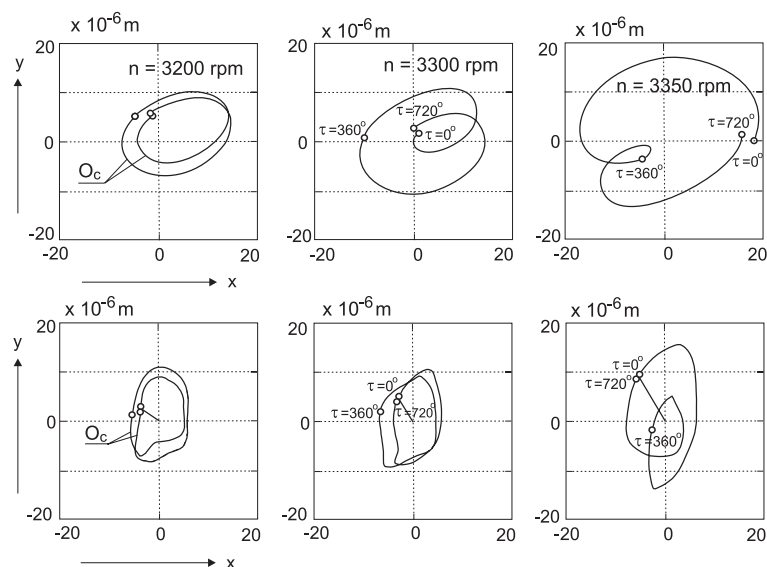
Rys. 3.12. Weryfikacja modelu obiektu. Trajektorie czopów w łożyskach (kolumna lewa – łożysko nr 1, kolumna prawa – łożysko nr 2) i tarczy (kolumna środkowa) dla prędkości obrotowej wirnika $n = 2050 \text{ obr/min}$. Prędkość przedrezonansowa



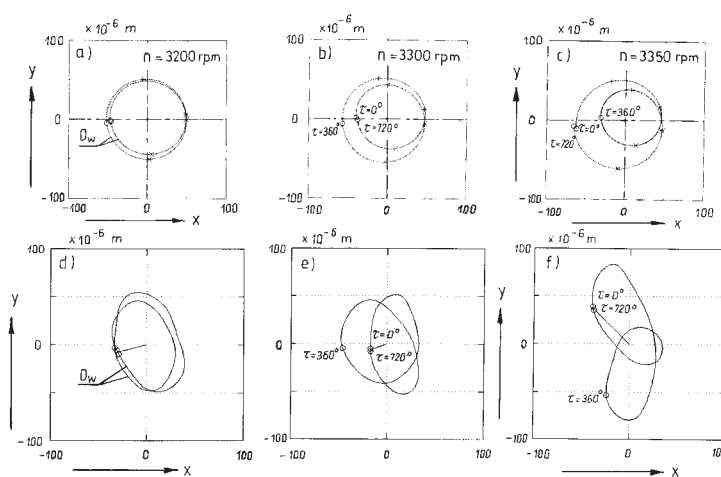
Rys. 3.13. Weryfikacja modelu obiektu. Trajektorie czopów w łożyskach (kolumna lewa – łożysko nr 1, kolumna prawa – łożysko nr 2) i tarczy (kolumna środkowa) dla prędkości obrotowej wirnika $n = 2972 \text{ obr /min}$. Prędkość przedrezonansowa



Rys. 3.14. Weryfikacja modelu obiektu. Trajektorie czopów w łożyskach (kolumna lewa – łożysko nr 1, kolumna prawa – łożysko nr 2) i tarczy (kolumna środkowa) dla prędkości obrotowej wirnika $n = 4001 \text{ obr/min}$. Prędkość przedrezonansowa



Rys. 3.15. Weryfikacja modelu i programu NLDW w zakresie występowania wirów olejowych – po przekroczeniu granicy stabilności układu. Drgania względne filmu olejowego. a, b, c – wyniki obliczeń; d, e, f – pomiary eksperymentalne



Rys. 3.16. Weryfikacja modelu i programu NLDW w zakresie występowania wirów olejowych – po przekroczeniu granicy stabilności układu. Drgania bezwzględne dysku. a, b, c – wyniki obliczeń; d, e, f – pomiary eksperymentalne

Występujące różnice pomiędzy wartościami pomierzonymi i obliczonymi spowodowane mogą być błędami kształtu luzu rzeczywistego łożyska a także niedoskonałością opracowanej metody komputerowego „odsiewania” błędów spowodowanych niejednorodnością materiałową. Przy tak małych przemieszczeniach względnych czopów i jednocześnie dużych zakłóceniach typu *runout* błędy te są nie do uniknięcia (patrz przykład na rys. 3.6) [3.3, 3.5, 3.6].

Warto zwrócić uwagę na fakt, iż wyniki uzyskane za pomocą programu DYNWIR-W (opis liniowy) i NLDW (opis nieliniowy) niewiele się różnią, co potwierdza wiarygodność programu NLDW, ponieważ w analizowanym zakresie prędkości obrotowych (do 4000 obr/min) i przy zadanych wymuszeniach zewnętrznych stanowisko badawcze pracowało w warunkach, dla których opis liniowy może być wystarczająco dokładny.

Celem weryfikacji programu NLDW również w zakresie pracy stanowiska dla którego liniowe zależności już nie obowiązują, przeprowadzone zostały badania eksperymentalne układu po przekroczeniu granicy jego stabilności. Celem obniżenia granicy stabilności poniżej 4000 obr/min (ze względów bezpieczeństwa), zmienione zostały utwardzenia zewnętrzne panwi na „miękkie”, w rezultacie czego wiry olejowe mogły występować już nieco powyżej 3000 obr/min. Badania dotyczyły więc możliwości opisu za pomocą programu NLDW rozwoju wirów olejowych, a więc rozwoju nieliniowych drgań samowzbudnych. Wyniki pomiarów eksperymentalnych i obliczeń teoretycznych przedstawiają rys. 3.15 i 3.16. Również i w tym przypadku zgodność wyników teoretycznych i eksperymentalnych uznać można za zadowalającą. Warto zwrócić tu uwagę na fakt, iż program NLDW dobrze „przewidział” położenie kątów fazowych dla $\tau = 0^\circ, 360^\circ$ i 720° , co jest szczególnie trudne z uwagi na złożoność zjawisk tu zachodzących.

3.3.2 Obiekty rzeczywiste – duże jednostki energetyczne

Weryfikacja narzędzi badawczych w postaci środowiska MESWIR na przykładzie dużego obiektu energetycznego stwarza jakościowo nowe problemy w stosunku do weryfikacji opartej na badaniach laboratoryjnych. Z uwagi na złożoność zjawisk zachodzących w tego rodzaju obiektach część niezbędnych do obliczeń danych jest niezwykle trudna do pozyskania a czasami wręcz niemożliwa do oszacowania. Dotyczy to dla przykładu możliwości oszacowania wartości sił tłumiących w układzie (zarówno materiałowych jak i oporów tłumienia wynikających z obrotów wirnika w parze wodnej), oddziaływań magnetycznych w generatorze czy też chwilowych przemieszczeń sprężystych i termicznych podpór i całego fundamentu. Ponadto, dane te silnie zależą od konkretnej jednostki pracującej w określonych warunkach. Nie można w zasadzie opracować danych właściwych dla całej klasy tego typu maszyn. W takiej sytuacji praktycznie nie ma możliwości bezpośredniej, inaczej mówiąc **ilościowej** weryfikacji opracowanych modeli i programów komputerowych. Pozostaje weryfikacja **jakościowa** polegająca na parametrycznym doborze nieznanymi parametrów wejściowych, ocenie wrażliwości przyjętego układu na te wielkości a następnie ocenie trendów zmian charakterystyk statycznych, a zwłaszcza dynamicznych obiektu. Praktycznie oznacza to postępowanie zwane potocznie

dostrojeniem modelu do przyjętego zestawu danych wejściowych i wynikowych (eksploatacyjnych). Badania weryfikacyjne przeprowadzone zostały na przykładzie kilku obiektów rzeczywistych tej samej klasy, a mianowicie turbozespołów energetycznych 13K215 o mocy 200 MW pracujących w krajowych elektrowniach – rys. 3.17 i rys. 3.18.

Dla obiektów tych udało się zebrać niezbędne do obliczeń dane konstrukcyjne i eksploatacyjne od krajowych producentów i dysponentów tych obiektów. Głównym źródłem informacji o stanie dynamicznym obiektów były wyniki pomiarów specjalistycznych ekip pomiarowych koncernu ABB-Zamech w Elblągu (obecnie ALSTOM Power Ltd), kadry inżynierskiej Elektrowni „Kozienice” i Elektrowni „Połaniec” oraz własnych pomiarów zespołów z Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku. Przede wszystkim jednak źródłem niezwykle cennych informacji był **system diagnostyczny** zainstalowany na bloku nr 7 w el. „Kozienice”. System DT-200 opracowany został w ramach Projektu Badawczego Zamawianego PBZ-038-06 wysiłkiem wielu zespołów badawczych z całego kraju [3.4]. Jego użyteczność wynika przede wszystkim z łatwego do niego dostępu autora niniejszej monografii oraz zespołów zaangażowanych w realizację ww. projektu.

Przedstawimy teraz bardziej szczegółowe dane dotyczące tej klasy jednostek (w formie swego rodzaju banku danych) oraz wybrane informacje dotyczące systemu DT-200 a także podamy przykłady weryfikacji narzędzi badawczych i zastosowania procedury strojenia modelu odnoszące się do całej klasy przyjętych obiektów. W następnej kolejności przeprowadzimy procedurę strojenia modelu i budowy przypadku referencyjnego (bazowego) w odniesieniu już do jednego, konkretnego obiektu. Będzie to jednostka 13K215 po gruntownej modernizacji i o ustabilizowanych parametrach eksploatacyjnych, stąd też decyzja o jej wyborze na obiekt wzorcowy (referencyjny).

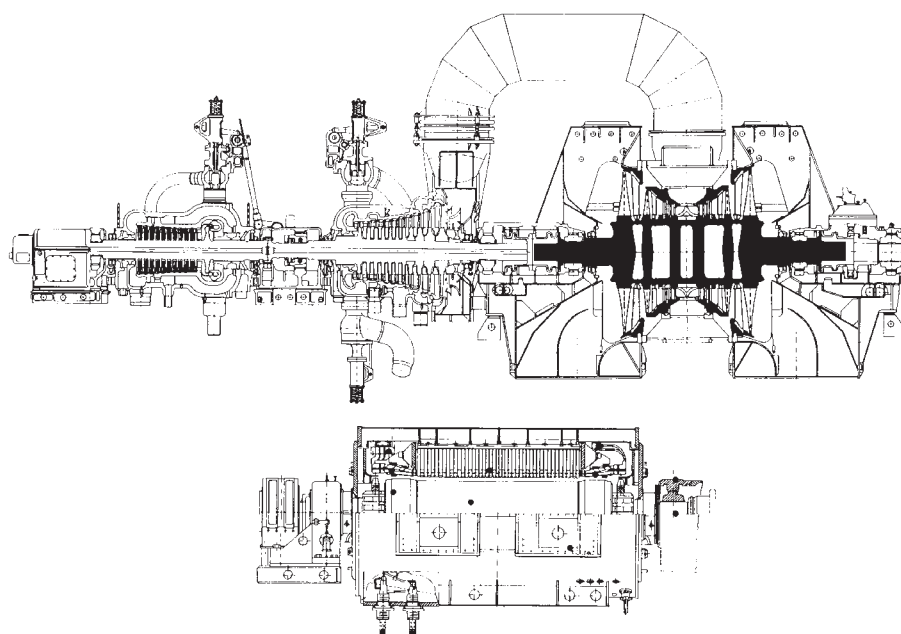
3.3.2.1 Bank danych geometrycznych i eksploatacyjnych dla klasy obiektów typu turbozespoły 13K215

„Bank danych” jest syntetycznym zbiorem danych charakterystycznych dla turbozespołów typu 13K215, podstawowych turbozespołów w polskiej energetyce. Zebrano w nim podstawowe zależności wymiarowe, własności mechaniczne i inne dane pomocne przy diagnostyce, przy remontach i przy obliczeniach dynamiki maszyn tego typu [13.13]. Są to informacje uzyskane zarówno od producenta (ABB-Zamech) jak i dysponentów tych obiektów. Stanowią one efekt zarówno studiów dokumentacji technicznej jak i bezpośrednich pomiarów na obiektach przeprowadzanych przez ekipy specjalistów z elektrowni, od producenta oraz własne zespoły pomiarowe (IMP PAN). Wymaga podkreślenia, że są to dane ogólne, dotyczące całej tej klasy turbozespołów. Poszczególne egzemplarze mogą się różnić w szczegółach, głównie pod względem wymiarowym. Dlatego też w konkretnych przypadkach należy skonfrontować je z aktualną dokumentacją techniczną.

Bank składa się z 18 kart zawierających dane w formie zestawień, tabel i wykresów. W tabelach ujęto wymiary tych elementów oraz ich masy i momenty bezwładności.



Rys. 3.17. Fotografia turbozespołu 13K215. Obiekty tej klasy przyjęte zostały do badań weryfikacyjnych opracowanych narzędzi badawczych



Rys. 3.18. Szkic konstrukcyjny turbozespołu 13K215 o mocy 200 MW

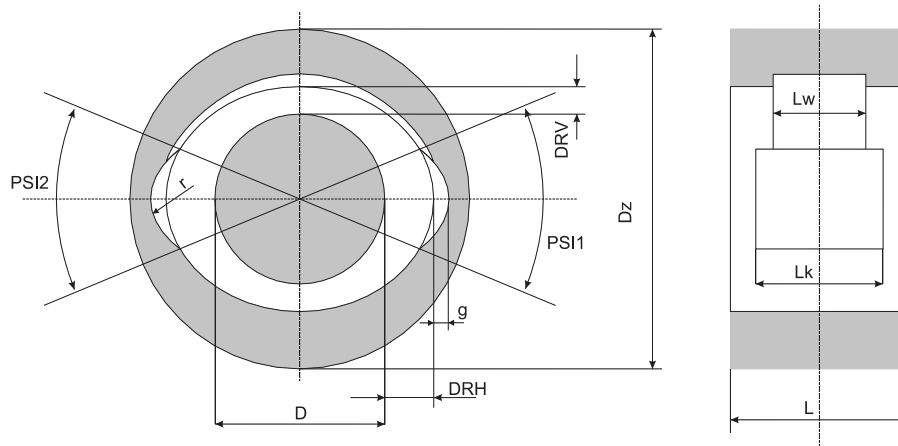
Na ich podstawie opracowany został model MES linii wirników czyli tzw. dyskretyzacja niezbędna do obliczeń numerycznych z wykorzystaniem środowiska MESWIR. Dyskretyzację tą przedstawia rys. 3.19.

Bank danych składa się z następujących kart:

- Karta nr 1: Parametry geometryczne łożyska nr 1;
- Karta nr 2: Parametry geometryczne łożyska nr 2;
- Karta nr 3: Parametry geometryczne łożyska nr 3;
- Karta nr 4: Parametry geometryczne łożyska nr 4;
- Karta nr 5: Parametry geometryczne łożyska nr 5;
- Karta nr 6: Parametry geometryczne łożyska nr 6;
- Karta nr 7: Parametry geometryczne łożyska nr 7;
- Karta nr 8: Zestawienie danych charakterystycznych łożysk turbozespołu 13K215;
- Karta nr 9: Charakterystyki dynamiczne podparć łożysk turbozespołu 13K215;
- Karta nr 10: Rozmieszczenie łożysk turbozespołu 13K215;
- Karta nr 11: Dopuszczalne obciążenia łożysk turbozespołu 13K215;
- Karta nr 12: Parametry turbinowego oleju łożyskowego TU-32;
- Karta nr 13: Linia kinetostatyczna wirnika turbiny 13K215 w stanie gorącym;
- Karta nr 14: Własności materiałowe najważniejszych elementów turbozespołu w zależności od temperatury;
- Karta nr 15: Naciągi między pokrywami a łożyskami i zaciski łożysk turbozespołu 13K215 (wartości przykładowe);
- Karta nr 16: Dane charakterystyczne różne;
- Karta nr 17: Linia wirników:
 - dyskretyzacja wirnika i jego elementów dla obliczeń metodą elementów skończonych,
 - tabele wymiarów, mas i momentów bezwładności „elementów skończonych” wirnika.

Karta nr 1**PARAMETRY GEOMETRYCZNE ŁOŻYSKA NR 1**

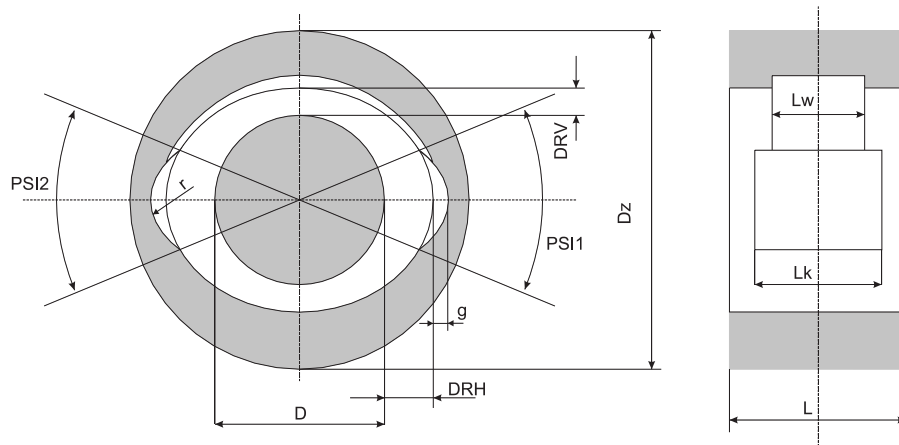
WIELKOŚĆ	OZNACZENIE	WARTOŚĆ	JEDNOSTKA
Średnica czopa nominalna	D	0,3000	[m]
Średnica zewnętrzna panwi	D_Z	0,6800	[m]
Szerokość panwi	L	0,2100	[m]
Luz konstrukcyjny promieniowy pionowy	DRV		
minimalny		0,150	[mm]
maksymalny		0,225	[mm]
Luz konstrukcyjny promieniowy poziomy	DRH		
minimalny		0,650	[mm]
maksymalny		0,720	[mm]
Luz promieniowy pionowy montażowy	DRV	0,173	[mm]
Luz promieniowy poziomy montażowy	DRH	0,643	[mm]
Masa łożyska	MP	419,00	[kg]
Liczba kieszeni smarnych	I_K	2	[-]
Szerokość wybrania w górnej półpanwi	L_w	0,0700	[m]
Promień wybrania kieszeni nr1	r_1	0,1000	[m]
Głębokość wybrania kieszeni nr 1	g_1	0,0040	[m]
Promień wybrania kieszeni nr2	r_2	0,1000	[m]
Głębokość wybrania kieszeni nr 2	g_2	0,0040	[m]
Szerokość kieszeni nr 1	L_{k1}	0,1600	[m]
Długość kątowa kieszeni nr 1	PSI 1	36,000	[°C]
Szerokość kieszeni nr 2	L_{k2}	0,1600	[m]
Długość kątowa kieszeni nr 2	PSI 2	36,000	[°C]
Temperatura czopa	T_c	85,0	[°C C]
Soczewkowatość	DEL=1-DRV/DRH	0,7309	[-]
Splaszczanie	CVH=DRV/DRH	0,2691	[-]



Karta nr 2

PARAMETRY GEOMETRYCZNE ŁOŻYSKA NR 2

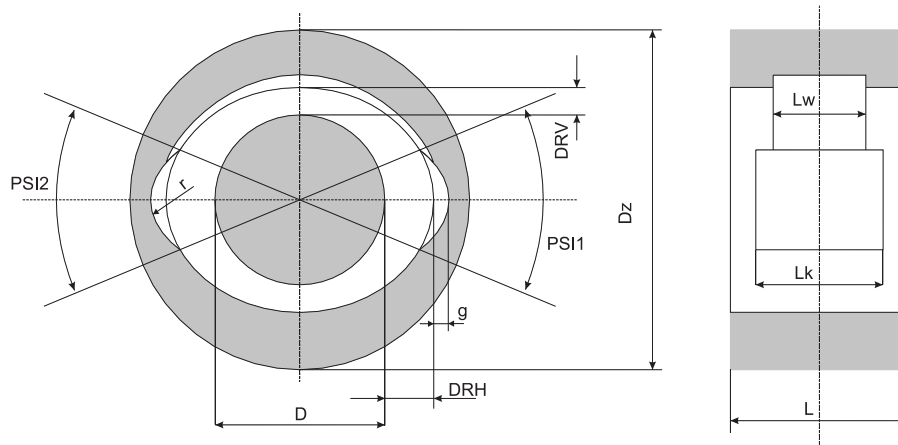
WIELKOŚĆ	OZNACZENIE	WARTOŚĆ	JEDNOSTKA
Średnica czopa nominalna	D	0,3300	[m]
Średnica zewnętrzna panwi	D_Z	0,8000	[m]
Szerokość panwi	L	0,2700	[m]
Luz konstrukcyjny promieniowy pionowy	DRV		
minimalny		0,150	[mm]
maksymalny		0,225	[mm]
Luz konstrukcyjny promieniowy poziomy	DRH		
minimalny		0,650	[mm]
maksymalny		0,720	[mm]
Luz promieniowy pionowy montażowy	DRV	0,195	[mm]
Luz promieniowy poziomy montażowy	DRH	0,650	[mm]
Masa łożyska	MP	1550,0	[kg]
Liczba kieszeni smarnych	I_K	2	[-]
Szerokość wybrania w górnej półpanwi	L_w	0,1200	[m]
Promień wybrania kieszeni nr1	r_1	0,1000	[m]
Głębokość wybrania kieszeni nr 1	g_1	0,0040	[m]
Promień wybrania kieszeni nr2	r_2	0,1000	[m]
Głębokość wybrania kieszeni nr 2	g_2	0,0040	[m]
Szerokość kieszeni nr 1	L_{k1}	0,2200	[m]
Długość kątowa kieszeni nr 1	PSI 1	30,000	[°C]
Szerokość kieszeni nr 2	L_{k2}	0,2200	[m]
Długość kątowa kieszeni nr 2	PSI 2	30,000	[°C]
Temperatura czopa	T_c	50,0	[°C C]
Soczewkowatość	$DEL=1-DRV/DRH$	0,7000	[-]
Splaszczanie	$CVH=DRV/DRH$	0,3000	[-]



Karta nr 3

PARAMETRY GEOMETRYCZNE ŁOŻYSKA NR 3

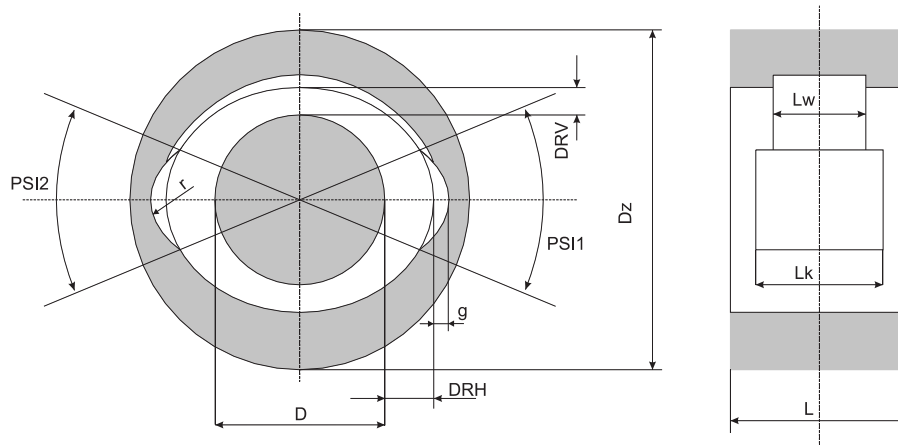
WIELKOŚĆ	OZNACZENIE	WARTOŚĆ	JEDNOSTKA
Średnica czopa nominalna	D	0,3600	[m]
Średnica zewnętrzna panwi	D_Z	0,7800	[m]
Szerokość panwi	L	0,2900	[m]
Luz konstrukcyjny promieniowy pionowy	DRV		
minimalny		0,175	[mm]
maksymalny		0,250	[mm]
Luz konstrukcyjny promieniowy poziomy	DRH		
minimalny		0,670	[mm]
maksymalny		0,750	[mm]
Luz promieniowy pionowy montażowy	DRV	0,198	[mm]
Luz promieniowy poziomy montażowy	DRH	0,745	[mm]
Masa łożyska	MP	558,00	[kg]
Liczba kieszeni smarnych	I_K	2	[-]
Szerokość wybrania w górnej półpanwi	L_w	0,1300	[m]
Promień wybrania kieszeni nr1	r_1	0,1250	[m]
Głębokość wybrania kieszeni nr 1	g_1	0,0040	[m]
Promień wybrania kieszeni nr2	r_2	0,1250	[m]
Głębokość wybrania kieszeni nr 2	g_2	0,0040	[m]
Szerokość kieszeni nr 1	L_{k1}	0,2000	[m]
Długość kątowna kieszeni nr 1	PSI 1	36,000	[°C]
Szerokość kieszeni nr 2	L_{k2}	0,2000	[m]
Długość kątowna kieszeni nr 2	PSI 2	36,000	[°C]
Temperatura czopa	T_c	50,0	[°C C]
Soczewkowatość	$DEL=1-DRV/DRH$	0,7342	[-]
Splaszczanie	$CVH=DRV/DRH$	0,2658	[-]



Karta nr 4

PARAMETRY GEOMETRYCZNE ŁOŻYSKA NR 4

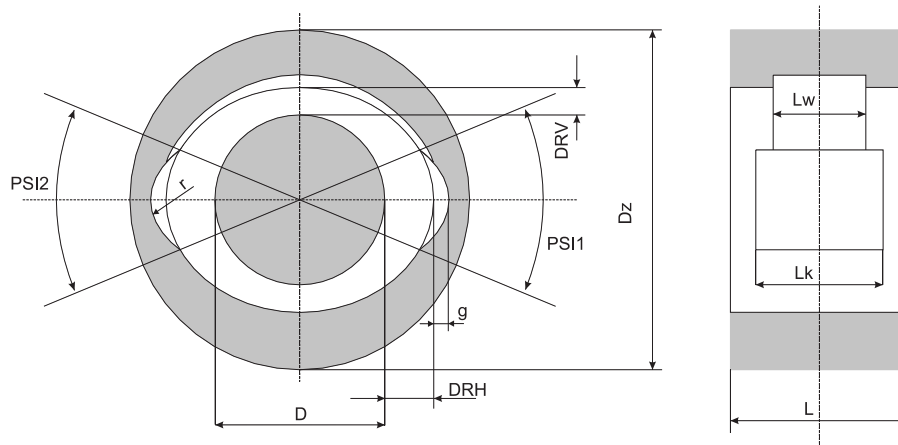
WIELKOŚĆ	OZNACZENIE	WARTOŚĆ	JEDNOSTKA
Średnica czopa nominalna	D	0,4500	[m]
Średnica zewnętrzna panwi	D_Z	0,7500	[m]
Szerokość panwi	L	0,3580	[m]
Luz konstrukcyjny promieniowy pionowy	DRV		
minimalny		0,450	[mm]
maksymalny		0,550	[mm]
Luz konstrukcyjny promieniowy poziomy	DRH		
minimalny		0,900	[mm]
maksymalny		0,990	[mm]
Luz promieniowy pionowy montażowy	DRV	0,538	[mm]
Luz promieniowy poziomy montażowy	DRH	0,88	[mm]
Masa łożyska	MP	767,00	[kg]
Liczba kieszeni smarnych	I_K	2	[-]
Szerokość wybrania w górnej półpanwi	L_w	0,1600	[m]
Promień wybrania kieszeni nr1	r_1	0,1250	[m]
Głębokość wybrania kieszeni nr 1	g_1	0,0040	[m]
Promień wybrania kieszeni nr2	r_2	0,1250	[m]
Głębokość wybrania kieszeni nr 2	g_2	0,0040	[m]
Szerokość kieszeni nr 1	L_{k1}	0,2980	[m]
Długość kątowa kieszeni nr 1	PSI 1	24,000	[°C]
Szerokość kieszeni nr 2	L_{k2}	0,2980	[m]
Długość kątowa kieszeni nr 2	PSI 2	24,000	[°C]
Temperatura czopa	T_c	50,0	[°C C]
Soczewkowatość	$DEL=1-DRV/DRH$	0,3886	[-]
Splaszczanie	$CVH=DRV/DRH$	0,6114	[-]



Karta nr 5

PARAMETRY GEOMETRYCZNE ŁOŻYSKA NR 5

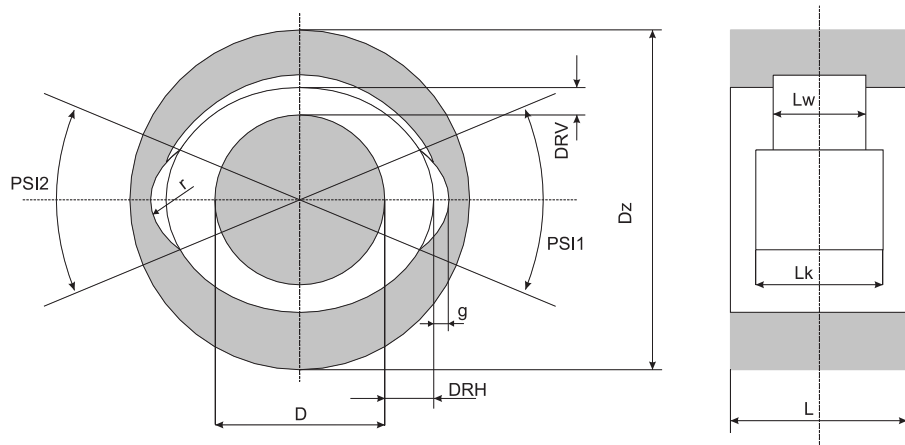
WIELKOŚĆ	OZNACZENIE	WARTOŚĆ	JEDNOSTKA
Średnica czopa nominalna	D	0,4500	[m]
Średnica zewnętrzna panwi	D_Z	0,7500	[m]
Szerokość panwi	L	0,3580	[m]
Luz konstrukcyjny promieniowy pionowy	DRV		
minimalny		0,450	[mm]
maksymalny		0,550	[mm]
Luz konstrukcyjny promieniowy poziomy	DRH		
minimalny		0,900	[mm]
maksymalny		0,990	[mm]
Luz promieniowy pionowy montażowy	DRV	0,540	[mm]
Luz promieniowy poziomy montażowy	DRH	0,885	[mm]
Masa łożyska	MP	767,00	[kg]
Liczba kieszeni smarnych	I_K	2	[-]
Szerokość wybrania w górnej półpanwi	L_w	0,1600	[m]
Promień wybrania kieszeni nr1	r_1	0,1250	[m]
Głębokość wybrania kieszeni nr 1	g_1	0,0040	[m]
Promień wybrania kieszeni nr2	r_2	0,1250	[m]
Głębokość wybrania kieszeni nr 2	g_2	0,0040	[m]
Szerokość kieszeni nr 1	L_{k1}	0,2980	[m]
Długość kątowa kieszeni nr 1	PSI 1	24,000	[°C]
Szerokość kieszeni nr 2	L_{k2}	0,2980	[m]
Długość kątowa kieszeni nr 2	PSI 2	24,000	[°C]
Temperatura czopa	T_c	50,0	[°C C]
Soczewkowatość	$DEL=1-DRV/DRH$	0,3898	[-]
Splaszczanie	$CVH=DRV/DRH$	0,6102	[-]



Karta nr 6

PARAMETRY GEOMETRYCZNE ŁOŻYSKA NR 6

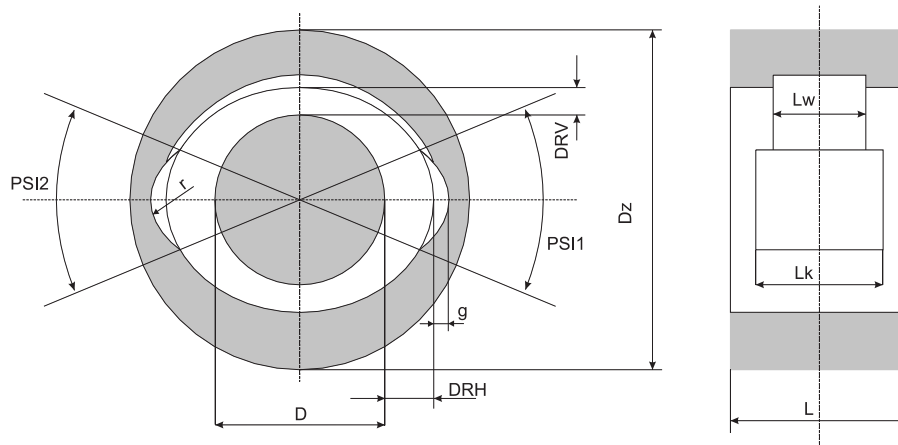
WIELKOŚĆ	OZNACZENIE	WARTOŚĆ	JEDNOSTKA
Średnica czopa nominalna	D	0,4000	[m]
Średnica zewnętrzna panwi	D_Z	0,7800	[m]
Szerokość panwi	L	0,5000	[m]
Luz konstrukcyjny promieniowy pionowy	DRV		
minimalny		0,400	[mm]
maksymalny		0,490	[mm]
Luz konstrukcyjny promieniowy poziomy	DRH		
minimalny		0,800	[mm]
maksymalny		0,880	[mm]
Luz promieniowy pionowy montażowy	DRV	0,485	[mm]
Luz promieniowy poziomy montażowy	DRH	0,885	[mm]
Masa łożyska	MP	955,00	[kg]
Liczba kieszeni smarnych	I_K	2	[-]
Szerokość wybrania w górnej półpanwi	L_w	0,3100	[m]
Promień wybrania kieszeni nr1	r_1	0,1250	[m]
Głębokość wybrania kieszeni nr 1	g_1	0,0040	[m]
Promień wybrania kieszeni nr2	r_2	0,1250	[m]
Głębokość wybrania kieszeni nr 2	g_2	0,0040	[m]
Szerokość kieszeni nr 1	L_{k1}	0,3500	[m]
Długość kątowa kieszeni nr 1	PSI 1	30,000	[°C]
Szerokość kieszeni nr 2	L_{k2}	0,3500	[m]
Długość kątowa kieszeni nr 2	PSI 2	30,000	[°C]
Temperatura czopa	T_c	50,0	[°C C]
Soczewkowatość	$DEL=1-DRV/DRH$	0,4520	[-]
Splaszczanie	$CVH=DRV/DRH$	0,5480	[-]



Karta nr 7

PARAMETRY GEOMETRYCZNE ŁOŻYSKA NR 7

WIELKOŚĆ	OZNACZENIE	WARTOŚĆ	JEDNOSTKA
Średnica czopa nominalna	D	0,4000	[m]
Średnica zewnętrzna panwi	D_Z	0,7800	[m]
Szerokość panwi	L	0,4000	[m]
Luz konstrukcyjny promieniowy pionowy	DRV		
minimalny		0,300	[mm]
maksymalny		0,340	[mm]
Luz konstrukcyjny promieniowy poziomy	DRH		
minimalny		0,300	[mm]
maksymalny		0,340	[mm]
Luz promieniowy pionowy montażowy	DRV	0,235	[mm]
Luz promieniowy poziomy montażowy	DRH	0,245	[mm]
Masa łożyska	MP	800,00	[kg]
Liczba kieszeni smarnych	I_K	2,0000	[-]
Szerokość wybrania w górnej półpanwi	L_w	0,2000	[m]
Promień wybrania kieszeni nr1	r_1	0,1500	[m]
Głębokość wybrania kieszeni nr 1	g_1	0,0030	[m]
Promień wybrania kieszeni nr2	r_2	0,1500	[m]
Głębokość wybrania kieszeni nr 2	g_2	0,0030	[m]
Szerokość kieszeni nr 1	L_{k1}	0,3000	[m]
Długość kątowa kieszeni nr 1	PSI 1	34,000	[°C]
Szerokość kieszeni nr 2	L_{k2}	0,3000	[m]
Długość kątowa kieszeni nr 2	PSI 2	34,000	[°C]
Temperatura czopa	T_c	50,0	[°C C]
Soczewkowatość	$DEL=1-DRV/DRH$	0,0408	[-]
Splaszczanie	$CVH=DRV/DRH$	0,9592	[-]



Karta nr 8 ZESTAWIENIE

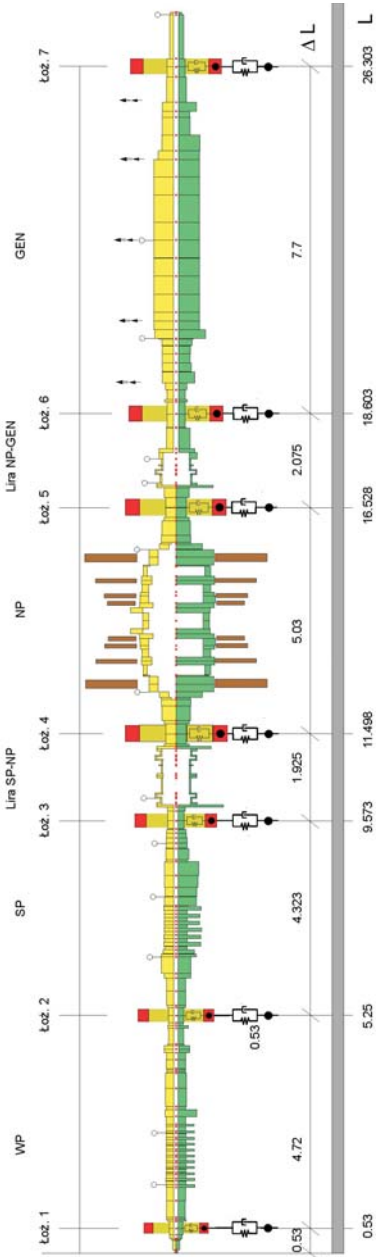
Wielkość	Oznaczenie	Łożysko nr 1	Łożysko nr 2	Łożysko nr 3	Łożysko nr 4	Łożysko nr 5	Łożysko nr 6	Łożysko nr 7	Uwagi
Nazwa łożyska		nośne	opor.-nośne	nośne	nośne "P"	nośne "T"	generatorowe	"Ł7"	
Średnica nominal.	D [mm]	300	330	360	450	450	400	400	
Średnica zewnętrz.	DZ [mm]	680	800	780	750	750	780	780	
Średnica panwi	LL [mm]	210	270	290	358	358	500	400	
Szerokość wybrania w górnej półpanwi	LW [mm]	70	120	130	160	160	310	200	
Ilość kieszeni	IK [-]	2	2	2	2	2	2	2	
Szerokość kieszeni	LK [mm]	160	220	200	298	298	350	300	
Długość kątowa kieszeni	PSI [stop]	36	30	36	24	24	30	34	
Luz średnicowy pionowy konstr.	DDV [mm]	0,30...0,45	0,30...0,45	0,35...0,50	0,90...1,10	0,90...1,10	0,80...0,98	0,60...0,68	
Luz promieniowy pionowy konstr.	DRH [mm]	0,65...0,72	0,65...0,72	0,67...0,75	0,90...0,99	0,90...0,99	0,80...0,88	0,30...0,34	
Luz średnicowy pionowy montażowy	DDV [mm]	0,345	0,390	0,395	1,075	1,080	0,970	0,470	
Luz promieniowy pionowy montażowy	DRV [mm]	0,173	0,195	0,198	0,538	0,540	0,485	0,235	
Luz promieniowy pionowy montażowy	DRH [mm]	0,643	0,650	0,745	0,880	0,885	0,885	0,245	
Soczewkowatość	CVH [-]	0,2691	0,3000	0,2658	0,6114	0,6102	0,5480	0,9592	wart. oblicz.
Spłaszczenie	DEL [-]	0,7309	0,700	0,7342	0,3886	0,3898	0,4520	0,0408	wart. oblicz.
Masa	MP [kg]	419	1550	558	767	767	955	800	

Karta nr 9 ZESTAWIENIE – CHARAKTERYSTYKI DYNAMICZNE PODPÓR ŁOŻYSKOWYCH

	Oznaczenie	Łożysko nr 1	Łożysko nr 2	Łożysko nr 3	Łożysko nr 4	Łożysko nr 5	Łożysko nr 6	Łożysko nr 7	Uwagi
Nazwa łożyska		nośne	opor.-nośne	nośne	nośne "P"	nośne "T"	generatorowe	"L7"	
Srednica nominalna	D [mm]	300	330	360	450	450	400	400	
Podatność główna H/H 50 Hz	GHH50 [m/N]	3,2e-10	2,1e-10	2,1e-10	3,301e-10	5,357e-10	3,299e-10	2,0e-10	
Podatność główna V/V 50 Hz	GVV50 [m/N]	5,8e-10	1,8e-10	3,2e-10	4,163e-10	7,109e-10	2,416e-10	2,0e-10	
Podatność główna H/H 100 Hz	GHH100 [m/N]	3,2e-10	2,1e-10	2,1e-10	3,597e-10	7,842e-10	5,831e-10	2,0e-10	
Podatność główna V/V 100 Hz	GVV100 [m/N]	5,8e-10	1,8e-10	3,2e-10	4,175e-10	5,436e-10	4,081e-10	2,0e-10	
Podatność skośna H/V 50 Hz	GHV50 [m/N]	-	-	-	2,387e-11	7,693e-11	1,492e-11	-	
Podatność skośna V/H 50 Hz	GVH50 [m/N]	-	-	-	9,267e-11	2,539e-12	1,986e-11	-	
Podatność skośna H/V 100 Hz	GHV100 [m/N]	-	-	-	3,245e-11	1,271e-10	7,180e-11	-	
Podatność skośna V/H 100 Hz	GVH100 [m/N]	-	-	-	1,352e-10	7,896e-11	7,654e-11	-	
Szttywność główna H/H 50 Hz	CHH50 [N/m]	3,1e9	4,7e9	4,7e9	3,030e9	1,867e9	3,031e9	5,0e9	
Szttywność główna V/V 50 Hz	CVV50 [N/m]	1,7e9	5,5e9	3,1e9	2,402e9	1,407e9	4,139e9	5,0e9	
Szttywność główna H/H 100 Hz	CHH100 [N/m]	3,1e9	4,7e9	4,7e9	2,780e9	1,275e9	1,715e9	5,0e9	
Szttywność główna V/V 100 Hz	CVV100 [N/m]	1,7e9	5,5e9	3,1e9	2,395e9	1,840e9	2,450e9	5,0e9	
Szttywność skośna H/V 50 Hz	CHV50 [N/m]	-	-	-	4,190e10	1,300e10	6,704e10	-	
Szttywność skośna V/H 50 Hz	CVH50 [N/m]	-	-	-	1,079e10	3,939e11	5,036e10	-	
Szttywność skośna H/V 100 Hz	CHV100 [N/m]	-	-	-	3,082e10	7,868e9	1,393e10	-	
Szttywność skośna V/H 100 Hz	CVH100 [N/m]	-	-	-	7,396e9	1,266e10	1,307e10	-	

KARTA NR 10

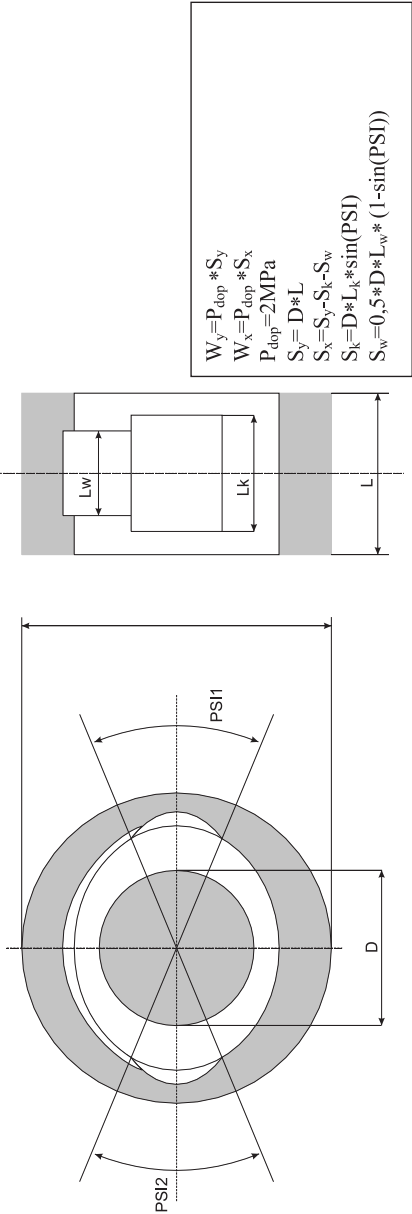
ROZMIESZCZENIE ŁOŻYSK TURBOZESPOŁU 13K215



ΔL [m] - odległość środków sąsiednich łożysk
L [m] - odległość poszczególnych łożysk od początku wirnika

Karta nr 11 DOPUSZCZALNE OBCIĄŻENIA ŁOŻYSK TURBOZESPOŁU 13K215

Wielkość	Oznaczenie	Łożysko nr 1	Łożysko nr 2	Łożysko nr 3	Łożysko nr 4	Łożysko nr 5	Łożysko nr 6	Łożysko nr 7	Uwagi
Średnica nominalna czopa	D [mm]	300	330	360	450	450	400	400	
Szerokość panwi	L [mm]	210	270	290	358	358	500	400	
Szerokość wybrania w górnej półpanwi	L _w [mm]	70	120	130	160	160	310	200	
Szerokość kieszeni	L _k [mm]	160	220	200	298	298	350	300	
Szerokość kątowa kieszeni	PSI/2 [°C]	18	15	18	12	12	15	17	
Powierzchnia nośna w rzucie poziomym	s _y [m ²]	0,0630	0,0891	0,1044	0,1611	0,1611	0,2000	0,1600	
Powierzchnia kieszeni w rzucie pionowym	s _k [m ²]	0,0148	0,0188	0,0222	0,0279	0,0279	0,0362	0,0351	
Powierzchnia wybrania w rzucie pionowym	s _w [m ²]	0,0073	0,0147	0,0162	0,0285	0,0285	0,0460	0,0283	
Powierzchnia nośna w rzucie pionowym	s _x [m ²]	0,0409	0,0555	0,0656	0,1042	0,1042	0,1178	0,0962	
Reakcja łożyskowa dopuszcz. pionowa	w _y [kN]	126	178	209	322	322	400	320	
Reakcja łożyskowa dopuszcz. pozioma	w _x [kN]	82	111	131	209	209	236	192	



$$W_y = P_{dop} \cdot S_y$$
$$W_x = P_{dop} \cdot S_x$$
$$P_{dop} = 2 \text{ MPa}$$
$$S_y = D \cdot L$$
$$S_x = S_y \cdot S_k \cdot S_w$$
$$S_k = D \cdot L_k \cdot \sin(\text{PSI})$$
$$S_w = 0,5 \cdot D \cdot L_w \cdot (1 - \sin(\text{PSI}))$$

Karta nr 12

PARAMETRY TURBINOWEGO OLEJU ŁOŻYSKOWEGO TU-32

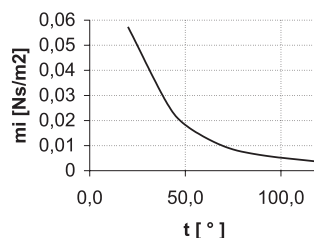
Charakterystyka lepkościowa

T	mi	ni
[°C]	[Pa·s]	[mm ² /s]
20,0	0,057352	87,8
40,0	0,027392	32,0
50,0	0,018233	21,3
70,0	0,009758	11,4
90,0	0,006163	7,2
120,0	0,003552	4,2

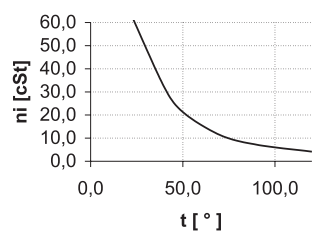
Współczynniki do aproksymacji
charakterystyki lepkościowej oleju
według formuły $mi=a/t+b$

TEMPERATURA		a	b
od	do		
20	40	1,1984	-0,002668
40	70	1,645803	-0,013753
70	120	1,042608	-0,005136

lepkość dynamiczna oleju TU
32 w funkcji temperatury



lepkość kinematyczna oleju TU
32 w funkcji temperatury



Wymagania według normy PN –84/ C96059 (wybrane wielkości)

Lepkość kinematyczna w temp. 20 °C : 76,9÷98,7 mm²/s (cSt)

Lepkość kinematyczna w temp. 37,8 °C : 31,7÷38,9 mm²/s (cSt)

Lepkość kinematyczna w temp. 40 °C : 28,8÷35,2 mm²/s (cSt)

Lepkość kinematyczna w temp. 50 °C : 19,4÷23,3 mm²/s (cSt)

Wskaźnik lepkości nie niższy niż 95

Gęstość w temp. 15 °C : 0,8712

Gęstość w temp. 20 °C : 0,8679

Temperatura płynięcia nie wyższa niż – 12 °C

Zawartość wody – nie więcej niż 0,03%

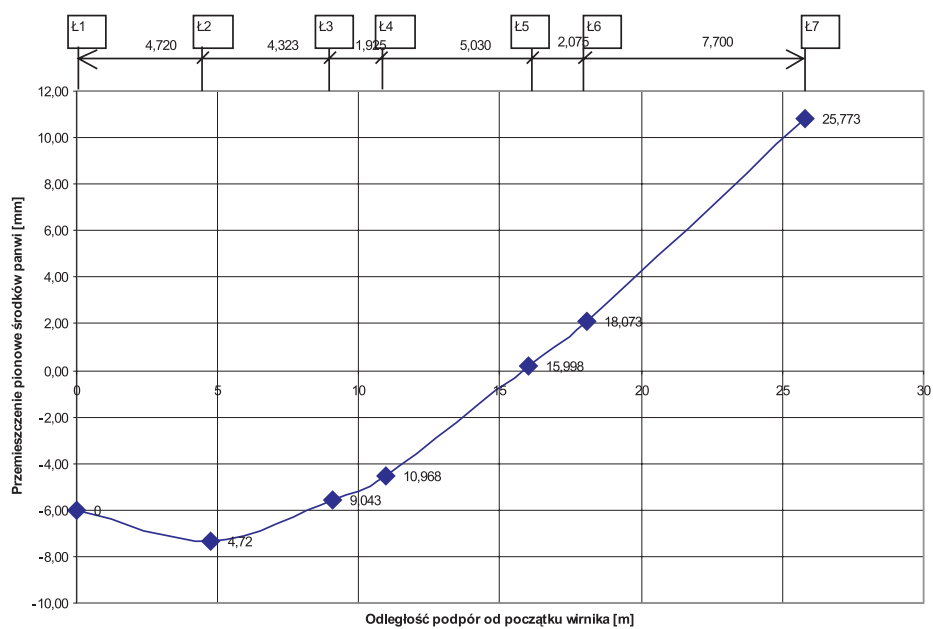
Czas rozwarstwienia się emulsji nie dłuższy niż 300 s

Zdolność wydzielania powietrza w temp 50 °C nie więcej niż 5 min.

Temperatura zapłonu nie niższa niż 210 °C .

Karta nr 13**LINIA KINETOSTATYCZNA WIRNIKA TURBINY 13K215 W STANIE GORĄCYM**

WIELKOŚĆ	JEDNOSTKA	Łoż. nr 1	Łoż. nr 2	Łoż. nr 3	Łoż. nr 4	Łoż. nr 5	Łoż. nr 6	Łoż. nr 7
Bezwzględne uniesienie	[mm]	-5,98	-7,37	-5,56	-4,57	0,19	2,1	10,8
Kąt pochyle- nia	[mm/m]	0,61	-0,14	-0,56	-0,83	-1,01	-0,85	-1,44
Obciążenie statyczne	[kN]	44	74	144	196	272	203	193



Uwaga: Jest to linia dla jednego z egzemplarzy turbin 13K215. Dla innych egzemplarzy może być inna. Należy ją traktować jako przykładową.

Karta nr 14

WŁASNOŚCI MATERIAŁOWE NAJWAŻNIEJSZYCH ELEMENTÓW TURBOZESPOŁU W ZALEŻNOŚCI OD TEMPERATURY

ELEMENT	MATERIAŁ	T [°C]	E [$\cdot 10^3$ MPa]
WIRNIK WP I SP	23 H2MFA	20	209
		100	205
		200	198
		300	190
		400	187
		500	167
		550	161
WAŁ NP	ST565S	20	211
		100	207
		200	200
		300	193
		350	189
		400	183
		450	177
WIRNIK GENERATORA	ST 568	20	211
		100	207
		200	200
		300	193
		350	189
		400	184
		450	180
SPRZĘGŁA LIRA I NASADZANE TULEJE	ST 575	20	211
		100	207

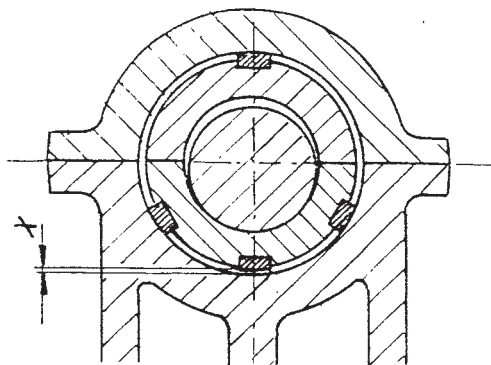
T [K] – temperatura

E [MPa] – moduł Younga

Karta nr 15**NACIĄGI MIĘDZY POKRYWAMI A ŁOŻYSKAMI I ZACISKI
ŁOŻYSK TURBOZESPOŁU 13K215**

(wartości przykładowe)

Wielkość	Oznaczn.	Łoż. 1	Łoż. 2	Łoż. 3	Łoż. 4	Łoż. 5	Łoż. 6	Łoż. 7
Nazwa łożyska		nośne	opor.- -nośne	nośne	nośne "P"	nośne "T"	genera- torowe	"Ł7"
Średnica nominal- na	D [mm]	300	330	360	450	450	400	400
Zacisk, konstruk- cyjny – wart. min.	Xkmin [mm]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Zacisk, konstruk- cyjny – wart. maks.	Xkmax [mm]	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Zacisk, wart. zale- cana min.	Xzmin [mm]	0,07	0,07	0,25	0,07	0,01	0,07	0,07
Zacisk, wart. zale- cana maks.	Xzmax [mm]	0,10	0,10	0,30	0,10	0,10	0,10	0,10
Naciąg, wart. teo- retyczna min.	Cmin [mm]	0,07	0,07	0,12	0,15	0,15	0,15	0,15
Naciąg, wart. teo- retyczna max.	Cmax [mm]	0,10	0,10	0,15	0,18	0,18	0,18	0,18
Przyleganie poduszek	P [%]	80	80	80	80	80	80	80



Karta nr 16**DANE CHARAKTERYSTYCZNE RÓŻNE**

**Częstotliwości drgań własnych poszczególnych odcinków linii wirników
turbozespołu 13K215**
(wg ABB Zamech)

WP: 1755 Hz

SP: 1883 Hz

NP: 3560 Hz

GEN: 1171 Hz, 3470 Hz
(1273 Hz, 3462 Hz wg ABB Dolmel)

Temperatury oleju smarującego łożyska główne:
(przyjmuje się dla wszystkich łożysk w przybliżeniu)

- temperatura oleju na wlocie do łożysk $t_{wl}=40^{\circ}\text{C}$
- temperatura oleju na wlocie do łożysk dopuszczalna $t_{wl}=45^{\circ}\text{C}$
- temperatura czopa $t_w=60^{\circ}\text{C}$

KARTA 17. LINIA WIRNIKÓW***Parametry geometryczne wirnika WP***

Oznaczenia

LP – numer kolejny odcinka wirnika

L – długość odcinka wirnika

DZM – zewnętrzna średnica dla odwzorowania masy

DWM – wewnętrzna średnica dla odwzorowania masy

DZS – zewnętrzna średnica dla odwzorowania sztywności

DWS – wewnętrzna średnica dla odwzorowania sztywności

LP	L	DZM	DWM	DZS	DWS
[–]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	0,06	0,07	0,025	0,07	0,025
2	0,215	0,16	0,025	0,16	0,025
3	0,117	0,3	0,1	0,3	0,1
4	0,138	0,3	0,1	0,3	0,1
5	0,162	0,3	0,1	0,3	0,1
6	0,455	0,411	0,1	0,41	0,1
7	0,294	0,42	0,1	0,42	0,1
8	0,061	0,822	0,1	0,436	0,1
9	0,086	0,435	0,1	0,435	0,1
10	0,054	0,823	0,1	0,441	0,1
11	0,085	0,435	0,1	0,435	0,1
12	0,046	0,809	0,1	0,437	0,1
13	0,084	0,435	0,1	0,435	0,1
14	0,046	0,81	0,1	0,437	0,1
15	0,084	0,435	0,1	0,435	0,1
16	0,046	0,811	0,1	0,437	0,1
17	0,084	0,435	0,1	0,435	0,1
18	0,046	0,809	0,1	0,437	0,1
19	0,084	0,435	0,1	0,435	0,1
20	0,046	0,805	0,1	0,437	0,1
21	0,083	0,435	0,1	0,435	0,1
22	0,048	0,803	0,1	0,438	0,1
23	0,082	0,436	0,1	0,436	0,1
24	0,048	0,801	0,1	0,438	0,1
25	0,092	0,433	0,1	0,433	0,1
26	0,048	0,798	0,1	0,438	0,1
27	0,102	0,431	0,1	0,431	0,1
28	0,048	0,796	0,1	0,438	0,1
29	0,171	0,43	0,1	0,43	0,1
30	0,15	0,918	0,1	0,489	0,1
31	0,4	0,46	0,1	0,46	0,1
32	0,41	0,46	0,1	0,46	0,1
33	0,25	0,414	0,1	0,414	0,1
34	0,205	0,414	0,1	0,414	0,1
35	0,16	0,6	0,12	0,52	0,12
36	0,14	0,33	0,1	0,33	0,1
37	0,24	0,33	0,1	0,33	0,1
38	0,28	0,33	0,1	0,33	0,1

Parametry geometryczne wirnika SP

Oznaczenia

LP – numer kolejny odcinka wirnika

L – długość odcinka wirnika

DZM – zewnętrzna średnica dla odwzorowania masy

DWM – wewnętrzna średnica dla odwzorowania masy

DZS – zewnętrzna średnica dla odwzorowania sztywności

DWS – wewnętrzna średnica dla odwzorowania sztywności

LP	L	DZM	DWM	DZS	DWS
[–]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
39	0,18	0,33	0,1	0,33	0,1
40	0,365	0,425	0,1	0,414	0,1
41	0,292	0,432	0,1	0,414	0,1
42	0,1	0,65	0,1	0,514	0,1
43	0,367	0,65	0,1	0,635	0,1
44	0,068	0,898	0,1	0,655	0,1
45	0,088	0,801	0,1	0,572	0,1
46	0,077	0,504	0,1	0,504	0,1
47	0,09	1,088	0,1	0,529	0,1
48	0,082	0,503	0,1	0,503	0,1
49	0,08	1,095	0,1	0,524	0,1
50	0,078	0,503	0,1	0,503	0,1
51	0,075	1,126	0,1	0,522	0,1
52	0,078	0,504	0,1	0,504	0,1
53	0,075	1,042	0,1	0,522	0,1
54	0,083	0,502	0,1	0,502	0,1
55	0,075	1,047	0,1	0,522	0,1
56	0,085	0,502	0,1	0,502	0,1
57	0,075	1,109	0,1	0,536	0,1
58	0,029	0,536	0,1	0,536	0,1
59	0,196	0,894	0,1	0,492	0,1
60	0,204	0,916	0,1	0,49	0,1
61	0,264	0,964	0,1	0,503	0,1
62	0,308	0,997	0,1	0,499	0,1
63	0,293	0,558	0,1	0,441	0,1
64	0,234	0,493	0,1	0,431	0,1
65	0,105	0,455	0,1	0,42	0,1
66	0,092	0,446	0,1	0,415	0,1
67	0,185	0,36	0,1	0,36	0,1

Parametry geometryczne wirnika NP

Oznaczenia

LP – numer kolejny odcinka wirnika

L – długość odcinka wirnika

DZM – zewnętrzna średnica dla odwzorowania masy

DWM – wewnętrzna średnica dla odwzorowania masy

DZS – zewnętrzna średnica dla odwzorowania sztywności

DWS – wewnętrzna średnica dla odwzorowania sztywności

LP	L	DZM	DWM	DZS	DWS
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
76	0,22	0,45	0	0,45	0
77	0,076	0,585	0	0,517	0
78	0,324	0,63	0	0,63	0
79	0,186	0,64	0	0,64	0
80	0,124	1,356	0	0,733	0,312
81	0,172	1,656	0	1,199	0,78
82	0,204	1,656	0	1,199	0,78
83	0,22	1,525	1,27	1,444	1,27
84	0,09	1,705	0	1,524	1,063
85	0,09	1,705	0	1,524	1,063
86	0,169	1,527	1,2	1,497	1,2
87	0,082	1,705	1,2	1,578	1,2
88	0,163	1,749	1,2	1,585	1,2
89	0,1	1,686	0	1,6	1,01
90	0,115	1,51	0	1,47	1
91	0,36	1,476	1,2	1,47	1,2
92	0,115	1,51	0	1,47	1
93	0,1	1,686	0	1,6	1,01
94	0,163	1,749	1,2	1,585	1,2
95	0,082	1,705	1,2	1,578	1,2
96	0,169	1,527	1,2	1,497	1,2
97	0,09	1,705	0	1,524	1,063
98	0,09	1,705	0	1,524	1,063
99	0,22	1,525	1,27	1,444	1,27
100	0,204	1,656	0	1,199	0,78
101	0,172	1,656	0	1,199	0,78
102	0,124	1,356	0	0,733	0,312
103	0,186	0,64	0	0,64	0
104	0,324	0,63	0	0,63	0
105	0,076	0,585	0	0,517	0
106	0,22	0,45	0	0,45	0

Parametry geometryczne wirnika generatora

Oznaczenia

LP – numer kolejny odcinka wirnika

L – długość odcinka wirnika

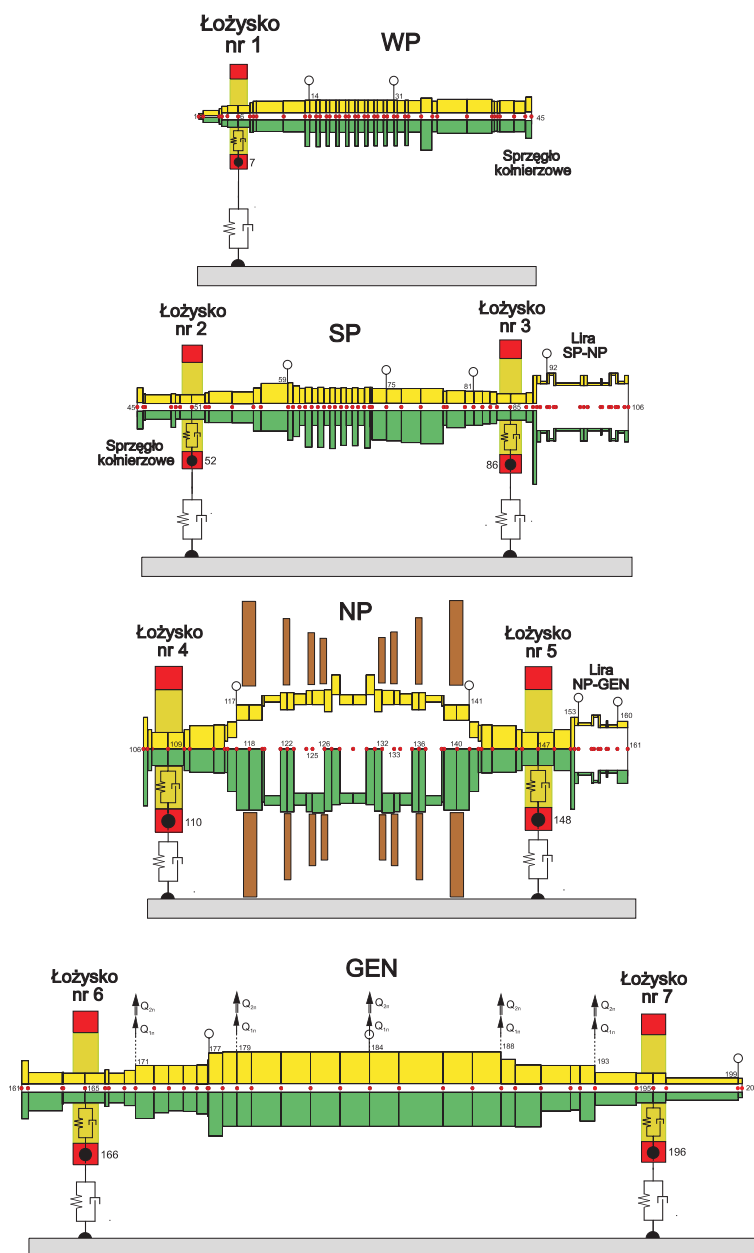
DZM – zewnętrzna średnica dla odwzorowania masy

DWM – wewnętrzna średnica dla odwzorowania masy

DZS – zewnętrzna średnica dla odwzorowania sztywności

DWS – wewnętrzna średnica dla odwzorowania sztywności

LP	L	DZM	DWM	DZS	DWS
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
115	0,27	0,4	0	0,4	0
116	0,265	0,4	0	0,4	0
117	0,15	0,475	0	0,475	0
118	0,188	0,583	0	0,601	0
119	0,295	0,592	0	0,611	0
120	0,153	0,605	0	0,626	0
121	0,154	0,605	0	0,626	0
122	0,2	0,697	0	0,697	0
123	0,81	0,686	0	0,965	0
124	0,69	0,686	0	0,965	0
125	0,675	0,746	0	0,974	0
126	0,675	0,746	0	0,974	0
127	0,69	0,686	0	0,965	0
128	0,81	0,686	0	0,965	0
129	0,2	0,697	0	0,697	0
130	0,154	0,605	0	0,626	0
131	0,153	0,605	0	0,626	0
132	0,261	0,592	0,12	0,611	0,12
133	0,222	0,583	0	0,601	0,12
134	0,15	0,475	0	0,475	0,12
135	0,265	0,4	0	0,4	0,12
136	0,27	0,4	0	0,4	0,12
137	0,245	0,4	0	0,4	0,12
138	0,16	0,41	0	0,41	0,12
139	0,105	0,32	0	0,32	0,12
140	0,088	0,29	0	0,32	0,12
141	0,087	0,29	0	0,32	0,12
142	0,27	0,285	0	0,26	0,12
143	0,089	0,28	0,12	0,28	0,12
144	0,089	0,28	0,12	0,28	0,12
145	0,078	0,274	0,17	0,21	0,17



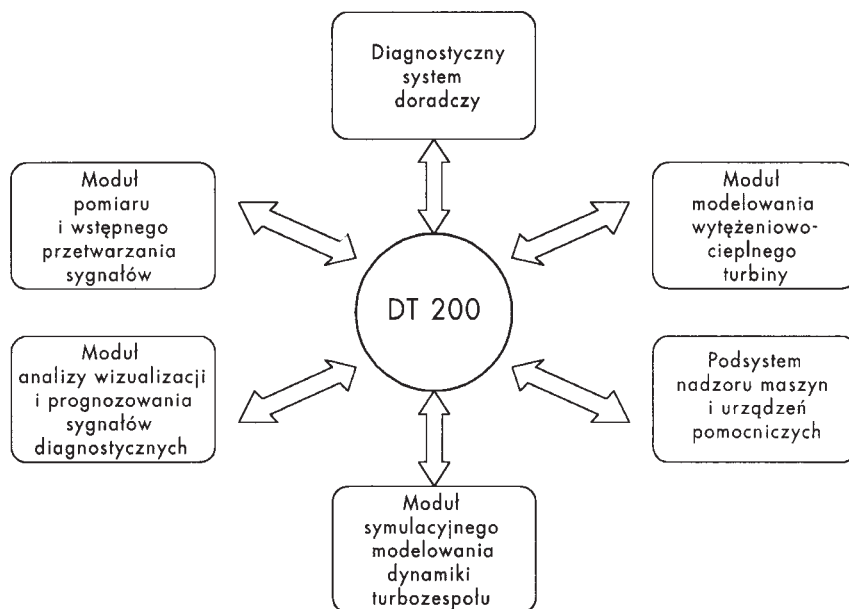
Rys. 3.19. Dyskretyzacja MES linii wirników dla klasy obiektów typu turbozespoły 13K215 o mocy 200 MW – sporządzona w oparciu o dane karty nr 17. Powyżej osi wirników przedstawione są średnice przyjęte do obliczenia sztywności, poniżej natomiast średnice do wyznaczania masy. Dyskretyzacja przeprowadzona została w oparciu o dokumentację użytą od dysponenta obiektu

3.3.2.2 System diagnostyczny DT-200

W wyniku realizacji Projektu Badawczego Zamawianego PBZ-038-06 koordynowanego przez IMP PAN w Gdańsku, opracowany został, wysiłkiem kilku zespołów badawczych z całego kraju, w tym głównie ośrodka krakowskiego (AGH) i ośrodka śląskiego (Pol. Śląska), system diagnostyki turbozespołów energetycznych o mocy 200 MW o nazwie DT-200 [3.4]. System ten został zainstalowany i uruchomiony na bloku nr 7 w Elektrowni „Kozienice”.

System DT200-1 składa się pod względem funkcjonalnym z trzech zasadniczych warstw:

- warstwy sprzętowej DT2B100 (*hardware*) będącej centralną jednostką sieciowego układu akwizycji sygnałów wraz z niezbędnym oprogramowaniem podstawowym (narzędziowym oraz do rejestracji, transmisji i obróbki sygnałów);
- oprogramowania wyższego poziomu (*software*) stanowiącego dynamiczny system doradczy;
- systemu pozyskiwania wiedzy w postaci oprogramowania symulacyjnego, zaplecza naukowego i laboratoryjnego ośrodków spoza elektrowni pracujących w jednolitym systemie pozyskiwania i rozwoju baz wiedzy.



Rys. 3.20. Struktura funkcjonalna systemu DT200-1

Powyższa hierarchiczna struktura warstwowa posiada szereg autonomicznych współpracujących ze sobą modułów – rys. 3.20.

System DT200-1 jest, przynajmniej w swych założeniach, systemem nowej generacji tzn. systemem wykorzystującym m.in. elementy sztucznej inteligencji. Wśród cech, które wyróżniają ten system, na tle innych dostępnych systemów zagranicznych, wymienić należy:

- **Otwartość systemu**

Warstwa sprzętowa i tym samym zapis, obróbka i archiwacja danych zaprojektowane zostały w sposób umożliwiający bezpośrednią zdalną komunikację z innymi ośrodkami (poza elektrownią) a także podłączenie kolejnych, nowych modułów.

- **Dynamiczny system doradczy**

Realizuje on zasadę wnioskowania niemonotonicznego zależnego od zmieniających warunków otoczenia i dostępnego czasu na wygenerowanie konkluzji.

- **System pozyskiwania wiedzy**

Realizuje on koncepcję tzw. „centrum rozproszonego” a więc komunikacji z ośrodkami zewnętrznymi celem uzupełnienia wiedzy. Ta cecha może mieć duże znaczenie w przypadku budowy w przyszłości Krajowego Centrum Diagnostycznego pracującego na rzecz krajowej energetyki.

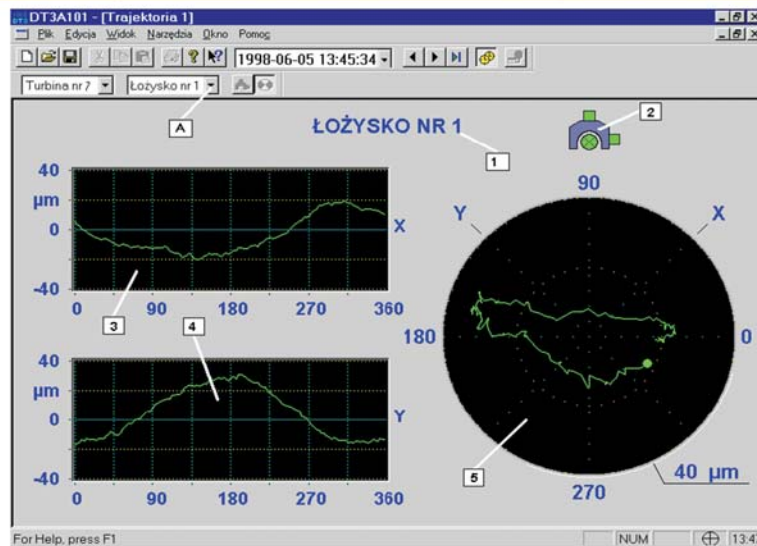
Jednakże do chwili obecnej nie wszystkie moduły tego systemu zostały w pełni wdrożone w Elektrowni „Kozienice”, mimo iż pod względem koncepcyjnym i projektowym zostały one w pełni opracowane. Odnosi się to zwłaszcza do oprogramowania wyższego poziomu (dynamicznego systemu eksperckiego). Niemniej jednak system ten, z uwagi na dostęp do niego m.in. autora niniejszej monografii, odegrał kluczową rolę w procesie weryfikacji opracowanych narzędzi badawczych. Dostarczył on bowiem informacji o trajektoriach przemieszczeń czopów łóżyskowych, widmach drgań itd., zarejestrowanych przez system dla różnych warunków pracy turbozespołu.

Rysunki 3.21 do 3.24 przedstawiają przykłady wybranych okien dialogowych z komputera użytkownika tego systemu.

3.3.2.3 Weryfikacja na bazie klasy obiektów

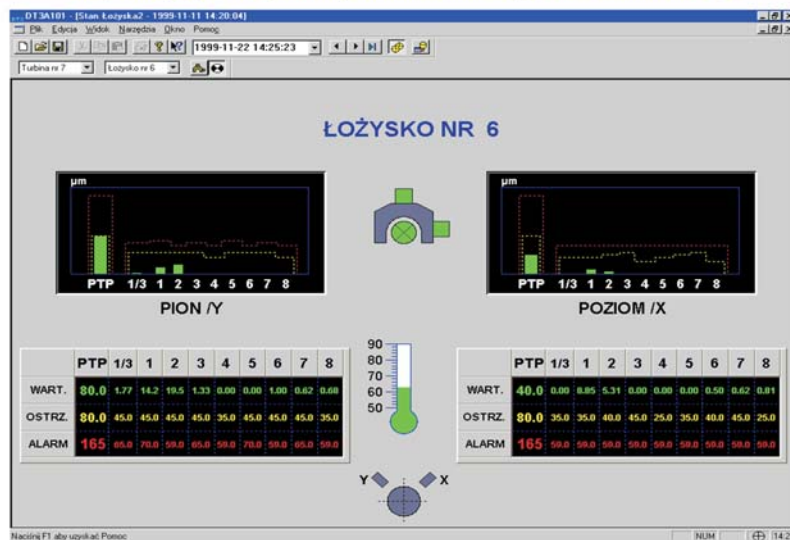
Wróćmy do badań weryfikacyjnych i procedury strojenia modelu bazujących na klasie obiektów typu turbozespoły energetyczne o mocy 200 MW – rys. 3.17 i rys. 3.18. Szczegóły dotyczące danych geometrycznych i eksploatacyjnych, a także raporty z pomiarów eksperymentalnych na tych obiektach przedstawiliśmy w poprzednim podrozdziale dotyczącym banku danych. Dyskretyzację MES linii wirników przyjętą do obliczeń za pomocą programów serii NLDW przedstawia rys. 3.19.

System DT-200. Przeszczena czopa



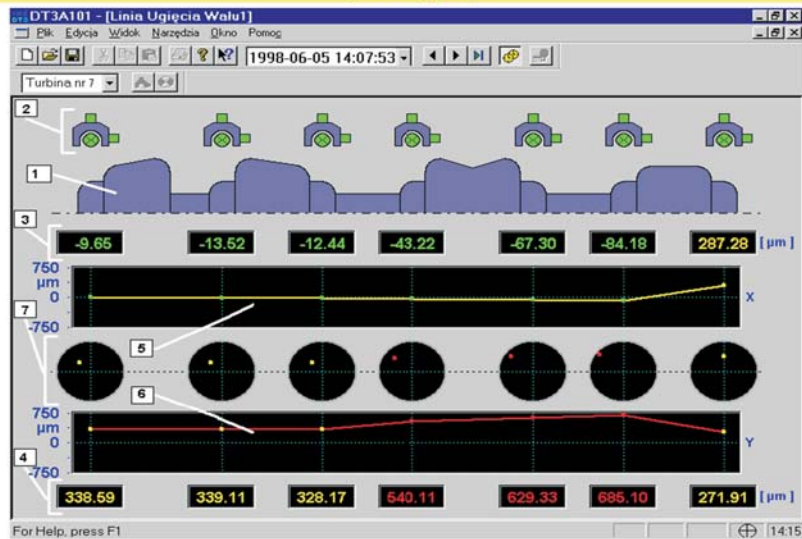
Rys. 3.21. Przykład okna dialogowego systemu DT-200 [3.4]

System DT-200. Drgania względne czopa amplitudy p-p oraz pierwszych 8 harmoniczných w kierunkach x i y



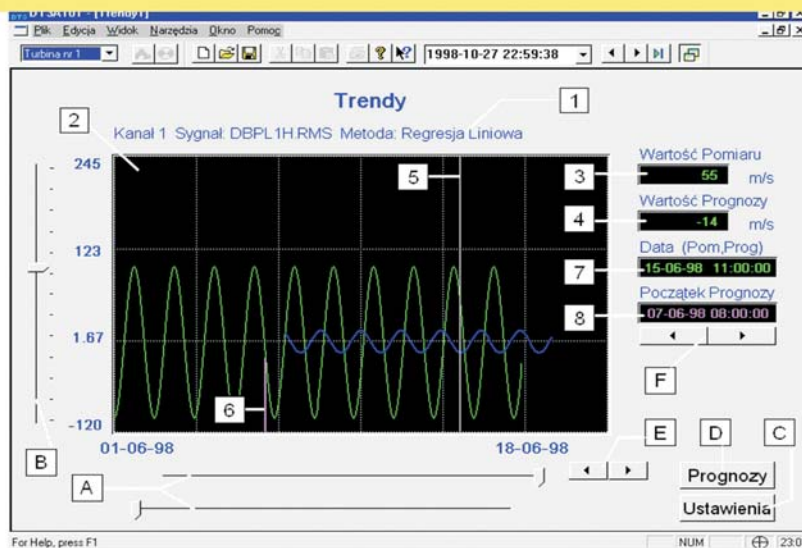
Rys. 3.22. Przykład okna dialogowego systemu DT-200 [3.4]

System DT-200. Dylatacje termiczne linii wirników w stosunku do linii geodezyjnej



Rys. 3.23. Przykład okna dialogowego systemu DT-200 [3.4]

System DT-200. Trendy i prognoza stanu dynamicznego



Rys. 3.24. Przykład okna dialogowego systemu DT-200 [3.4]

*Dane do obliczeń***I. Warunki posadowienia i podparcia linii wirników**

Do opisu sprężystych własności szeroko rozumianych podparć (utwierdzeń, stojaków łożyskowych i fundamentów) przyjęto charakterystyki sztywności dynamicznej zmierzone na jednym z pracujących bloków. Z uwagi na dwa rodzaje analizowanych wymuszeń (synchroniczne i od sił elektrycznych w generatorze) uwzględniono dwa przypadki sztywności dynamicznej, a mianowicie pomierzone przy 50 i 100 Hz częstotliwości wymuszenia – tabela 3.1.

Tabela 3.1. Współczynniki sztywności dynamicznej podpór

Warianty podparcia		Numer podpory						
		1	2	3	4	5	6	7
Wariant I 50 Hz	X [N/m]	$-3,1 \cdot 10^9$	$-4,7 \cdot 10^9$	$-4,7 \cdot 10^9$	$1,9 \cdot 10^9$	$-2,5 \cdot 10^9$	$3,1 \cdot 10^9$	$5,0 \cdot 10^9$
	Y [N/m]	$-1,7 \cdot 10^9$	$-5,5 \cdot 10^9$	$-3,1 \cdot 10^9$	$-4,5 \cdot 10^9$	$-0,9 \cdot 10^9$	$-3,2 \cdot 10^9$	$-5,0 \cdot 10^9$
Wariant II 100 Hz	X [N/m]	$-3,1 \cdot 10^9$	$-4,7 \cdot 10^9$	$-4,7 \cdot 10^9$	$-2,1 \cdot 10^9$	$-1,0 \cdot 10^9$	$-1,1 \cdot 10^9$	$-5,0 \cdot 10^9$
	Y [N/m]	$-1,7 \cdot 10^9$	$-5,5 \cdot 10^9$	$-3,1 \cdot 10^9$	$-5,9 \cdot 10^9$	$-5,6 \cdot 10^9$	$-2,3 \cdot 10^9$	$-5,0 \cdot 10^9$

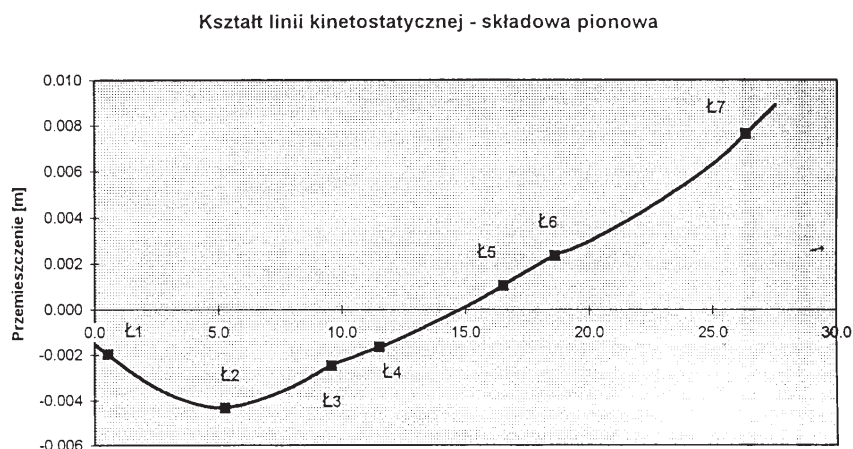
Drugim podstawowym parametrem, który należy przyjąć przy określeniu warunków posadowienia i podparcia, jest sposób wzajemnego ustawienia środków panwi. To właśnie ustawienie punktów podparcia linii łożysk determinuje kształt linii kinetostatycznej, który z kolei wpływa bardzo istotnie na własności dynamiczne układu wirnikowego. W przypadku prowadzonych analiz symulacyjnych oparto się na wynikach pomiaru przemieszczeń panwi uzyskanych na tym samym bloku, dla którego wcześniej określono współczynniki sztywności dynamicznej prezentowane w tabeli 3.1. Tabela 3.2 przedstawia wyniki pionowych (gdyż tylko takie pomiary się wykonuje) przemieszczeń środków panwi dla stanu gorącego, a więc po wygrzaniu maszyny. Z uwagi na brak danych odnośnie przemieszczeń panwi w płaszczyźnie poziomej, przyjęto zerowe wartości tych przemieszczeń. Rysunek 3.25 przedstawia wynikowy kształt tak określonej linii kinetostatycznej i ten właśnie kształt linii przyjęto jako bazowy do dalszych analiz symulacyjnych.

Tabela 3.2. Wartości przemieszczeń środków panwi

Przemieszczenia		Numer podpory						
		1	2	3	4	5	6	7
X	[mm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Y	[mm]	-1,9	-4,3	-2,4	-1,7	1,1	2,4	7,7

II. Wymuszenia zewnętrzne

Przyjęte zostały następujące rodzaje wymuszeń zewnętrznych:



Rys. 3.25. Kształt linii kinetostatycznej wirnika przyjęty do obliczeń

- niewyważenie synchroniczne „1n” resztkowe według wartości uzyskanych przy wyważaniu poszczególnych pręseł linii w odwirowni (dane od producenta);
- niewyważenie synchroniczne wtórne „1n” (pochodzące np. od odkształceń termicznych uzwojeń i pokryw generatora w czasie pracy układu); przyjęto 5 sił równomiernie rozłożonych wzdłuż osi generatora; wobec braku lepszych danych przyjęto kilka parametrycznych wartości tych sił dla mas niewyważenia: 0,1, 0,2, 0,4, 0,8, 1,6, 2,0 kg;
- wymuszenie asynchroniczne o krotności wirowania „2n” (pochodzące od sił elektromagnetycznych w generatorze); przyjęto 5 sił równomiernie rozłożonych wzdłuż osi wirnika generatora; wobec braku lepszych danych przyjęto kilka parametrycznych wartości tych sił dla mas wirujących: 0,1, 0,2 i 0,4 kg.

Rysunek 3.19 przedstawia również punkty przyłożenia poszczególnych wzbudzeń w analizowanych przypadkach.

III. Tłumienie materiałowe w linii wirników

Tłumienie materiałowe określone zostało poprzez przyjęcie proporcjonalnych współczynników tłumienia α i β (model tłumienia Rayleigha). Dla takiego modelu tłumienia globalna macierz tłumienia układu $\mathbf{D}$ tworzona jest poprzez kombinację liniową macierzy bezwładności $\mathbf{M}$ i macierzy sztywności $\mathbf{K}$, czyli:

$$\mathbf{D} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}.$$

Przyjmując stały współczynnik tłumienia ζ rozumiany jako stosunek tłumienia do tłumienia krytycznego, w tym przypadku dla stali $\zeta = 0,01$ oraz wykorzystując zależność:

$$\zeta = \frac{\alpha}{2\omega_{kr}} + \frac{\beta\omega_{kr}}{2}$$

a następnie poddając analizie różne wartości ω_{kr} (dla wybranych form drgań własnych) otrzymano różne pary współczynników tłumienia α i β , a mianowicie $\alpha = 3$ lub $1,2$ oraz $\beta = 0,00015$ lub $0,00008$.

Wszystkie pozostałe parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne turbozespołu przyjęte zostały na podstawie danych dysponenta obiektu.

Wyniki obliczeń

Na rys. 3.26 przedstawione zostały przykładowe parametry drgań bezwzględnych panwi i względnych filmu olejowego pomierzone na jednym z bloków energetycznych o mocy 200 MW.

Drgania panwi [μm]	Kierunek i krotność	Ł1	Ł2	Ł3	Ł4	Ł5	Ł6	Ł7
	H-tot	5,0	4,5	13,5	3,6	6,8	11,7	3,6
	V-tot	3,2	2,3	7,7	6,8	5,0	11,7	2,7
	H-1X	3,2	2,3	8,6	1,8	1,4	1,8	2,7
	V-1X	0,5	0,0	1,8	3,2	3,6	1,4	1,4
	H-2X	1,6	1,6	4,7	1,4	3,2	5,9	1,1
	V-2X	0,7	0,7	3,6	2,9	1,8	5,6	1,1
Drgania czopów	Kierunek i krotność	Ł1	Ł2	Ł3	Ł4	Ł5	Ł6	Ł7
	H-tot	19,3	31,0	9,5	11,0	21,0	20,3	19,8
	H-1X	19,3	31,6	8,4	4,8	11,7	5,0	13,0
	V-1X	4,2	9,6	2,0	4,4	17,7	6,1	14,2
	H-2X	5,9	4,2	0,4	3,2	5,7	12,5	6,4
	V-2X	1,2	0,9	2,5	5,5	6,6	15,2	2,8

Rys. 3.26. Pomierzone eksperymentalnie parametry drgań panwi i czopów łożyskowych turbozespołu 13K215 na jednym z bloków energetycznych o mocy 200 MW

Użyte tu symbole oznaczają:

- A-tot – amplitudy całkowite maksymalne w μm ,
- H-tot – amplitudy całkowite w kierunku poziomym w μm ,
- V-tot – amplitudy całkowite w kierunku pionowym w μm ,
- H-1X – amplitudy I harmonicznej w kierunku poziomym w μm ,
- V-1X – amplitudy I harmonicznej w kierunku pionowym w μm ,
- H-2X – amplitudy II harmonicznej w kierunku poziomym w μm ,
- V-2X – amplitudy II harmonicznej w kierunku pionowym w μm .

Pomierzone prędkości drgań RMS w odniesieniu do drgań panwi przeliczone tu zostały na przemieszczenia bezwzględne celem ułatwienia bezpośrednich porównań z wynikami obliczeń.

Warto tu zauważyć, że dane przedstawione na rys. 3.26 dotyczą konkretnej jednostki oraz pomiarów w określonym dniu i dla określonych parametrów eksploatacyjnych turbozespołu. Zmieniają się one w sposób znaczny dla innych warunków przeprowadzonych pomiarów. Stąd też dane te mogą mieć jedynie charakter orientacyjny. Mieszczą się one w dopuszczalnym zakresie drgań (np. dla czopów poziom ostrzeżenia wynosi A-tot = 80 μm a alarmu A-tot = 165 μm).

Procedura weryfikacji modelu i programów serii NLDW przeprowadzona została na podstawie wielu pomiarów z różnych bloków energetycznych, a rys. 3.26 stanowi niewielki ich fragment. Zagadnienie to było przedmiotem szczegółowych badań w ramach wspomnianego już Programu Badawczego Zamawianego PBZ 038-06 [3.4].

Efekt końcowy procedury strojenia zastosowanych narzędzi badawczych w postaci tzw. bazowej karty diagnostycznej przedstawia rys. 3.27. Stanowi ona wynik wielu prób i czasochłonnych obliczeń, w efekcie czego uznać można było, iż większość parametrów programu NLDW została „dostrojona” z wystarczającą dokładnością do uzyskanych danych eksploatacyjnych konkretnej klasy obiektów rzeczywistych. Tym samym zastosowany model MES i program NLDW stanowiąc może bazę odniesienia dla dalszych badań dużych obiektów energetycznych.

Rysunki 3.28 do 3.35 przedstawiają bezpośrednie wyniki weryfikacji w formie tzw. wykresów słupkowych dla drgań względnych filmu olejowego i bezwzględnych panwi dla wszystkich siedmiu łożysk. Badania eksperymentalne przeprowadzone zostały przy różnych obciążeniach maszyny oraz w oparciu o pomiary z różnych systemów diagnostycznych. Rysunki te zawierają:

- amplitudy przemieszczeń drgań bezwzględnych A_x ,
- amplitudy przemieszczeń drgań bezwzględnych A_y ,
- amplitudy przemieszczeń drgań względnych A_x ,
- amplitudy przemieszczeń drgań względnych A_y ,
- prędkości drgań bezwzględnych średniokwadratowe V_{RMS} w kierunku x ,

- prędkości drgań bezwzględnych średniokwadratowe V_{RMS} w kierunku y ,
- przemieszczenia drgań względnych całkowite A_{pp} w kierunku $x(u)$,
- przemieszczenia drgań względnych całkowite A_{pp} w kierunku $y(v)$.

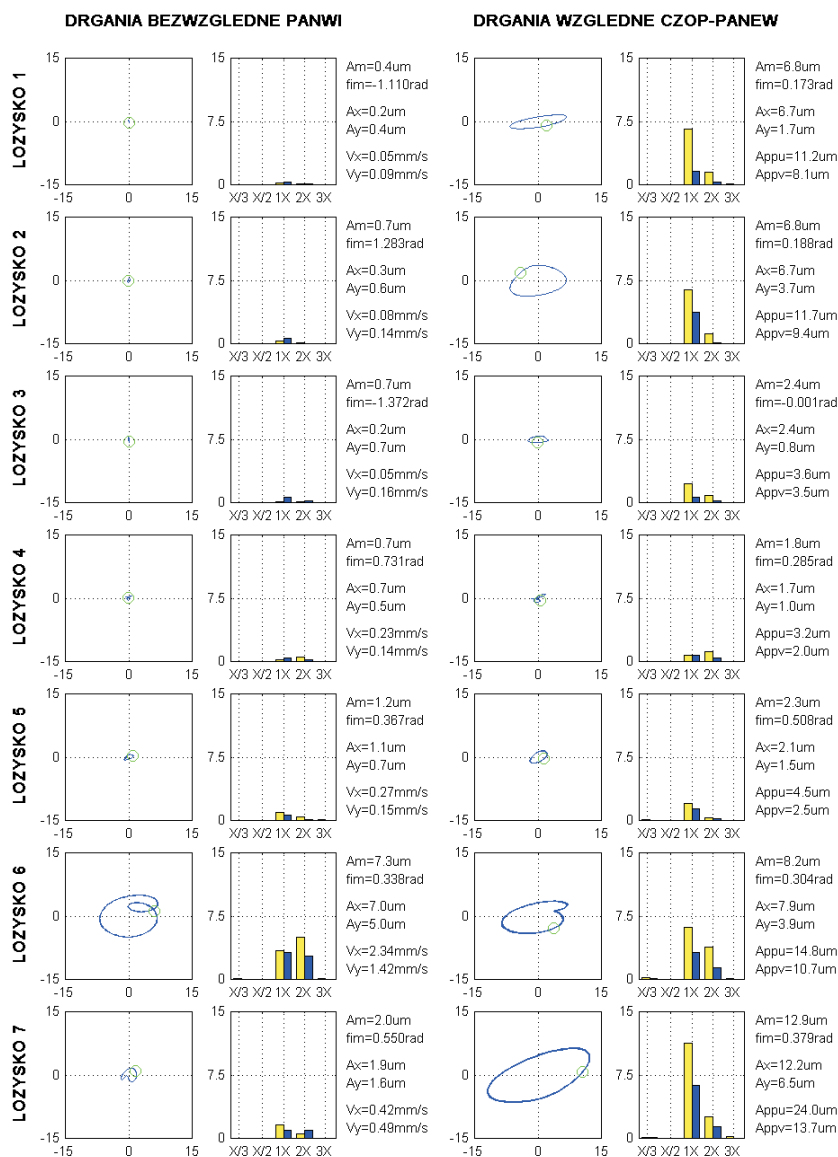
Każdy rysunek w kolejnych siedmiu kolumnach zawiera wykresy słupkowe drgań:

- kolumna 1 – wartość odniesienia,
- kolumna 2 – sumaryczne,
- kolumna 3 – harmoniczną $1/3 X$,
- kolumna 4 – harmoniczną $1/2 X$,
- kolumna 5 – harmoniczną $1 X$,
- kolumna 6 – harmoniczną $2 X$,
- kolumna 7 – harmoniczną $3 X$.

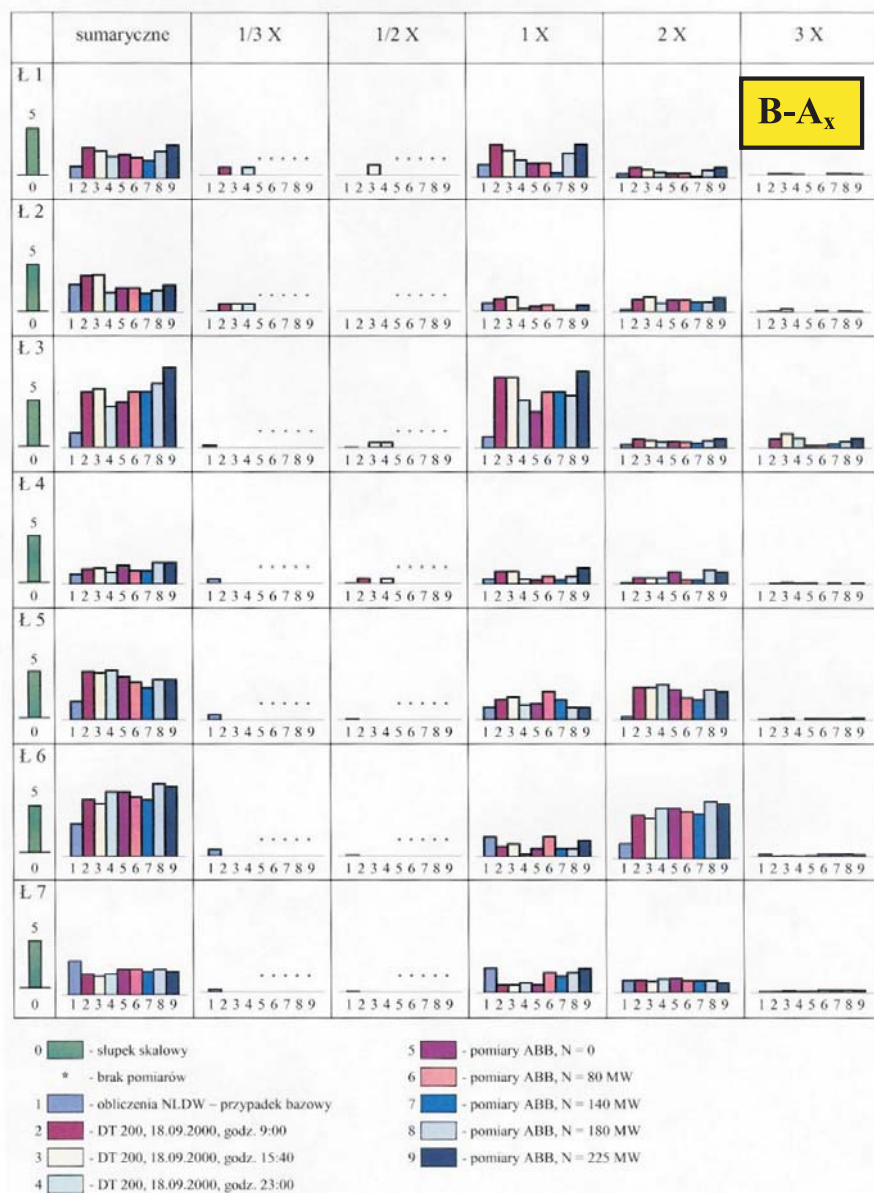
Wykresy słupkowe wykonano dla drgań wszystkich siedmiu łożysk, układając je w siedmiu rzędach. W ten sposób każdy rysunek zawiera 42 pola z wykresami w postaci 9-ciu słupków. Każdy ze słupków reprezentuje tę samą wielkość, ale pochodzącą z różnych pomiarów bądź z obliczeń. Poszczególne słupki są identyfikowane za pomocą kolorów i legendy umieszczonej na dole strony. Gwiazdkami na wykresach oznaczono wielkości, odpowiadające pustym polom w tabelach, a więc wielkości które nie były mierzone. W ten sposób zróżnicowano je względem pustych pól wykresów wynikających ze zbyt małej wartości pomierzonej, przez co nie jest ona widoczna na wykresie. Przedstawione na tych rysunkach zestawienia pozwalają na porównanie wyników pomiarów wykonanych na tej samej maszynie w różnych momentach, przez różne zespoły i różnymi technikami.

Wyniki te zestawione zostały z wynikami obliczeń za pomocą programu NLDW określonymi jako przypadek bazowy dla tej określonej sytuacji – rys. 3.27. Jak widać z tych rysunków są przypadki zupełnie zadowalającej zgodności nawet w kategoriach ilościowych. W pozostałych przypadkach różnice ilościowe są większe, co nie jest zaskakujące biorąc pod uwagę skalę złożoności obiektu jak i zastosowaną procedurę weryfikacji.

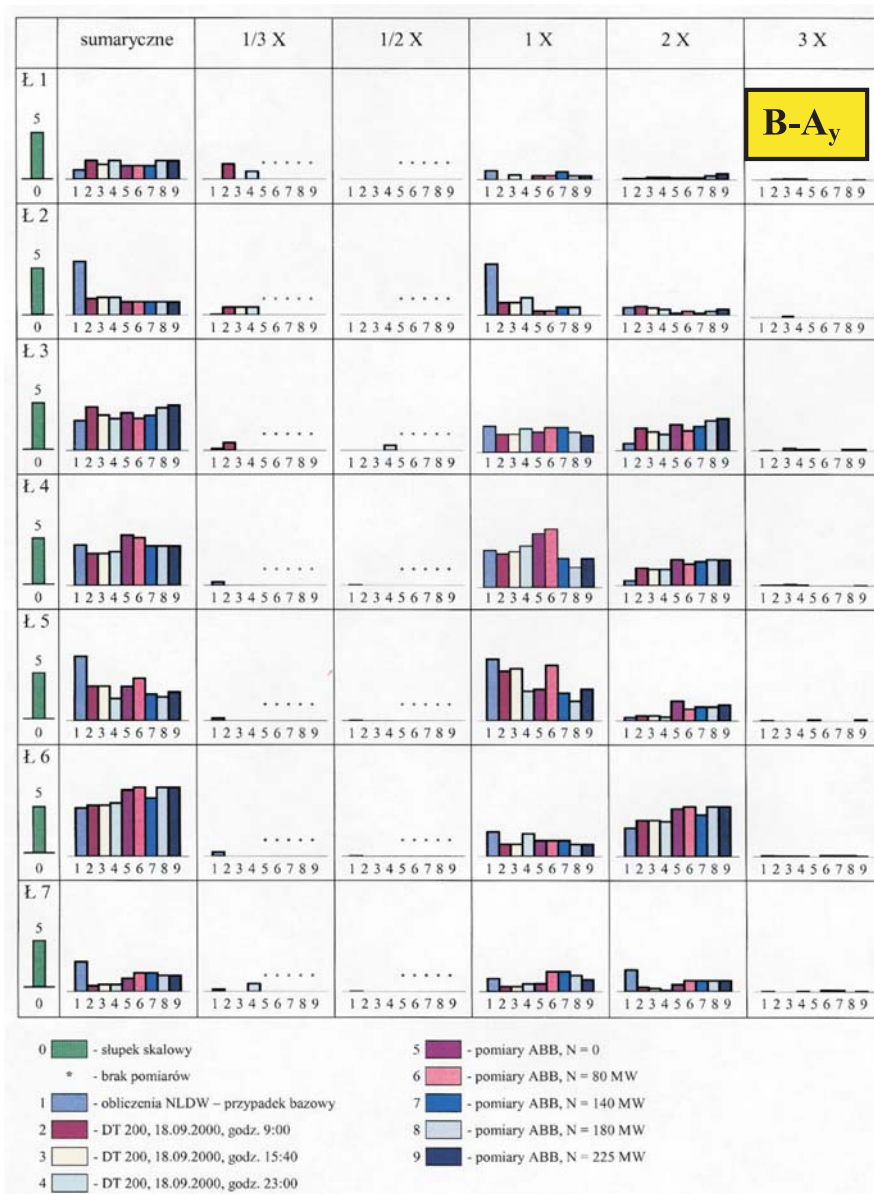
Kod karty: 10000001	Obiekt: Turbozespol 13k215	Data: 27-11-2000
Opis defektu: Przypadek bazowy - bez pekniec		
Dane zmienne:		



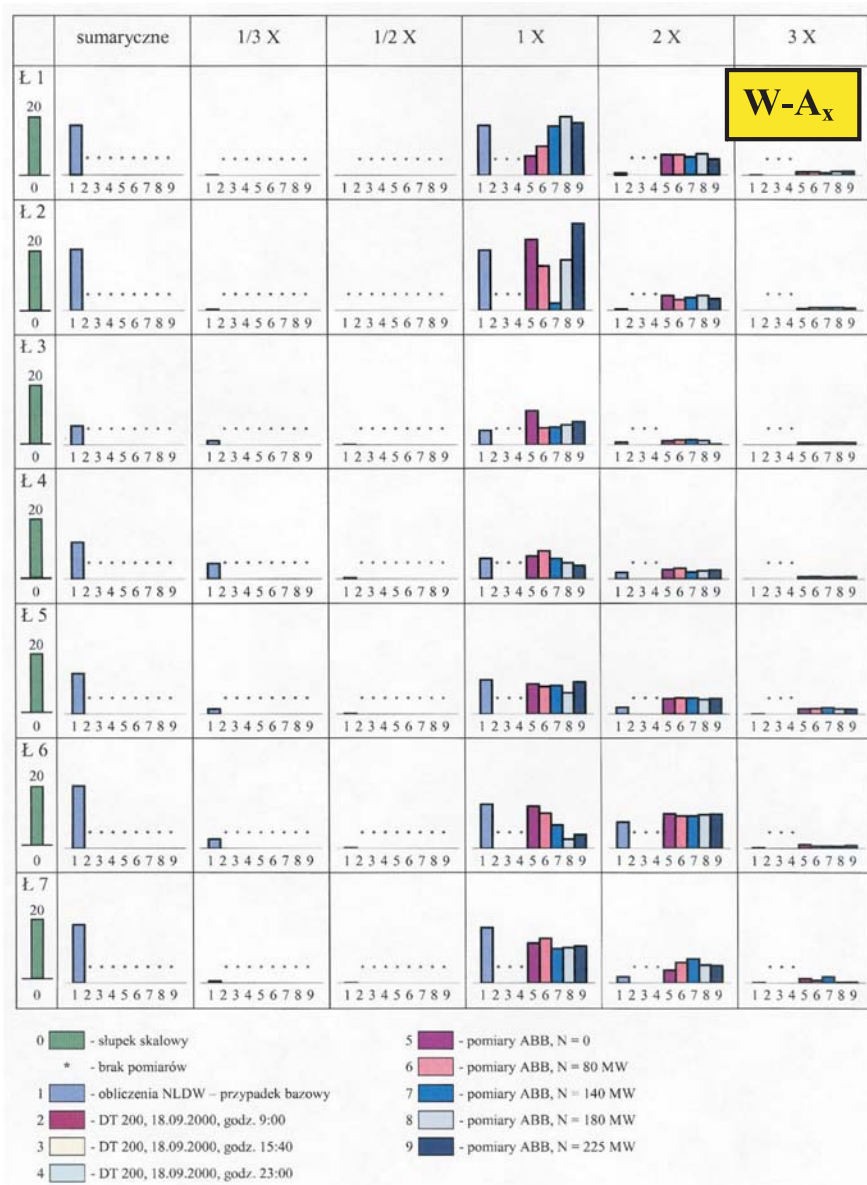
Rys. 3.27. Bazowa karta diagnostyczna turbozespolu 13K215. Efekt dostrojenia modelu do danych eksploatacyjnych właściwych dla tej klasy obiektów. Obliczenia programem NLDW



Rys. 3.28. Zestawienie pomiarów eksperymentalnych z wynikami obliczeń. Drgania bezwzględne panwi, składowa pozioma amplituda A_x



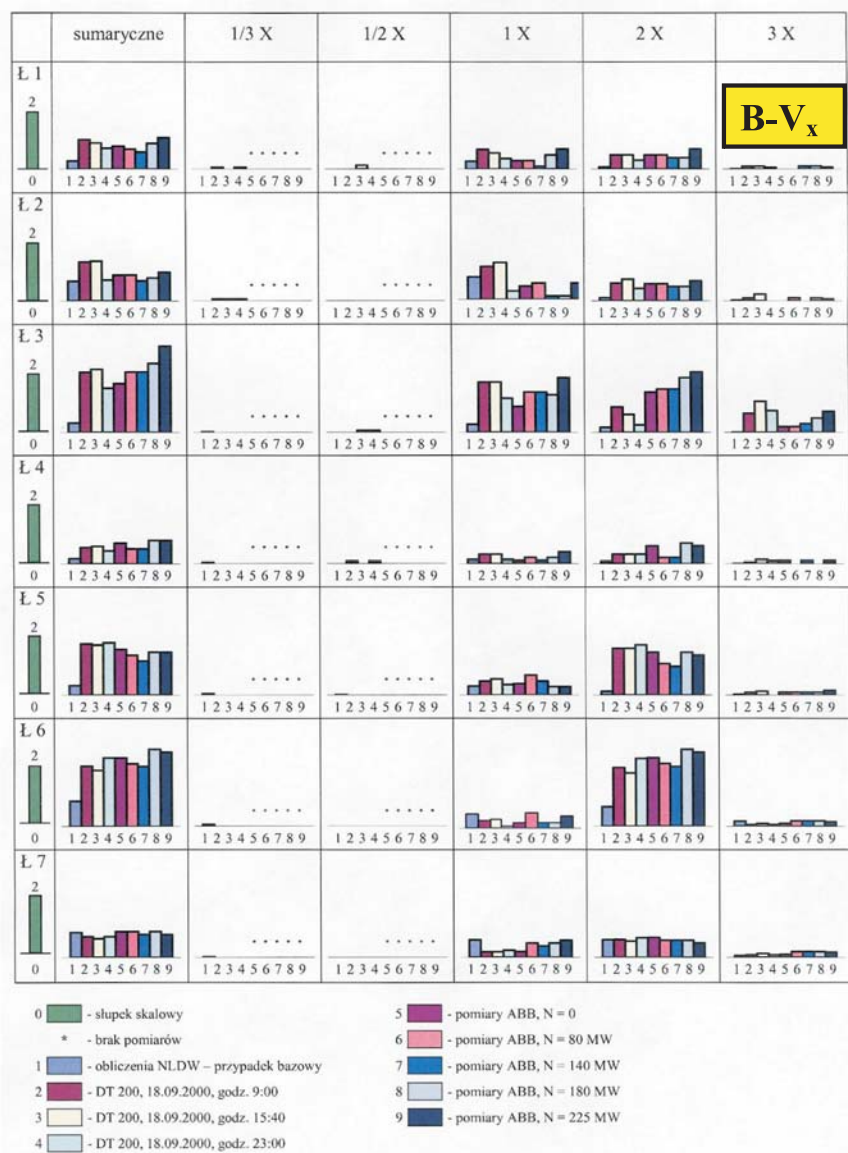
Rys. 3.29. Zestawienie pomiarów eksperymentalnych z wynikami obliczeń. Drgania bezwzględne panwi, składowa pionowa amplitudy A_y



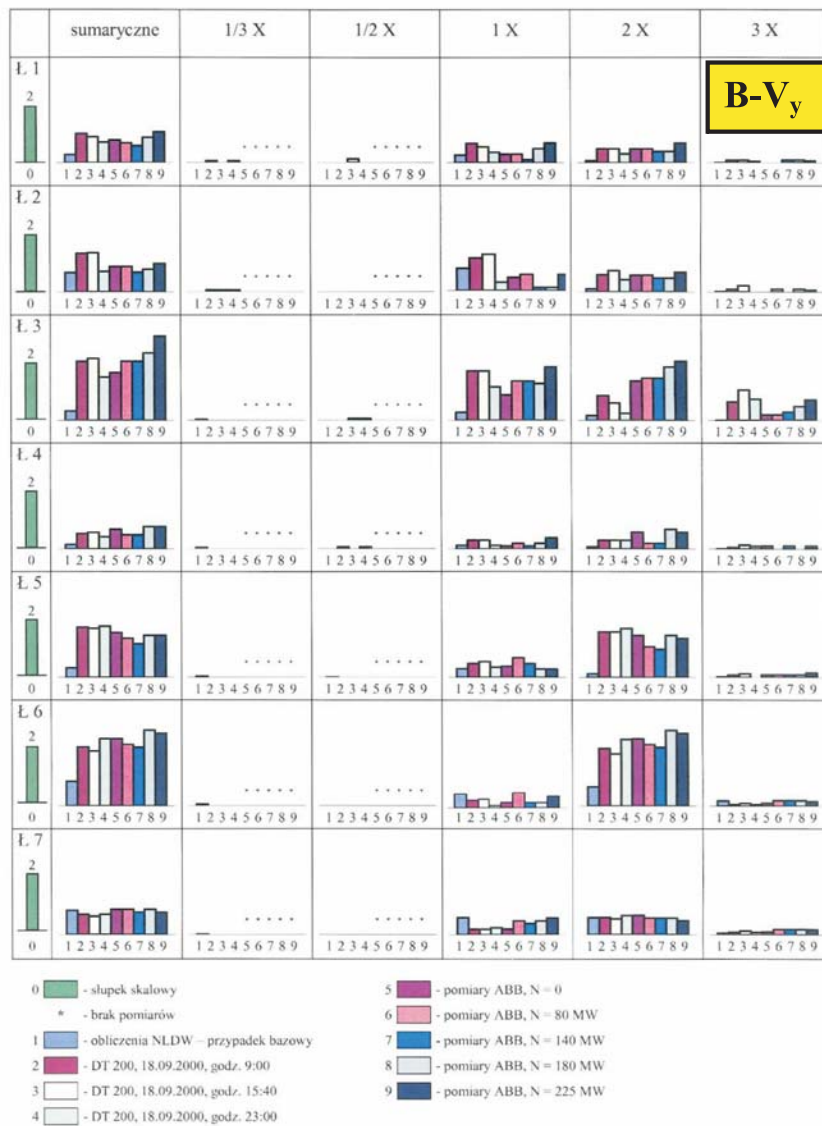
Rys. 3.30. Zestawienie pomiarów eksperymentalnych z wynikami obliczeń. Drgania względne panwi, składowa pozioma amplituda A_x



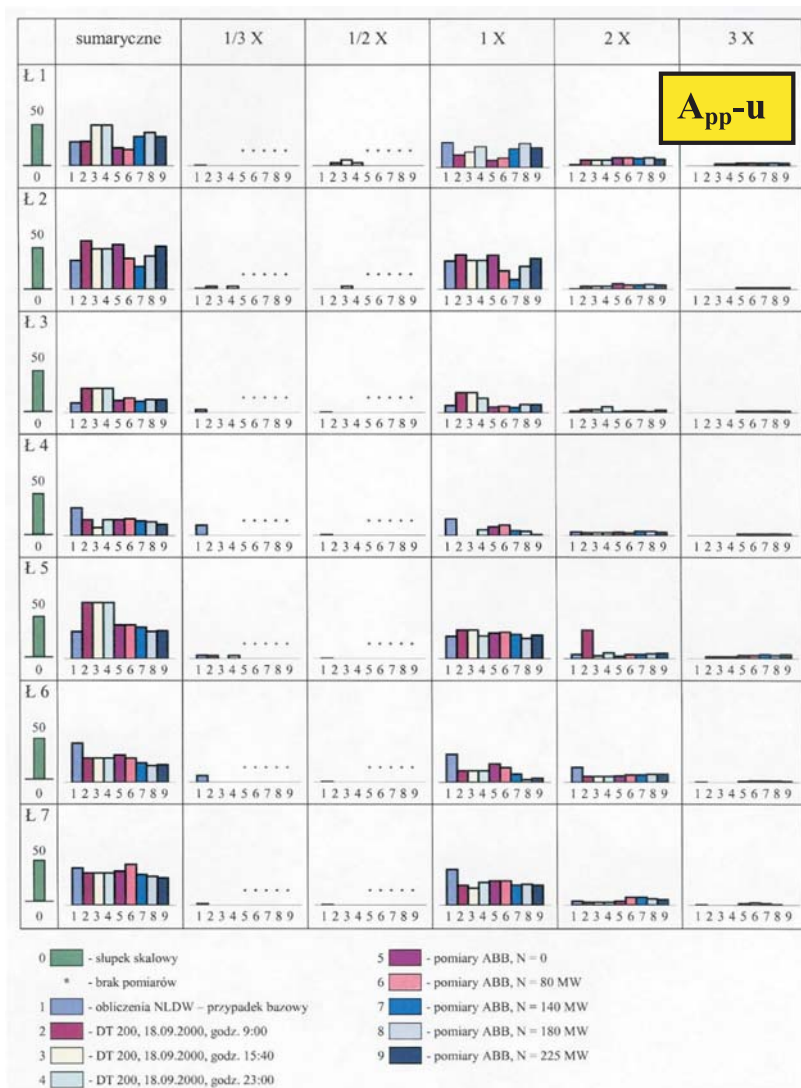
Rys. 3.31. Zestawienie pomiarów eksperymentalnych z wynikami obliczeń. Drgania względne panwi, składowa pionowa amplitudy A_y



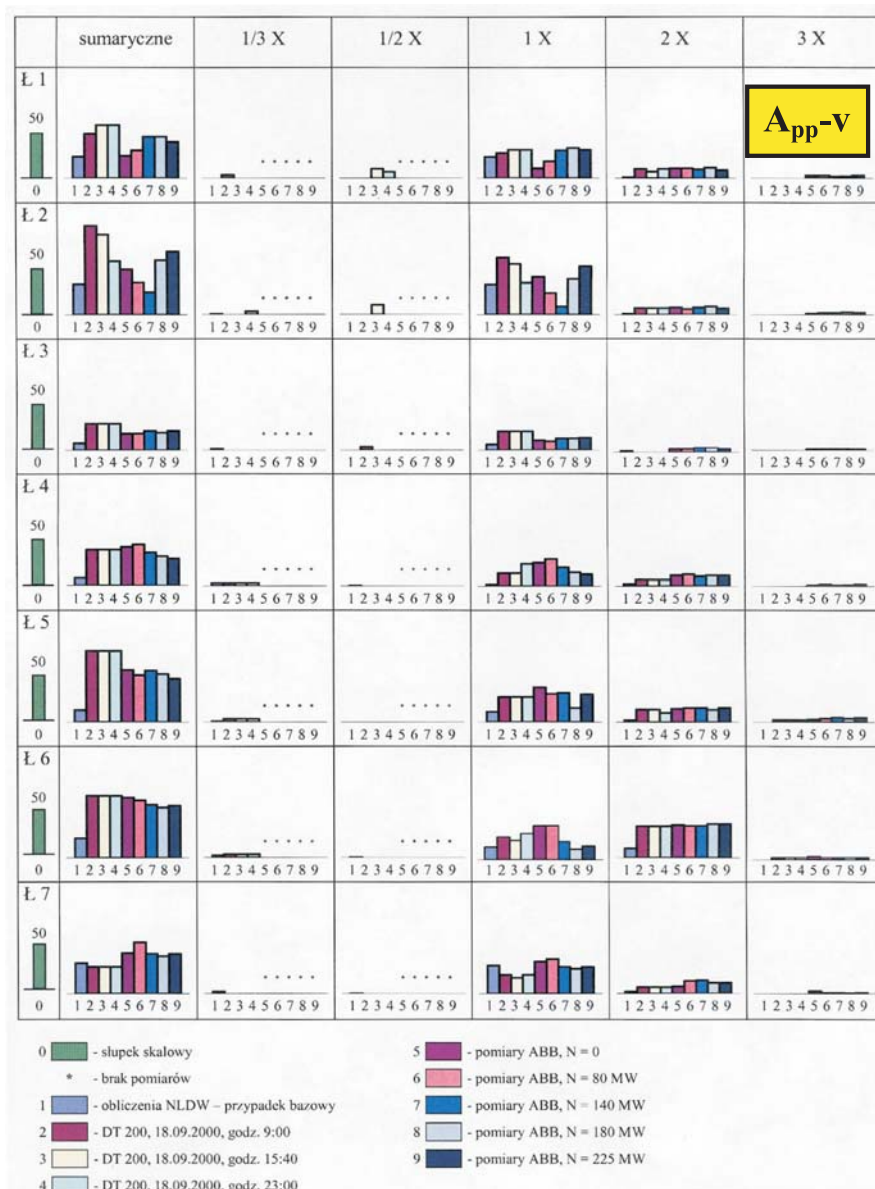
Rys. 3.32. Zestawienie pomiarów eksperymentalnych z wynikami obliczeń. Prędkości drgań bezwzględnych, składowa V_x



Rys. 3.33. Zestawienie pomiarów eksperymentalnych z wynikami obliczeń. Prędkości drgań bezwzględnych, składowa pionowa V_y



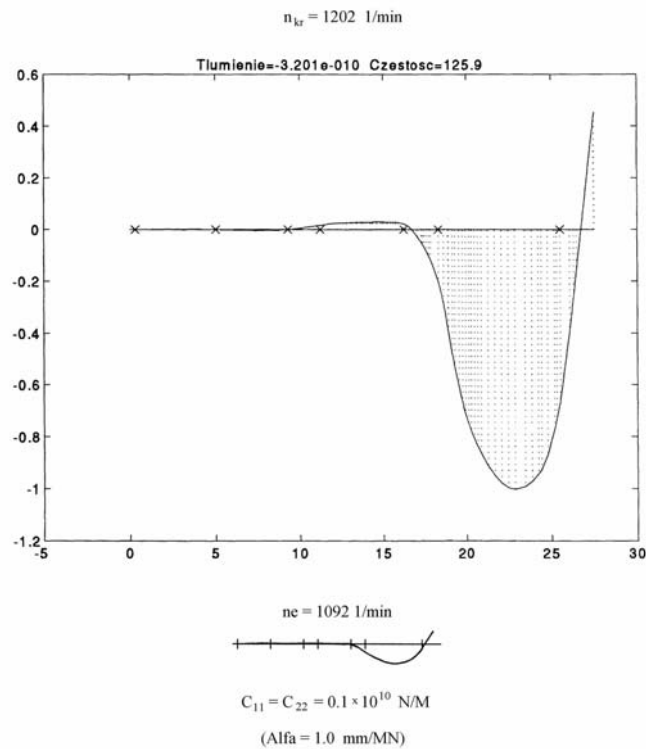
Rys. 3.34. Zestawienie pomiarów eksperymentalnych z wynikami obliczeń. Amplitudy drgań peak-to-peak, składowa w kierunku u



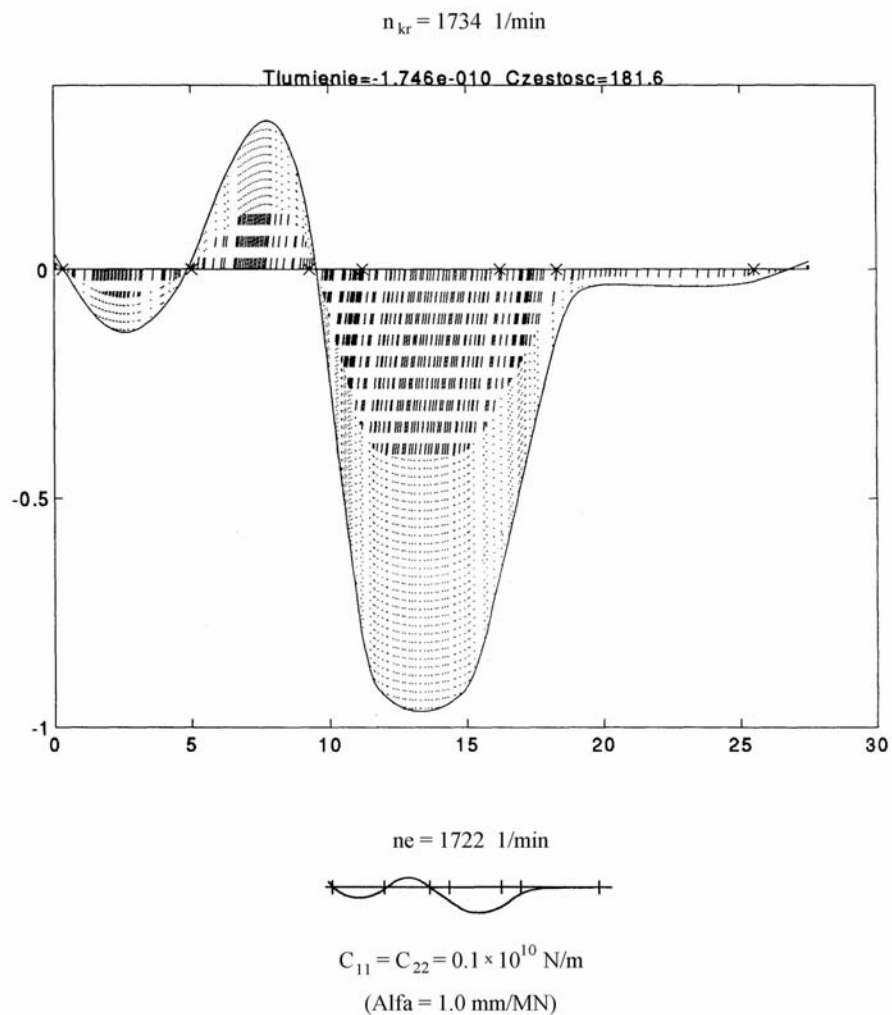
Rys. 3.35. Zestawienie pomiarów eksperymentalnych z wynikami obliczeń. Amplitudy drgań peak-to-peak, składowa w kierunku v

3.3.2.4 Prędkości krytyczne – formy drgań własnych

Inną formą weryfikacji opracowanych narzędzi badawczych może być analiza drgań swobodnych i prędkości krytycznych układu a zwłaszcza zestawienie danych eksperymentalnych z danymi obliczeniowymi. Zanim jednak do tego przejdziemy przestawimy porównanie form drgań własnych maszyn typu turbozespoły 13K215 (rys. 3.17-3.19) uzyskanych za pomocą programów DIATER i DYNWIR-S stanowiących elementy środowiska MESWIR z programami stosowanymi przez koncern ABB-Zamech dla określonego zestawu danych. Programy krajowego producenta turbin nie miały możliwości wprowadzania pełnych danych łożyskowych, np. z uwzględnieniem wymiany ciepła i rzeczywistego kształtu gorącej linii kinostatycznej czyli przemieszczeń podpór, stąd też porównanie wyników obliczeń może mieć jedynie charakter orientacyjny. Niemniej jednak stanowić one mogą wstępny etap weryfikacji jakościowej. Zestawienie wyników obliczeń przedstawiają rys. 3.36 do 3.40.

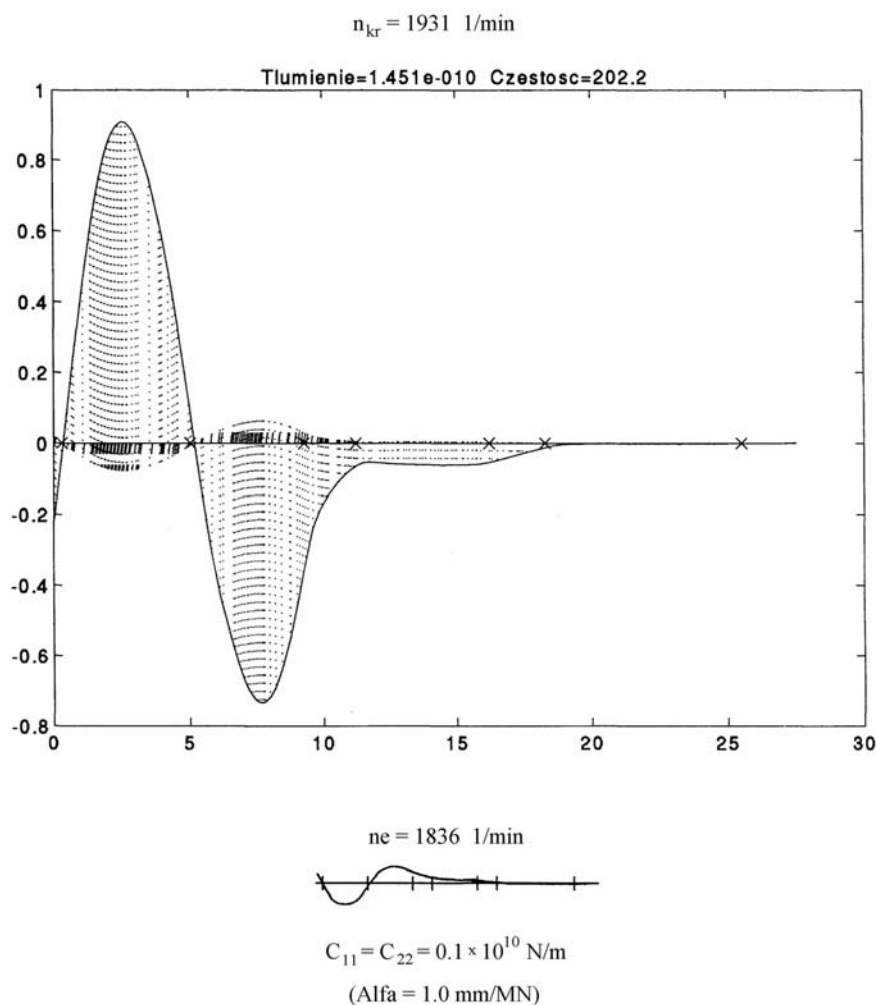


Rys. 3.36. I-sza forma i częstotliwość drgań własnych oraz prędkość krytyczna linii wirników turbozespołu 13K215. Porównanie wyników obliczeń programem DIATER i DYNWIR-S z wynikami obliczeń producenta – szkic poniżej



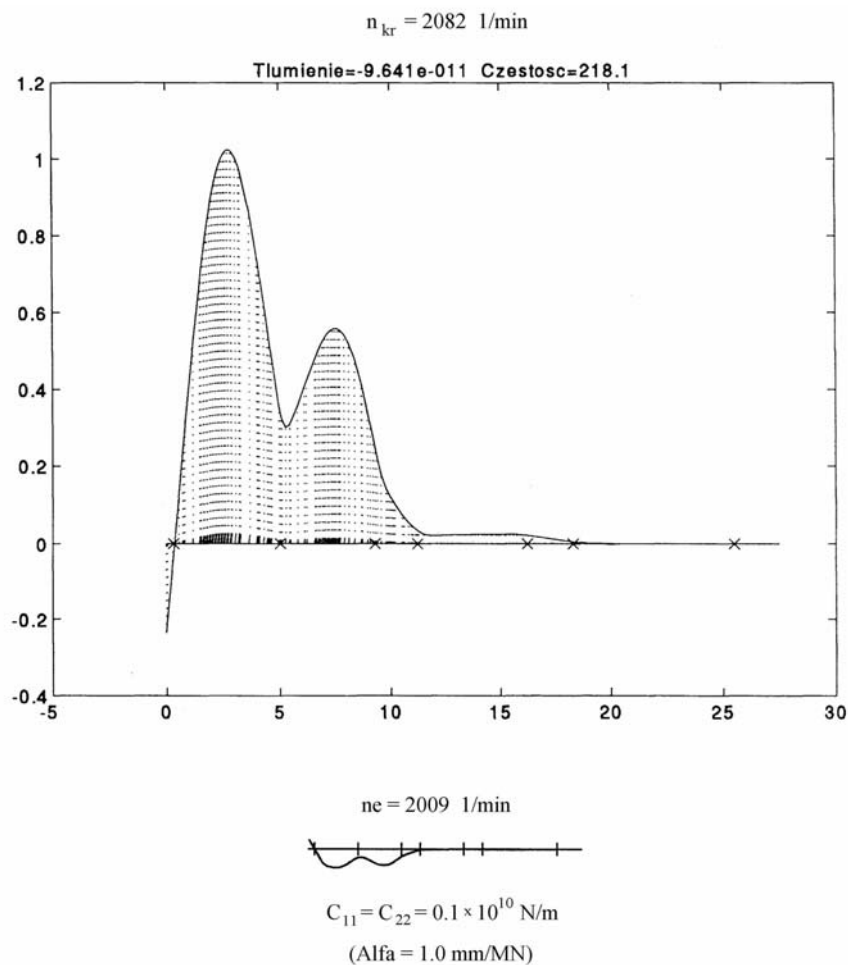
Rys. 3.37. II-ga forma i częstotliwość drgań własnych oraz prędkość krytyczna linii wirników turbos zespołu 13K215. Porównanie wyników obliczeń programem DIATER i DYNWIR-S z wynikami obliczeń producenta – szkic poniżej

Przejdźmy teraz do bezpośrednich porównań wyników obliczeń z danymi eksperymentalnymi. Tego typu zestawienia są oczywiście o wiele bardziej wiarygodne. Dane pomiarowe uzyskane zostały od producenta turbin (ABB Zamech – pomiary na różnych blokach) oraz z Elektrowni „Połaniec” (pomiary na bloku nr 1). Dane obliczeniowe uzyskane zostały z wykorzystaniem środowiska MESWIR, czyli w



Rys. 3.38. III-cia forma i częstotliwość drgań własnych oraz prędkość krytyczna linii wirników turbozespołu 13K215. Porównanie wyników obliczeń programem DIATER i DYNWIR-S z wynikami obliczeń producenta – szkic poniżej

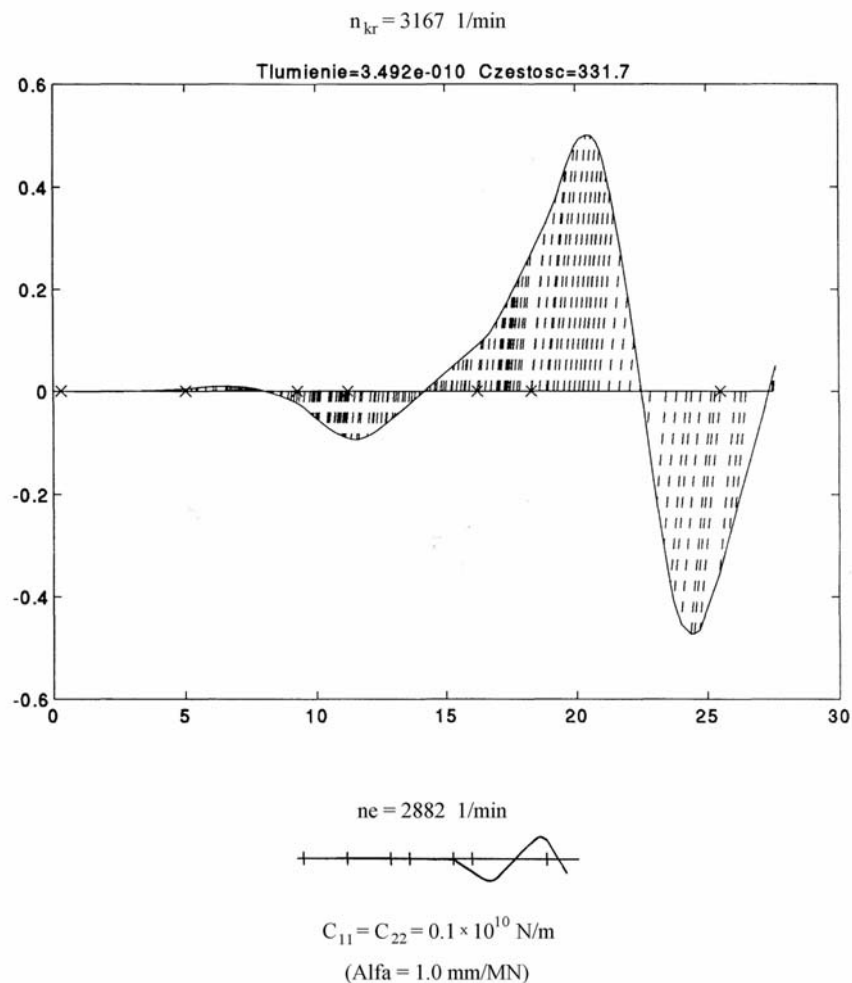
pierwszych etapie za pomocą programów DIATER i DYNWIR-S. W obliczeniach uwzględnione zostały pełne dostępne dane wyszczególnione zarówno w banku danych (podrozdział 3.3.2.1) jak i dane wynikające z określonych szacunków co do np. warunków wymiany ciepła w łożyskach czy też przemieszczeń podpór. Wygenerowanych zostało kilkanaście form i częstotliwości drgań własnych przyjętego układu z rys. 3.19. Pozostaje jednak podstawowy problem, właściwy dla każdej



Rys. 3.39. IV-ta forma i częstotliwość drgań własnych oraz prędkość krytyczna linii wirników turbozespołu 13K215. Porównanie wyników obliczeń programem DIATER i DYNWIR-S z wynikami obliczeń producenta – szkic poniżej

analizy drgań swobodnych, a mianowicie, która z wyszczególnionych teoretyczne tak licznych częstotliwości własnych układu „ujawni się” w rzeczywistości, czyli inaczej mówiąc będzie miała wystarczająco słabe tłumienie aby zaistnieć. Podawane jako wynik obliczeń wartości tłumienia mogą być bowiem obarczone zbyt dużym błędem.

Zaproponowana została zatem metoda sprawdzania „siły” poszczególnych częstotliwości drgań własnych układu za pomocą analizy drgań wymuszonych. Jeśli pobudzimy do drgań poszczególne elementy maszyny, za pomocą np. silnego



Rys. 3.40. V-ta forma i częstotliwość drgań własnych oraz prędkość krytyczna linii wirników turboszczepu 13K215. Porównanie wyników obliczeń programem DIATER i DYNWIR-S z wynikami obliczeń producenta – szkic poniżej

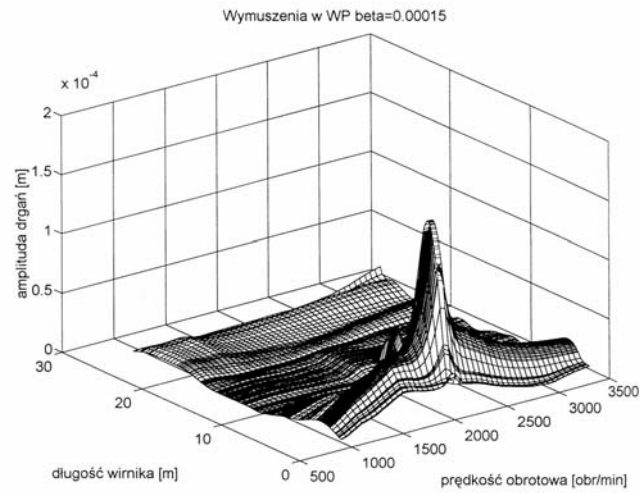
niewyważenia, to możemy następnie, drogą obliczeń numerycznych, prześledzić wszystkie prędkości rezonansowe i porównać je z częstotliwościami drgań własnych układu. Okazuje się, że nie wszystkie częstotliwości drgań własnych będziemy mogli przyporządkować odpowiednim rezonansom. Dokonałismy w ten sposób swego rodzaju filtracji częstotliwości drgań własnych. Można tak założyć, ponieważ jeśli określona forma drgań jest rzeczywiście słabo tłumiona, a więc jest „silna”, to

musi się ujawnić jako rezonans (prędkość krytyczna układu) przy drganiach wymuszonych. Obliczenia drgań wymuszonych układu przeprowadzono za pomocą programu NLDW, a więc z uwzględnieniem wszystkich ewentualnych nieliniowości występujących w układzie, co oczywiście podwyższa dokładność analizy. Rysunki 3.41 do 3.44 przedstawiają przestrzenne amplitudy drgań układu przy wymuszeniach przyłożonych w poszczególnych częściach turbiny (WP, SP, NP i generatora). Wymuszenia te stanowią ekstremalnie silne, hipotetyczne niewyważenia, które wyraźnie uwidaczniają całe pole rezonansów układu w pobliżu tych odcinków linii wirników maszyny. Pozwala to na wyraźną identyfikację częstotliwości drgań własnych układu.

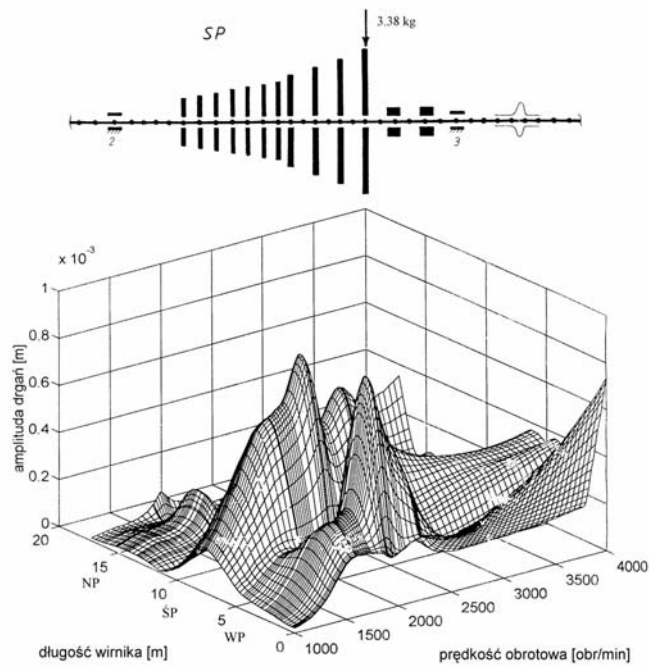
Zestawienie wyników pomiarów prędkości krytycznych i wyników obliczeń z zastosowaniem zaproponowanej metodologii badań przedstawia tabela nr 3.3. Widać z niej, iż tylko niektóre częstotliwości drgań własnych znalazły swe potwierdzenie w analizie drgań wymuszonych i to akurat te, które dobrze odpowiadają wartościom prędkości krytycznych pomierzonych eksperymentalnie. Tabela nr 3.3 jest więc doskonałym potwierdzeniem zaproponowanej metodologii badań i tym samym zaproponowanych narzędzi badawczych.

Tabela 3.3. Zestawienie wartości prędkości własnych obliczonych za pomocą programów DIATER i DYNWIR-S i potwierdzonych za pomocą analizy drgań wymuszonych z użyciem programu NLDW (pola zaznaczone kolorem żółtym) z prędkościami krytycznymi pomierzonymi przez ekipy producenta (ABB-Zamech) i dysponenta obiektu (El. Połaniec)

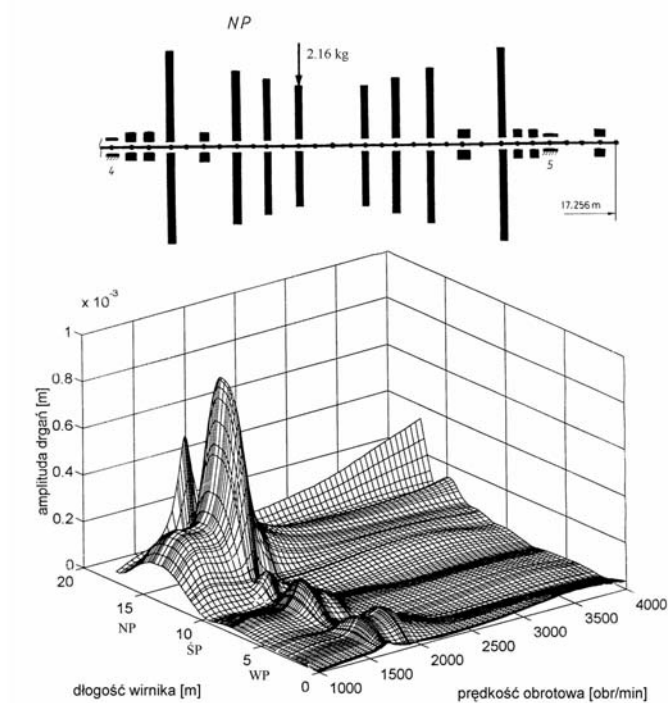
Postać od wirnika	Prędkości krytyczne		
	Obliczenia IMP PAN	Pomiary ABB-Zamech	Pomiary w El. Połaniec blok I czerwiec '94)
G	1040	900-1150	900-1100 I przedz. prędk. kryt.
	1276 1291 1319		
NP	1524	1500-1750	1500-2100
SP	1967	1800-2100	II przedz. predk. kryt.
WP	2121 2239 2384 2419	2150-2550	
	2750		2700-2950
	2974		III przedz. prędk. kryt.



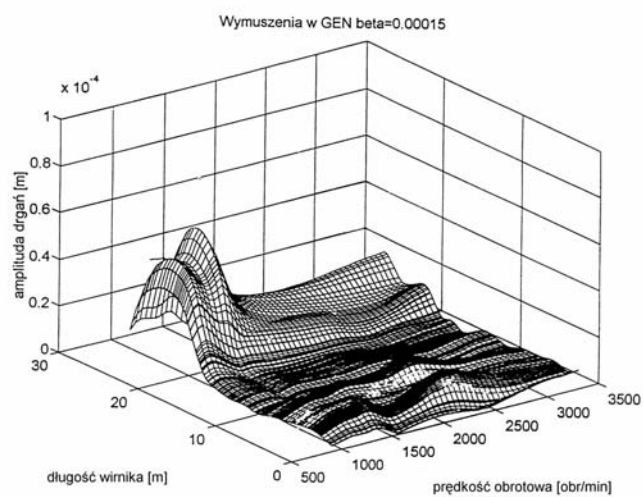
Rys. 3.41. Przestrzenne amplitudy drgań układu przy wymuszeniu w części wysokoprężnej turbiny (silne niewyważenie)



Rys. 3.42. Przestrzenne amplitudy drgań układu przy wymuszeniu w części średnioprężnej



Rys. 3.43. Przestrzenne amplitudy drgań układu przy wymuszeniu w części nisko-prężnej



Rys. 3.44. Przestrzenne amplitudy drgań układu przy wymuszeniach w generatorze

3.3.3 Przypadek referencyjny

Dla celów związanych z budową BAZ WIEDZY systemów diagnostycznych nowej generacji zaszła konieczność generowania danych uczących i na ich bazie „trenowania” układów adaptacyjnych. Zadanie takie zostało postawione w ramach kolejnego, dużego Projektu Badawczego Zamawianego PBZ K015/T10/2001 [3.1]. W projekcie tym opracowane narzędzia badawcze w postaci środowiska MESWIR odegrało kluczową rolę, o czym powiemy więcej w następnym podrozdziale. Przy tak postawionym zadaniu kwestią niezmiernie istotną było dokładne dostrojenie modelu do obiektu rzeczywistego, tak aby mógł on być generatorem danych dla budowy wzorcowych katalogów relacji diagnostycznych. Zaszła więc konieczność uwzględnienia w procesie dostrajania również oddziaływań aerodynamicznych w turbinie i magnetycznych w generatorze. W tym przypadku w procesie weryfikacji i dostrajania systemu MESWIR koniecznym stało się wykorzystanie wyników badań wielu innych zespołów zawierających tego rodzaju informacje [3.1].

Jako obiekt badań wybrany został ten sam turbozespół 13K215 pracujący na bloku 7 w Elektrowni „Kozienice” (był on przedmiotem badań w poprzednim podrozdziale), ale po udanej modernizacji. Dlatego też został on uznany za swego rodzaju obiekt wzorcowy, do którego dostrajane będą wszystkie posiadane narzędzia badawcze. Na obiekcie tym, również po modernizacji, nadal pracował system DT-200, co oczywiście miało duże znaczenie z punktu widzenia założonych celów. Obiekt ten został wybrany również dlatego, że spełniał wszystkie wymagania norm eksploatacyjnych, w tym zwłaszcza dotyczących drgań węzłów łożyskowych i innych elementów.

Zastosowanie narzędzi badawczych w postaci systemu MESWIR a zwłaszcza programu NLDW do budowy relacji diagnostycznych właściwych dla przyjętego, konkretnego obiektu wymaga określenia przypadku referencyjnego (wzorcowego lub bazowego), do którego odnoszone będą wszystkie dalsze badania a zwłaszcza modelowane będą defekty i drogą komputerowej symulacji pozyskiwane będą ich symptomy. Z drugiej strony tak pomyślany przypadek referencyjny jest też, w swej istocie, kolejnym i ważnym etapem w procedurze weryfikacji opracowanych narzędzi badawczych. Z tych też powodów przedstawiamy go w niniejszym rozdziale.

Procedura dostrajania modelu w tym przypadku wymaga kilku uwag wstępnych.

Dane do systemu NLDW można podzielić na dwie grupy. Pierwszą stanowią dane stałe, których nie można zmieniać, lub które są dokładnie znane. Należą do nich parametry geometryczne i konstrukcyjne maszyny, a także ściśle określone niektóre parametry ruchowe.

Drugą grupę stanowią dane, których nie można zmierzyć na obiekcie rzeczywistym, lub takie, które znane są z pomiarów na obiektach tej samej klasy, a dla badanego turbozespołu określony jest tylko zakres ich zmienności.

W procesie identyfikacji wartości danych z drugiej grupy są dobierane w taki sposób aby wyniki obliczeń były zgodne z parametrami pracy maszyny zarejestrowanymi przez systemy pomiarowe a zwłaszcza system DT-200. Uzyskanie zadawalającej zbieżności wyników teoretycznych i eksploatacyjnych pozwala uznać model

za dostrojony i tym samym może on stanowić podstawę do symulacji defektów i budowy relacji diagnostycznych.

3.3.3.1 Programy komputerowe

Do budowy przypadku referencyjnego wybrane zostały następujące programy stanowiące środowisko MESWIR (patrz podrozdział 3.1 – rys. 3.1):

KINWIR-I-LEW do zagadnień kinetostatycznych; program ten oparty jest na izotermicznym modelu łożyska, ze stałą średnią efektywną lepkością oleju w całej szczelinie smarnej oraz ze złożoną geometrią szczeliny smarnej w tym z kieszeniami lewarowymi. Do wyznaczenia tej lepkości zastosowano program **KINWIR-D** wykorzystujący diatermiczny model łożyska.

NLDW-LEW 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.

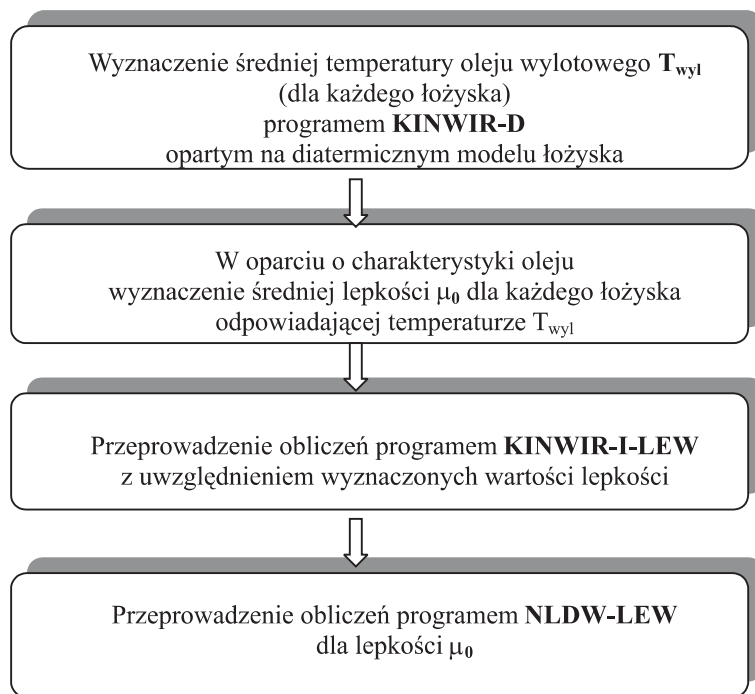
Celem przyspieszenia obliczeń i jednocześnie nie rezygnując zbyt mocno z dokładności opisu, zastosowana została uproszczona procedura obliczeń, którą można by określić jako pseudo-diatermiczną. Procedurę tą przedstawia rys. 3.45.

3.3.3.2 Dyskretyzacja MES linii wirników

Przedmiotem badań jest turbozespół wielkiej mocy, składający się z turbiny 13K215 po modernizacji i generatora TWW-230-2L pracującego jako blok 7 w Elektrowni „Kozienice”, który dalej nazywać będziemy turbozespołem 13K215. W oparciu o dokumentację techniczną i dane eksploatacyjne w IMP PAN w Gdańsku opracowany został model fizyczny a następnie model MES wspomnianego turbozespołu. Dyskretyzację MES linii wirników (o 145 elementach belkowych Timoszenki) dla zagadnień kinetostatyki i dynamiki przedstawiają rys. 3.46 oraz 3.47. Schemat numeracji węzłów w zagadnieniach kinetostatyki (rys. 3.47) jest inny niż w zagadnieniach dynamiki (rys. 3.46), chociaż liczba elementów skończonych pozostaje taka sama.

3.3.3.3 Identyfikacja obciążeń działających w układzie

Z uwagi na przyjętą koncepcję modelowania w dynamice wirników polegającą na wyraźnym rozdzieleniu 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,



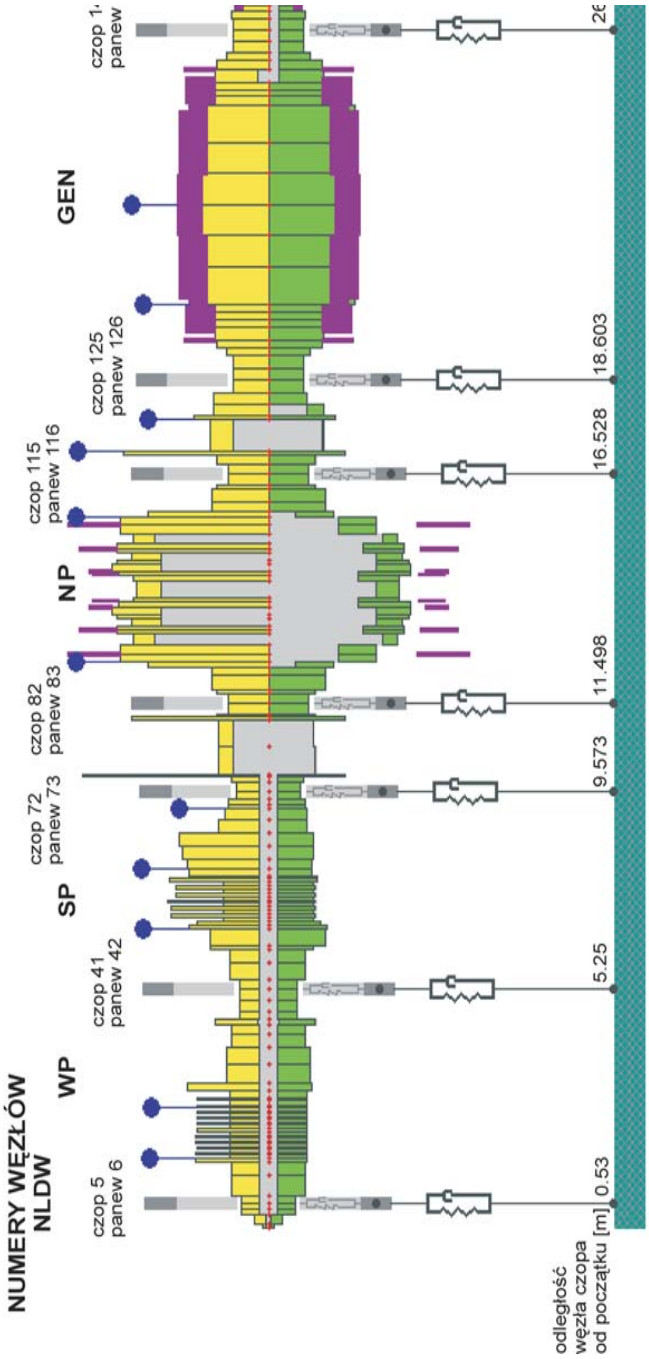
Rys. 3.45. Schemat obliczeń pseudo-diatermicznych zastosowany przy budowie przypadku referencyjnego

uzwojenia w generatorze, jak również części stałej sił dynamicznych, np. sił aerodynamicznych, czy naciągu magnetycznego w generatorze.

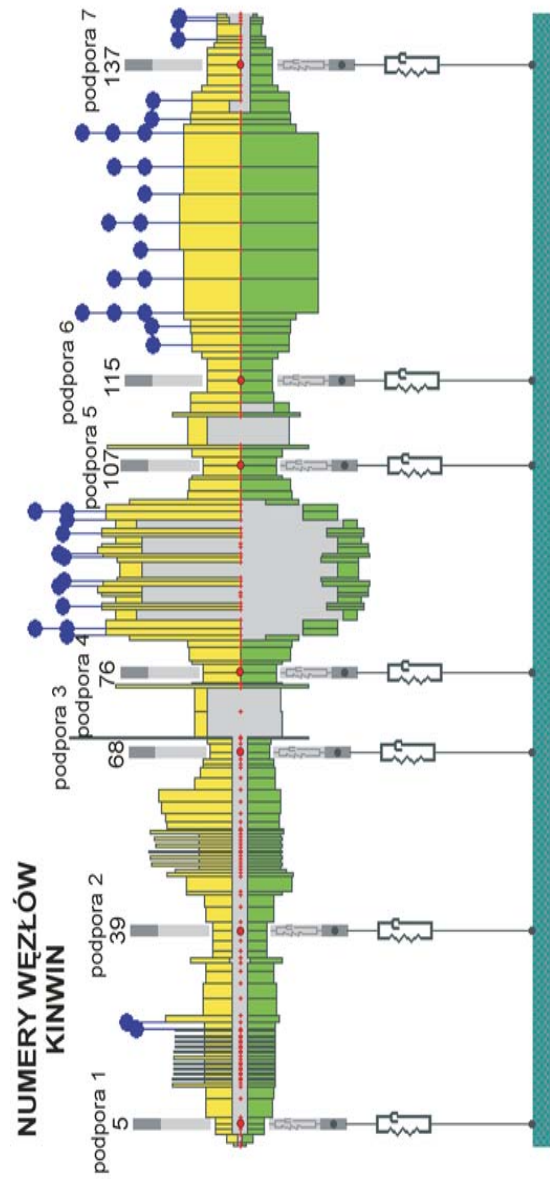
W tym kontekście używane dalej określenie *siła kinetostatyczna* oznacza stałą co do wartości siłę lub moment działający na obracający się wał wirnika.

Siły wymuszające działające na układ mogą być teraz zaklasyfikowane do następujących grup:

- **siły mechaniczne** działające na system, których wartości przyjmowane są w oparciu o dokumentację techniczną turbosespołu:
 - część kinetostatyczną* stanowią tu siły i momenty obciążające pochodzące od dysków ewentualnie uzwojeń w generatorze,
 - część dynamiczną* stanowią niewyważenia reszkowe 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,



Rys. 3.46. Model MES linii wirników turbozespołu 13K215 – numeracja dla zagadnień dynamicznych



Rys. 3.47. Model MES linii wirników turboszespołu 13K215 – numeracja dla zagadnień kinetostatycznych

część dynamiczną składowa zmienna oscylująca z częstotliwością równą podwójnej prędkości obrotowej wirnika.

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

Wymuszenia aerodynamiczne

Siły te zostały określone na drodze obliczeniowej [3.1] 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-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 KINWIR-D w odpowiednich węzłach. Dzięki temu do programu NLDW zostały wprowadzone czyste wymuszenia dynamiczne.

Naciąg magnetyczny

Głównym źródłem sił wymuszających drgania w generatorze [3.1] 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** (opisanego w [3.1] utworzonego specjalnie do tego celu.

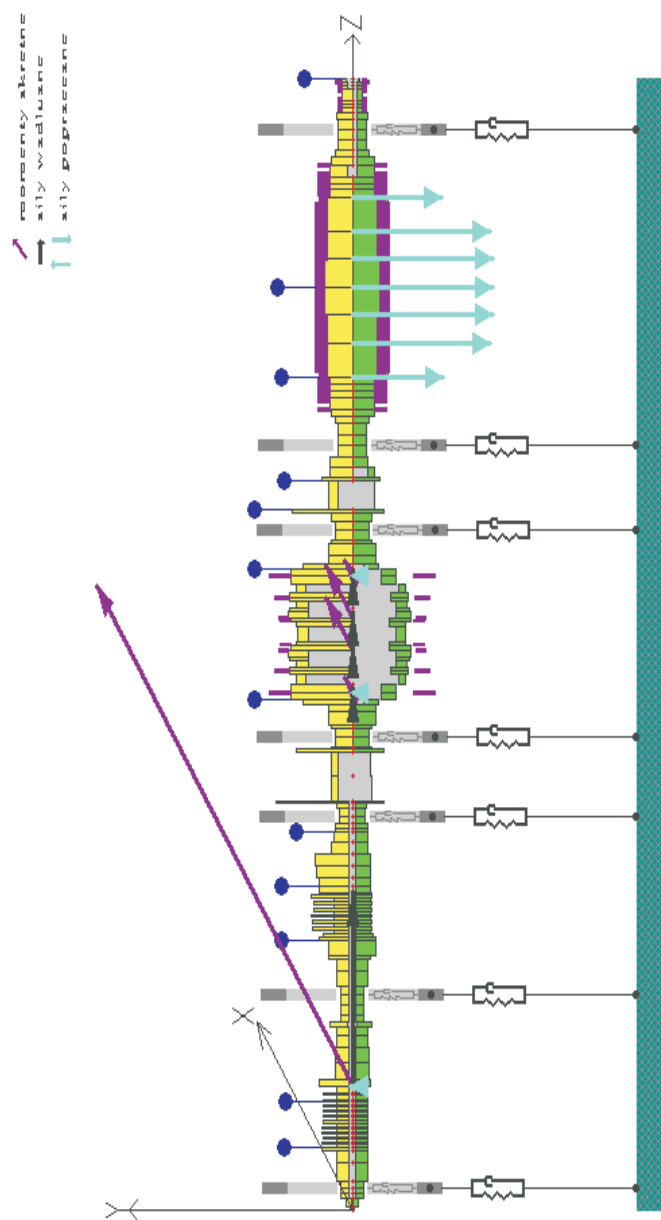
Wielkość sił naciągu zależy m. in. od stopnia ugięcia wirnika generatora, od przemieszczenia podpór łożysk generatora i od przemieszczenia osi wirnika względem osi stojana. Ugięcie wirnika zależy z kolei od wielkości sił naciągu generatora. W ten sposób wielkości te są wzajemnie sprzężone i naciąg generatora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

Siły kinetostatyczne

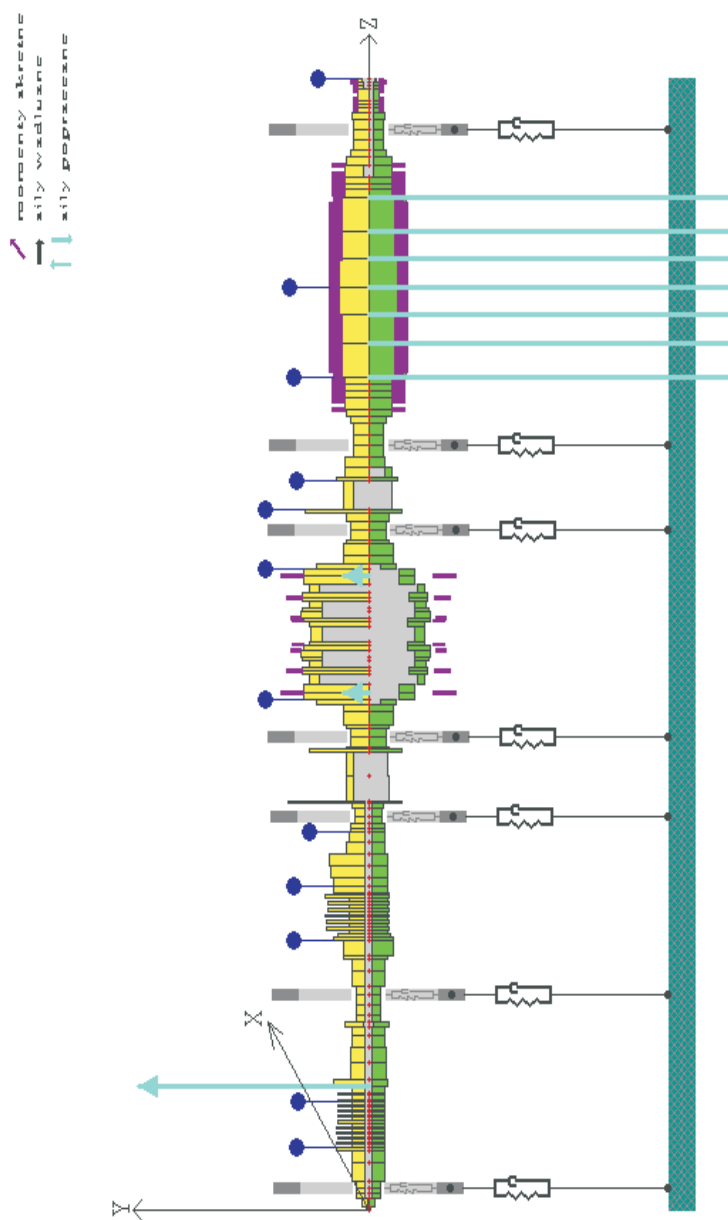
Części kinetostatyczne sił działających na układ uwzględniane są w obliczeniach programami KINWIR-D i KINWIR-I-LEW. Są one wprowadzane do programu, jako obciążenia kinetostatyczne czytane z pliku. Po przeprowadzeniu procedury „odsiania” stałej okazało się, że części kinetostatyczne poprzecznych sił aerodynamicznych dla przypadku „nominalnego” i „ekstremalnego” pozostają takie same. Wartości obciążeń kinetostatycznych przyjętych do obliczeń zestawione zostały w tab 3.4÷3.6.

Z uwagi na przyjęty model w obliczeniach kinetostatycznych uwzględniane są części stałe tylko sił poprzecznych, stąd w tab. 3.4 nie uwzględniono sił wzdłużnych i momentów skrętnych.

Na rys. 3.47 siły oznaczone są symbolem „ $\uparrow$ ”, widoczne jest również położenie węzłów o numerach podanych w tab. 3.4÷3.6.



Rys. 3.48. Reprezentacja graficzna sił dynamicznych: symbol $\blacktriangleright$ oznacza niewyważenia resztkowe; siły poprzeczne i wzdłużne w jednej skali



Rys. 3.49. Poprzeczne siły aerodynamiczne na tle sił naciągu magnetycznego

Tabela 3.4. Wartości kinetostatycznych obciążeń mechanicznych

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

Siły dynamiczne działające na układ

Zewnętrzne obciążenia dynamiczne w formie niewyważień i dodatkowych sił poprzecznych, wzdłużnych i momentów skrętnych uwzględniane w obliczeniach programem NLDW-LEW przedstawione są w postaci graficznej na rys. 3.48 i 3.49. Siły aerodynamiczne i naciągu generatora wprowadzane są z plików zawierających czasowe przebiegi tych sił. Rysunek 3.50 ilustruje postać w jakiej są one wprowadzane do programu.

Siły aerodynamiczne

Wstępna analiza wyników otrzymanych w badaniach oddziaływań aerodynamicznych [3.1] doprowadziła do określenia elementów, w których wpływ tych oddziaływań na wirnik jest zauważalny i powstania dwóch zestawów sił aerodynamicznych: nominalnego i ekstremalnego.

Tabela 3.5. Wartości kinetostatycznych obciążeń aerodynamicznych

CZĘŚCI STAŁE (KINETOSTATYCZNE) SIŁ AERODYNAMICZNYCH			
numer węzła	numer kierunku	kierunek	siła [N]
30	117	X	2631,71
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

Tabela 3.6. Wartości kinetostatycznych obciążeń magnetycznych

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

W tabelach 3.7, 3.8, 3.9 podane są wartości maksymalnych amplitud sił aerodynamicznych dla obydwu zestawów.

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 ABB-Zamech w Elblągu. Ponieważ jednak niewyważenie wirnika może się w czasie eksploatacji maszyny zmienić, należy uznać, że jest ono w istocie nieznane. Wyniki badań z odwirowni zostały zatem przyjęte jako „wyjściowe”. W toku prac dostrojowych modelu zostały one nieznacznie zmodyfikowane. Wartości te podane zostaną w kolejnym podrozdziale.

Tabela 3.7. Maksymalne amplitudy aerodynamicznych sił poprzecznych

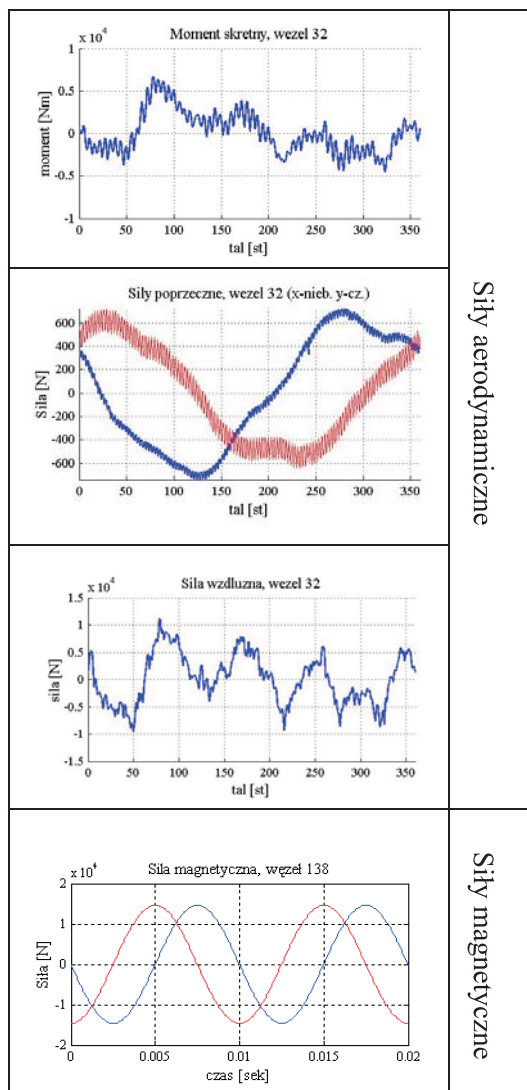
Siły poprzeczne			
Nr węzła	Stopień	Amp. max przypadek ekstremalny	Amp. max przypadek nominalny
32	Regulacyjny (WP)	734,23	734,23
90	Ostatni (NP)	176,01	176,01
109	Ostatni (NP)	176,01	176,01

Tabela 3.8. Maksymalne amplitudy sił wzdłużnych

Siły wzdłużne			
Nr węzła	Stopień	Amp. max przypadek ekstremalny	Amp. max przypadek nominalny
32	Regulacyjny (WP)	10 348,00	1 241,40
90	Ostatni (NP)	303,80	49,40
97	Upust (NP)	378,00	42,50
102	Upust (NP)	378,00	42,50
109	Ostatni (NP)	303,80	49,40

Tabela 3.9. Maksymalne amplitudy momentów skrętnych

Momenty skrętne			
Nr węzła	Stopień	Amp. max przypadek ekstremalny	Amp. max przypadek nominalny
32	Regulacyjny (WP)	5 653,80	259,95
90	Ostatni (NP)	164,35	164,35
97	Upust (NP)	584,30	42,50
102	Upust (NP)	584,30	42,50
109	Ostatni (NP)	164,35	164,35



Rys. 3.50. Przykładowe przebiegi sił aerodynamicznych i magnetycznych

Siły naciągu magnetycznego w generatorze

W wyniku obliczeń programem **nac_mgt** prof. Dąbrowskiego [3.1] 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. 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. 3.10).

Tabela 3.10. Zamiana dyskretyzacji wirnika generatora

Nr węzła (NLDW)	Numery odcinków wału wg nac_mgt
135	1, 2
136	3, 4, 5
137	6, 7, 8
138	9, 10, 11
139	12, 13, 14
140	15, 16, 17
141	18, 19

Procedurę dostrajania modelu rozpoczęto przyjmując naciągi stanowiące wyniki obliczeń programem **nac_mgt** dla danych zebranych w tab. 3.11. Wartości te podane zostaną w kolejnym podrozdziale.

3.3.3.4 Procedura dostrajania

Podstawowymi danymi dla budowy przypadku referencyjnego, tzn. danymi, do których dostrajamy nasz model, są parametry pracy turbozespołu zarejestrowane 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 $\cos \varphi = 0,94$. Karta diagnostyczna dla tego przypadku zaczerpnięta z [3.1] jest przedstawiona na rys. 3.52. 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.

Wyniki procedury dostrajania modelu:

I. Kompleksowe współczynniki tłumienia w elementach

Tłumienie wewnętrzne w elementach wirników opisują dwa współczynniki:

α — uzależniający tłumienie wewnętrzne od bezwładności elementu,

β — uzależniający 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”.

Tabela 3.11. Dane do obliczeń sił naciągu generatora dla wstępnego przypadku bazowego

Wielkość	Oznaczenie	Łożysko nr 6	Łożysko nr 7
Średnica łożyska	D [m]	0,4	0,4
Szerokość łożyska	L [m]	0,5	0,4
Luz łożyskowy obliczen.	C [μm]	885	245
Luz łożyskowy poziomy	ΔR_H [μm]	885	245
Luz łożyskowy pionowy	ΔR_V [μm]	485	235
Mimośrodowość wzgl.	ε [-]	0,49222	0,34783
Mimośrodowość bhwzgl.	e [μm]	435,6	85,22
Kąt linii środków	γ [stop]	334,833	335,866
Przemieszcz. czopa poz.	δ_{cx} [μm]	394,25	77,77
Przemieszcz. czopa pion.	δ_{cy} [μm]	-185,24	-34,84
Przemieszcz. panwi poz.	δ_{px} [μm]	394,25	77,77
Przemieszcz. panwi pion.	δ_{py} [μm]	-185,24	-34,84
Przemieszcz. montaż. poz.	a_{my} [μm]	-394,25	-77,77
Przemieszcz. montaż. pion.	a_{mx} [μm]	185,24	34,84
Sztywność podparcia poz.	C_{xx} [N/m]	4,822e10	2,044e10
Sztywność podparcia pion.	C_{yy} [N/m]	4,936e10	1,399e11
Podatność podparcia poz.	G_y [m/N]	2,074e-11	4,892e-11
Podatność podparcia pion.	G_x [m/N]	2,026e-11	7,148e-12
Moc czynna generatora	N_c [MW]	211,25	211,25
Moc całkowita generatora	N_p [MW]	223,75	223,75
Współcz. mocy generatora	$\cos\varphi$ [-]	0,94	0,94
Stopień obciążenia gen.	k_i [-]	0,973	0,973

W wyniku procesu dostrajania ustalono następujące wartości tych współczynników:

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

II. Współczynniki sztywności i tłumienia podpór

W ramach prac prowadzonych w PBZ K015/T10/2001 [3.1] opracowano model MES korpusów i stojaków w oparciu o dokumentację techniczną. Metodami przestrzennej analizy komputerowej, przy wykorzystaniu znanych programów komercyjnych, wyznaczono macierze sztywności, tłumienia i mas w miejscach podparcia łożysk. Wyniki tych obliczeń zweryfikowano uwzględniając wyniki pomiarów na rzeczywistym obiekcie [3.1]. Były to dane z pomiarów koncernu ABB-Zamech w Elblągu. Ostatecznie przyjęte do obliczeń wartości zestawione zostały w tabeli 3.12.

III. Wielkości sił niewyważenia resztkowego

Wielkości te zostały wyznaczone w oparciu o badania podobnego wirnika

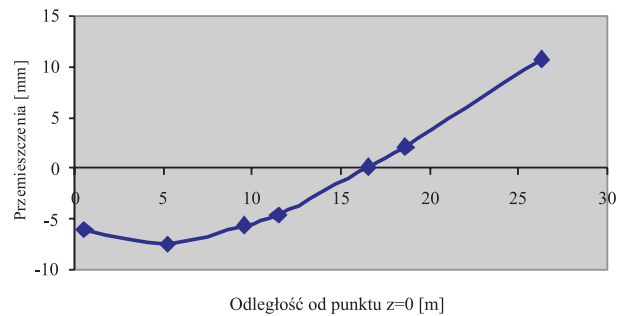
Tabela 3.12. Współczynniki sztywności dynamicznej podpór

	Numer podpory						
	1	2	3	4	5	6	7
X [N/m]	$2,0 \cdot 10^9$	$2,0 \cdot 10^9$	$2,0 \cdot 10^9$	$2,8 \cdot 10^9$	$1,3 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^9$	$5,0 \cdot 10^9$
Y [N/m]	$2,0 \cdot 10^9$	$2,0 \cdot 10^9$	$2,0 \cdot 10^9$	$2,4 \cdot 10^9$	$1,8 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^9$	$5,0 \cdot 10^9$

w odwirowni w ABB- Zamech w Elblągu. Wyniki badań zmodyfikowano w nieznacznym stopniu porównując je z danymi eksploatacyjnymi dla bloku 7 w Elektrowni „Kozienice”. Ostatecznie zbiór wartości charakteryzujących rozkład sił niewyważenia resztkowego zawarty w tab. 3.13 został ustalony w procesie dostrajania modelu.

IV. Kształt gorącej linii kinetostatycznej

Do obliczeń przyjęto zestaw parametrów opartych na pomiarach przeprowadzonych na bloku 7 w Elektrowni „Kozienice”. Przesunięcia podpór względem linii geodezyjnej zestawiono w tab. 3.14. Przyjęto, że wartości przemieszczeń poziomych, których pomiary nie są prowadzone, są zerowe. Rysunek 3.51 przedstawia wynikowy kształt tak określonej linii kinetostatycznej.



Rys. 3.51. Kształt linii kinetostatycznej wirnika dla przyjętych jako bazowe przemieszczeń montażowych panwi; symbole $\diamond$ oznaczają kolejne łożyska

V. Naciągi magnetyczne

W toku prac przyjęto wariant maksymalnych sił naciągu magnetycznego wyznaczanych programem **nac.mgt**.

Zbiory wartości zostały wygenerowane na podstawie następujących wzorów:

$$N_x = N_{zm} * \sin(2\omega t),$$

$$N_y = -N_{zm} * \cos(2\omega t) - N_{st},$$

Tabela 3.13. Charakterystyka sił niewyważenia resztkowego

Masa niewyważenia [kg]	Promień niewyważenia [m]	Położenie niewyważ. [stopnie]	Nr węzła przyłożenia [-]	Krotność wirowania niewyważ.
0,132	0,320	0,000	11	1,000
0,128	0,335	0,000	28	1,000
0,080	0,655	0,000	48	1,000
0,104	0,492	0,000	64	1,000
0,240	0,430	0,000	69	1,000
0,100	0,690	226,000	89	1,000
0,240	0,690	137,000	110	1,000
0,056	0,425	0,000	120	1,000
0,064	0,373	0,000	121	1,000
0,168	0,102	0,000	135	1,000
0,168	0,102	0,000	138	1,000
0,053	0,166	0,000	160	1,000

Tabela 3.14. Wartości przemieszczeń środków panwi

Przemieszczenia	Numer podpory						
	1	2	3	4	5	6	7
X [mm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Y [mm]	-6,0	-7,4	-5,6	-4,6	0,2	2,1	10,8

gdzie N_{st} i N_{zm} są wielkościami występującymi w tab. 3.15, pogrupowanymi odpowiednio i przypisanymi węzłom według wcześniej opisanego klucza.

Tabela 3.15 zawiera przyjęte jako „bazowe” wartości stałej i zmiennej składowej sił naciągu wzdłuż długości wirnika.

Tabela 3.15. Zamiana dyskretyzacji wirnika generatora

Nr węzła (NLDW)	N_{st}	N_{zm}
135	13 304	9389
136	20 374	14378
137	20 691	14600
138	20 776	14623
139	20 623	14555
140	20 242	14285
141	13 181	9302

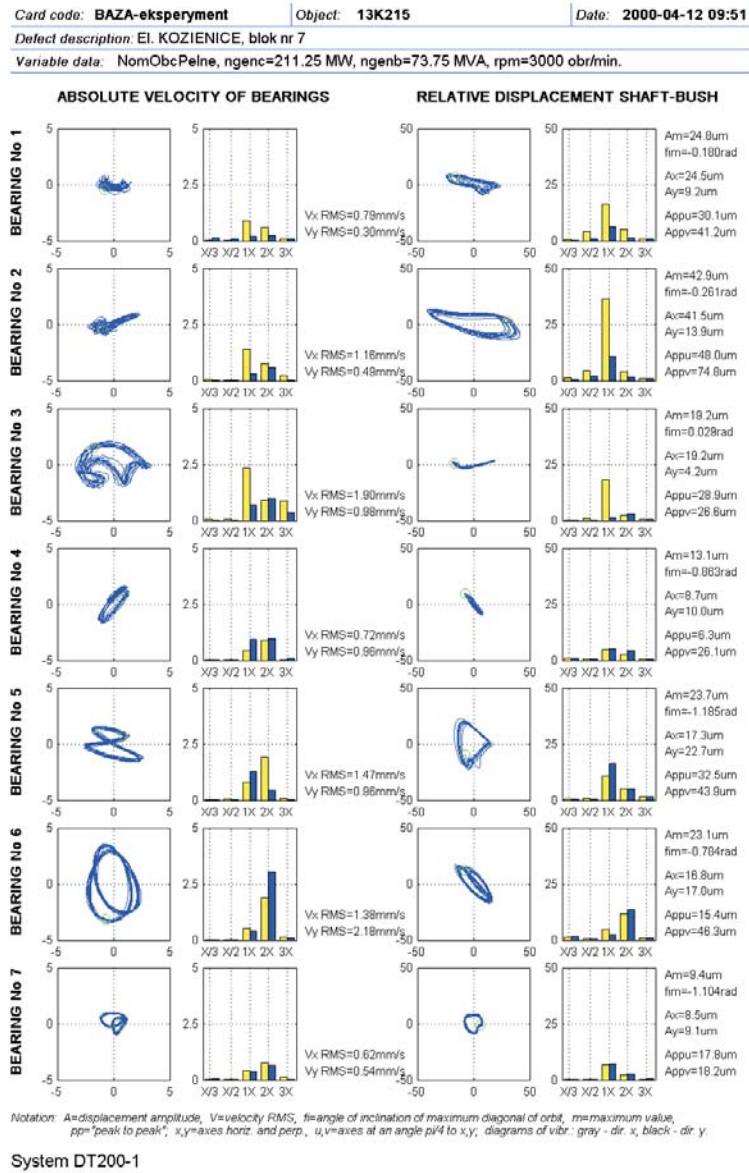
Ostateczne wyniki obliczeń, dla odpowiednio dostrojonych danych wejściowych, przedstawia rys. 3.53. Jest to tzw. „prędkościowa” karta diagnostyczna przedstawiająca zmiany prędkości bezwzględnych panwi i przemieszczeń czopów, co umożliwia bezpośrednie porównania w danymi eksperymentalnymi czyli w tym przypadku z kartą eksperymentalną przedstawioną na rys. 3.52. Zwraca tu uwagę dobre odwzorowanie charakteru zmian prędkości bezwzględnych panwi i składowej $2X$ w widmie drgań dla łożyska nr 6 (najbardziej newralgicznego pod względem dynamicznym) a także, generalnie rzecz ujmując, dość dobre jakościowe odwzorowanie przebiegu widm dla pozostałych łożysk. Oczywiście, uzyskanie pełnej zgodności ilościowej, biorąc pod uwagę skalę złożoności obiektu i modelu, a przede wszystkim brak szeregu danych wejściowych do obliczeń, jest praktycznie niemożliwe. Autorowi niniejszej monografii nie są znane przykłady z dostępnej literatury fachowej w których odwzorowywane teoretycznie by były wyższe składowe widm drgań (typu $2X, 3X$ itd.) dla tak złożonych obiektów technicznych.

W efekcie przeprowadzenia procedury strojenia modelu i zaakceptowaniu wyników przedstawionych na rys. 3.53, można łatwo (po formalnych przekształceniach) zbudować typową tzw. „przemieszczeniową” kartę diagnostyczną, którą przyjmujemy do dalszych badań. Kartę taką przedstawia rys. 3.54. W karcie tej przedstawione są wyłącznie trajektorie przemieszczeń zarówno bezwzględnych panwi jak i względnych czop-panew – stąd określenie „przemieszczeniowa”.

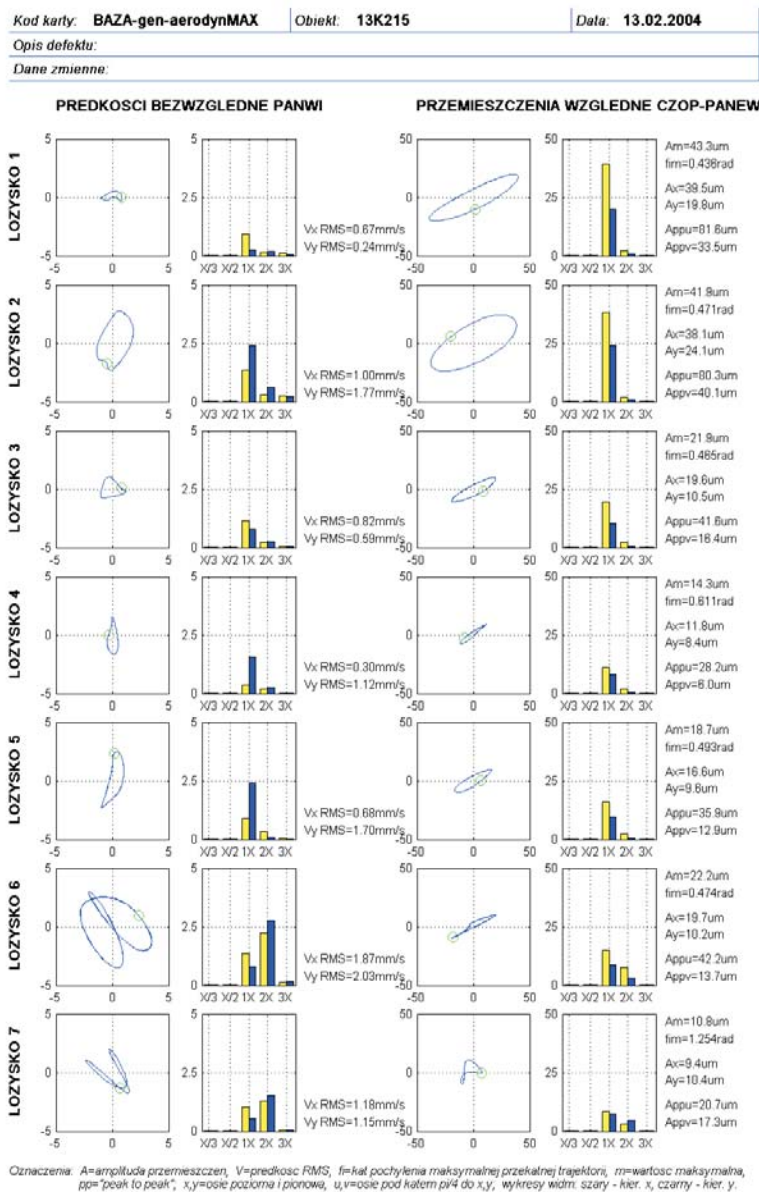
Rysunek 3.55 przedstawia przebieg trajektorii drgań bezwzględnych poszczególnych węzłów wzdłuż linii wirników (WP, SP, NP i generatora) dla przyjętego, w efekcie procedury strojenia modelu, zestawu danych. Pominięte tu zostały kinetostatyczne ugięcia linii wirników spowodowane zarówno ciężarem wirnika jak i oddziaływaniami kinetostatycznymi. Zestawienie przemieszczeń kinetostatycznych i dynamicznych przedstawia natomiast rys. 3.56. Warto tu zwrócić uwagę na fakt, iż odkształcenia kinetostatyczne wirnika są ok. 300 razy większe niż dynamiczne (na rysunku zaszła konieczność zastosowania innej skali dla przemieszczeń dynamicznych).

Rysunek 3.57 przedstawia zestawienie trajektorii drgań względnych czop-panew (względnych filmu olejowego) i bezwzględnych panwi dla wszystkich łożysk przyjętego obiektu, natomiast rys. 3.58 zestawienie trajektorii drgań względnych filmu olejowego na tle geometrii luzów łożyskowych (w tej samej skali). Dla łożysk od Ł1 do Ł6 szczelina smarna ma kształt soczewki, natomiast łożysko Ł7 ma typowy luz kołowo-cylindryczny. Rysunek 3.58 uwiadamia, jak małe są przemieszczenia dynamiczne czopów na tle całej szczeliny smarnej. Taki stan jest oczywiście pożądanym w każdych warunkach pracy maszyny, nie tylko tej uznanej za wzorcową i przyjętej jako przypadek referencyjny.

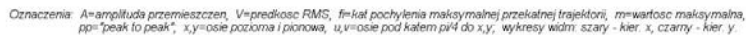
Przedstawiony w tym podrozdziale przypadek referencyjny (bazowy) posłuży nam do przeprowadzenia badań właściwych dla diagnostyki według modelu, a więc do badań nakierowanych na pozyskiwanie różnego rodzaju relacji diagnostycznych. Badania te będą przedmiotem kolejnych rozdziałów niniejszej książki. Jakiegokolwiek związku typu defekt-symptom spróbowalibyśmy zbudować, to zawsze potrzebny nam będzie punkt odniesienia do maszyny uznanej za wzorcową, a więc pracującej bez modelowanych defektów.



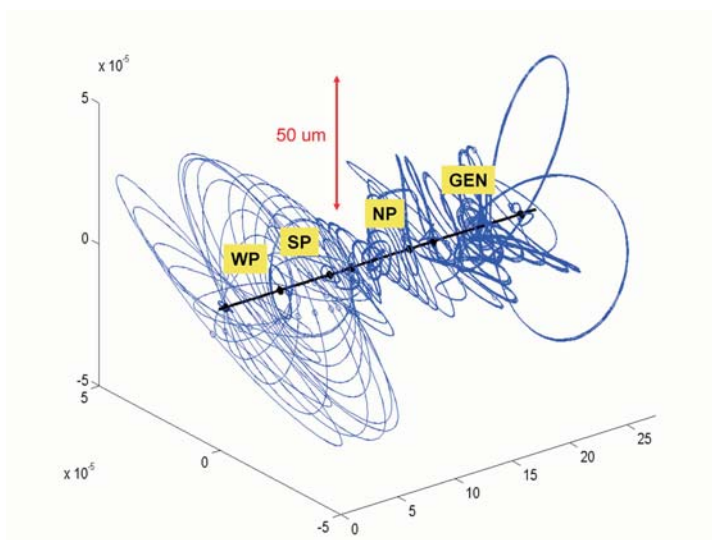
Rys. 3.52. Eksperymentalna karta diagnostyczna. Wyniki pomiarów na obiekcie rzeczywistym za pomocą systemu DT200 (turbozespół 13K215 blok 7 w Elektrowni „Kozienice”)



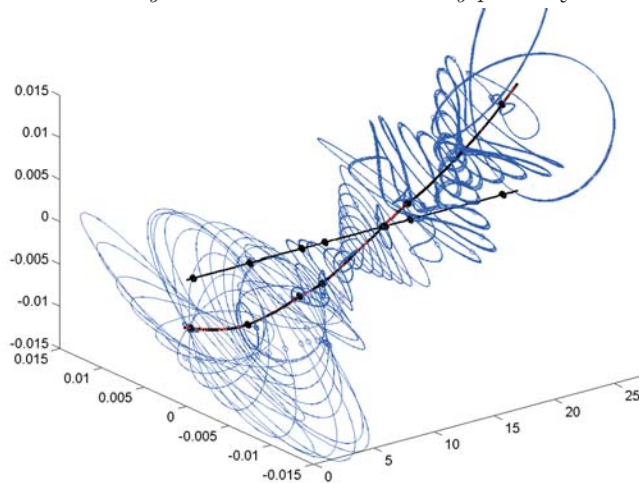
Rys. 3.53. Bazowa „prędkościowa” karta diagnostyczna. Efekt dostrojenia modelu do danych pomiarowych na obiekcie rzeczywistym. Drgania względne w płaszczyźnie czujnika i skala umożliwiające porównanie z kartą prezentowaną na rys. 3.52



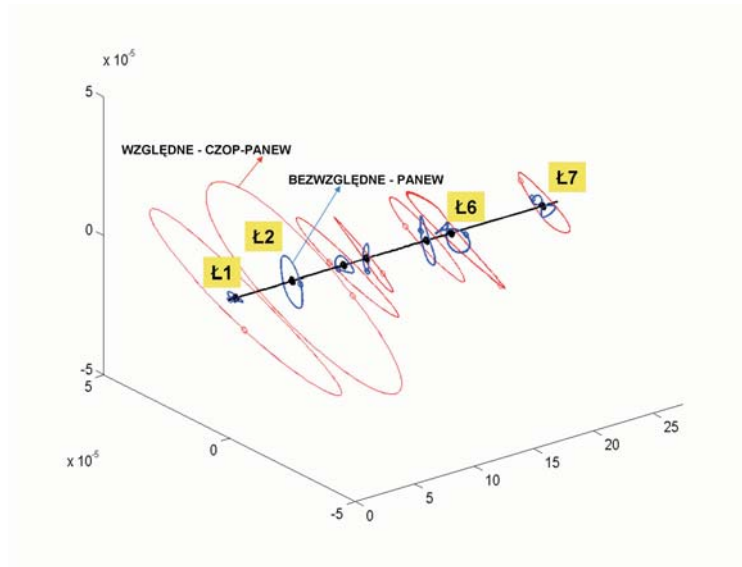
Rys. 3.54. Typowa „przemieszczeniowa” karta diagnostyczna dla przypadku referycyjnego (efekt przekształcenia karty z rys. 3.53)



Rys. 3.55. Przypadek referencyjny. Trajektorie przemieszczeń dynamicznych poszczególnych węzłów wzdłuż linii wirników turbozespołu 13K215 dla przyjętego w procesie strojenia zestawu danych wymuszających. Ugięcia kinostatyczne linii wirników zostały pominięte



Rys. 3.56. Przypadek referencyjny. Kinetostatyczne ugięcia grawitacyjne linii wirników w zestawieniach z przemieszczeniami dynamicznymi. Skala przemieszczeń dynamicznych została 300-krotnie powiększona w stosunku do skali rysunku ($0.015 = 300 \cdot 5 \cdot 10^{-5}$)

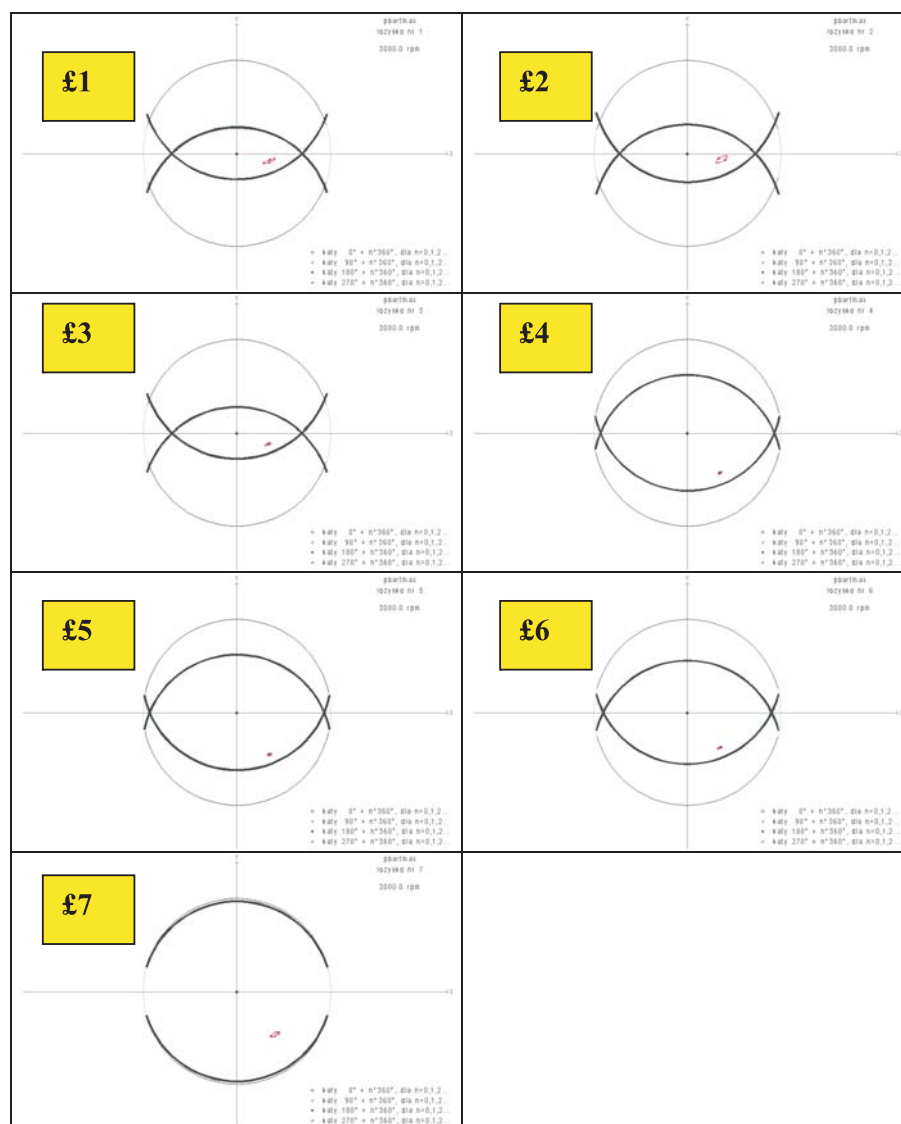


Rys. 3.57. Przypadek referencyjny. Przemieszczenia bezwzględne panwi (kolor niebieski) na tle przemieszczeń względnych czop-panew (kolor czerwony) w łożyskach turbos zespołu (Ł1-Ł7)

3.4 Przykłady aplikacji

Walory poznawcze i aplikacyjne systemu MESWIR jako całości a zwłaszcza poszczególnych jego części spowodowały, iż wykorzystywany jest on jako istotne źródło danych o obiekcie i narzędzie analizy jego stanu. Stanowił on główne narzędzie badań symulacyjnych w dwóch dużych ogólnopolskich Projektach Badawczych Zamawianych ustanowionych przez Komitet Badań Naukowych oraz w kolejnym trzecim aktualnie realizowanym. Były to następujące projekty:

- PBZ-038-06 pt. *Opracowanie nowoczesnych systemów diagnostycznych turbos zespołów krajowych bloków energetycznych dużej mocy*, realizowany w latach od 1995 do 2000 roku przez osiem zespołów badawczych. Efektem projektu był m.in. system nadzoru diagnostycznego DT-200 wdrożony w Elektrowni „Kozienice” – rys. 3.61 [3.4] .
- PBZ-KBN-025/T10/2000 pt: *Kompleksowy model sprzężonych oddziaływań aerodynamicznych, mechanicznych i elektrycznych zachodzących w obiektach energetycznych dużej mocy*, w którym uczestniczyło 13 zespołów badawczych z całego kraju. Efektem projektu były m.in. prototypowe katalogi relacji diagnostycznych i przykłady danych uczących dla systemów adaptacyjnych [3.1]
- PBZ-KBN-105/T10/2003 pt: *Zintegrowany dynamiczny system oceny ryzy-*



Rys. 3.58. Przypadek referencyjny. Trajektorie względne czop-panew (względne filmu olejowego) w płaszczyźnie luzów łożyskowych z uwzględnieniem ich geometrii (w jednej skali)

ka, diagnostyki oraz sterowania dla obiektów i procesów technicznych, w którym uczestniczą aktualnie (tzn. w roku 2005) 32 zespoły badawcze z różnych ośrodków naukowych uczelni wyższych, PAN i instytutów resortowych.

Szczególnie spektakularne są aplikacje systemu MESWIR nakierowane na budowę BAZ WIEDZY systemów nadzoru nowej generacji np.: systemu DT-200 – rys. 3.59 do 3.61. Opracowane narzędzia zostały zaimplementowane w system jako główne źródło pozyskiwania informacji diagnostycznych, czyli budowy relacji typu defekt-symptom. Sprzęgnięcie nowoczesnego systemu nadzoru eksploatacyjnego (systemu eksperckiego) z modułami symulującymi pracę maszyny jest najbardziej oryginalną koncepcją wdrożoną do praktyki przemysłowej.

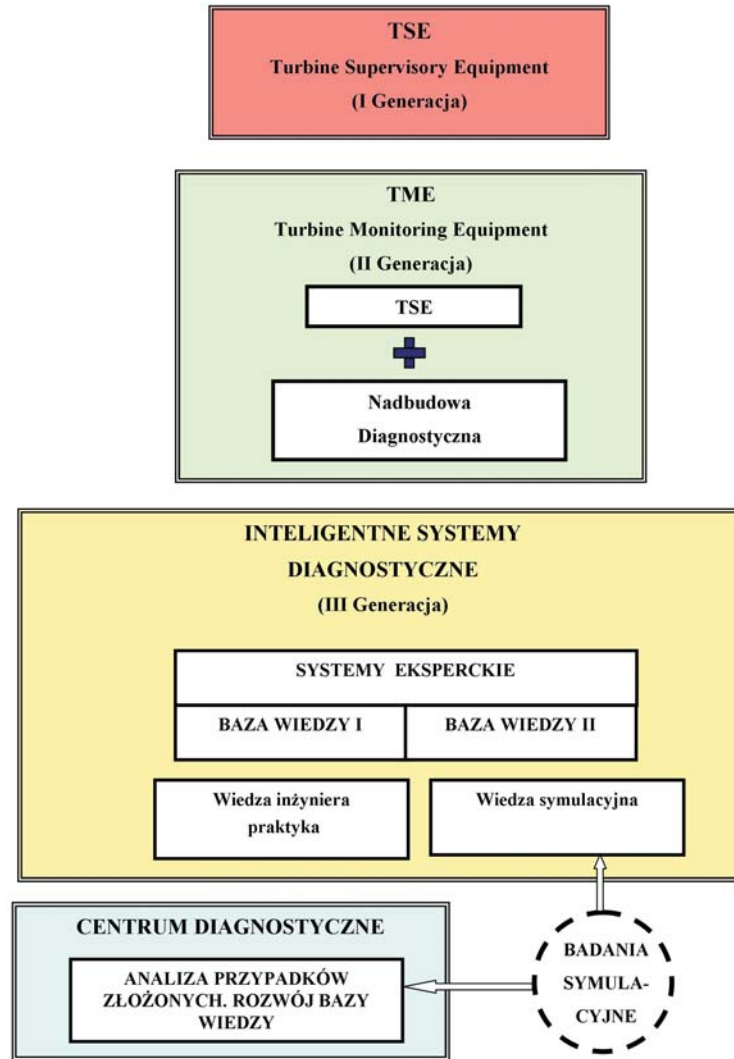
System MESWIR doskonale nadaje się do trenowania układów adaptacyjnych celem odwracania diagnostycznych modeli obiektów. W tej roli wykorzystywany jest od lat przez ośrodek śląski i gdański w ramach ścisłej współpracy [3.27, 3.28]. Również w projekcie PBZ-KBN-025/T10/2000 system MESWIR był wykorzystany w tych celach. Zakres i czas obliczeń numerycznych był jednakże tak duży, że zaszła konieczność wykorzystania aktualnie najsilniejszego w kraju klastra obliczeniowego – rys. 3.62.

System MESWIR wykorzystany też był w wielu autorskich projektach badawczych KBN w tym zwłaszcza w projekcie Nr 5 T 07B 018 23 pt: *Identyfikacja nieliniowych modeli maszyn wirnikowych – aspekty wibrodiagnostyczne*. System ten wykorzystany został m.in. do budowy przedziałów adekwatności konstrukcji podpierającej – patrz: rozdział 1.

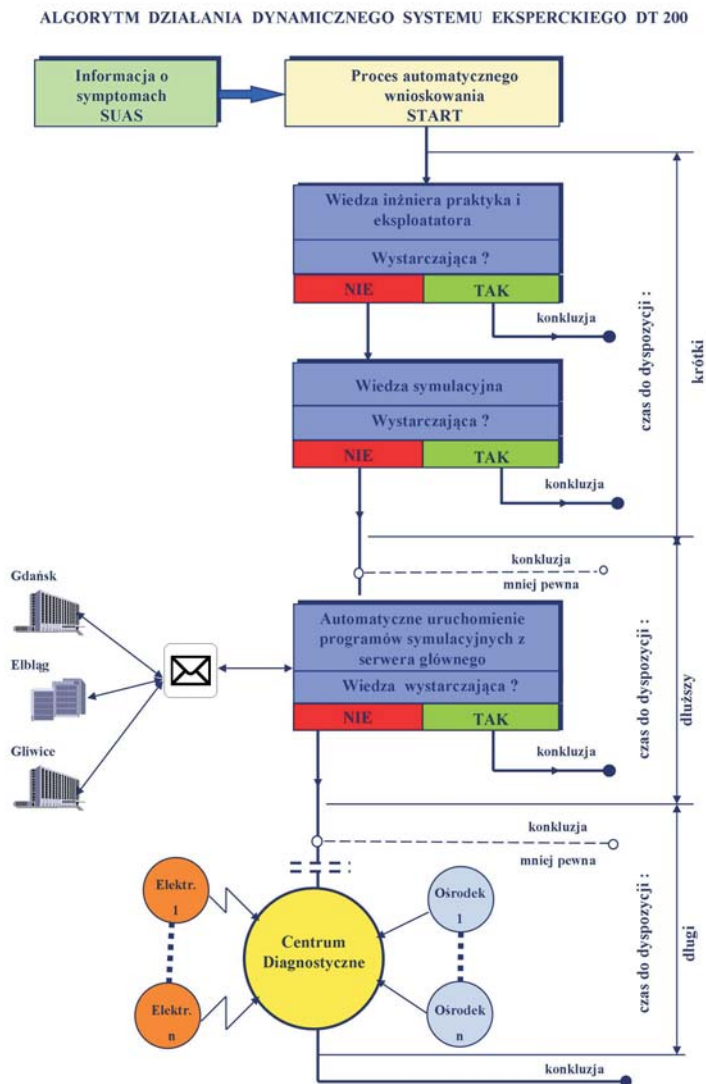
Można wymienić także szereg innych aplikacji systemu MESWIR a mianowicie:

- Na zlecenie przemysłu energetycznego – koncernu ALSTOM Power w Elblągu a wcześniej ABB-Zamech, opracowany system komputerowy był wielokrotnie wykorzystywany przy analizie przyczyn nadmiernych drgań niektórych elementów turbozespołów 13K215 o mocy 200 MW pracujących w kilku krajowych elektrowniach lub innych mniejszych maszyn energetycznych [3.18]–[3.26]. Koncern ALSTOM zakupił niektóre elementy składowe systemu MESWIR, np. do analizy pracy węzłów łożyskowych. Wykorzystywane one są do analizy przyczyn awarii łożysk w turbinach produkowanych przez ALSTOM Power w kraju i za granicą.
- System MESWIR lub jego części składowe jest wykorzystywany na kilku uczelniach w kraju, m.in. na Politechnice Śląskiej na Wydziale Mechanicznym-Technologicznym do generowania danych uczących do systemów adaptacyjnych, na Politechnice Gdańskiej na Wydziale Mechanicznym do analizy stanu łożysk, na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki do weryfikacji filtrów Kalmana oraz na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim na Wydziale Nauk Technicznych dla celów dydaktycznych.

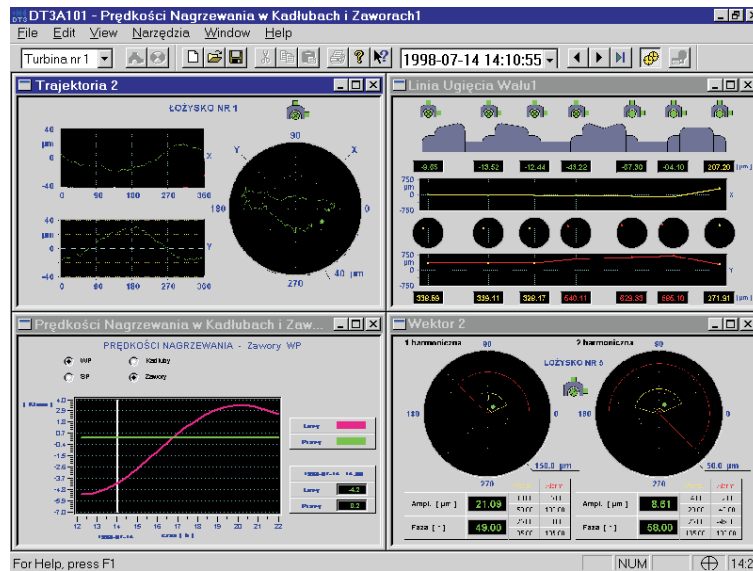
Na stronie internetowej www.pbz-k015.imp.gda.pl znajdzie Czytelnik pełny zestaw danych źródłowych umożliwiających samodzielną budowę relacji diagnostycznych dla turbozespołu 13k215 o mocy 200 MW. Zamieszczone są tu również



Rys. 3.59. Tendencje rozwojowe systemów nadzoru drganiowego w światowej energetyce. Najbardziej perspektywiczny obszar wdrożeń systemu MESWIR to systemy eksperckie (III generacji) oraz centra diagnostyczne



Rys. 3.60. Koncepcja dynamicznego systemu eksperckiego (opracowana przez prof. W. Cholewę). Pewność konkluzji zależy od dostępnego czasu: im dłuższy czas tym konkluzja jest bardziej wiarygodna. Źródłem wiedzy symulacyjnej był tu system MESWIR



Rys. 3.61. Przykładowe okno dialogowe systemu DT-200 opracowanego w ramach projektu PBZ-038-06 i wdrożonego w Elektrowni „Kozienice”. System DT-200 był głównym źródłem danych eksperymentalnych z obiektu rzeczywistego (turbozespołu 13k215) służących do weryfikacji systemu ME-SWIR



Rys. 3.62. Komputer Holk z Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej (TASK) wykorzystywany do generowania danych uczących za pomocą systemu MESWIR dla trenowania układów adaptacyjnych. Prace prowadzone były w ramach projektu PBZ-KBN-025/T10/2000

prototypowe związki typu defekt-symptom wraz z pełną interpretacją graficzną. Jest to wynik prac prowadzonych w ramach Projektu Badawczego Zamawianego PBZ-KBN-025/T10/2000 i wynik obliczeń za pomocą systemu MESWIR [3.1].

3.5 Programy udostępnione Czytelnikom

W celu umożliwienia Czytelnikom prowadzenia zarówno obliczeń inżynierskich jak i badań naukowych we własnym zakresie, Autor niniejszej monografii udostępnia Czytelnikom część programów stanowiących środowisko MESWIR (rys. 3.1) wraz z pakietem stosownych programów graficznych. Są one zamieszczone na załączonym do monografii dysku CD. Zawiera on również pełny opis wszystkich parametrów wejściowych i wyjściowych oraz przykładowe dane i rysunki stanowiące wynik obliczeń.

3.5.1 Opis programów

Na dysku CD zamieszczone zostały następujące programy obliczeniowe (w wersji skompilowanej *.exe) oraz programy graficzne:

KINWIR-I (moduł wykonywalny: **kinwir-i.exe**) – **do analizy zagadnień kinetostatyki** (czyli statyki z wirującym wałem) **wielopodporowych i wielomasowych wirników ułożyskowanych ślizgowo**. Program ten zawiera w sobie moduł do obliczeń poprzecznych łożysk ślizgowych o prostej lub złożonej geometrii szczeliny smarnej i bazujący na izotermicznym modelu cieplnym. Jest to odpowiednio przetransformowany program IZOTER. Model matematyczny na którym bazuje program KINWIR-I, w odniesieniu do linii wirników przedstawiony został w rozdziale 2.1, a w odniesieniu do łożysk w rozdziale 2.2. Strukturę tego programu przedstawia rys. 3.63.

Z programem KINWIR-I współpracuje program graficzny **preproc.exe** umożliwiający zapis graficzny siatki MES linii wirników i ułatwiający odczyt poszczególnych parametrów dyskretyzacji. Szczegółowy opis wszystkich parametrów wejściowych i zbiorów wyników programu KINWIR-I oraz programu graficznego **preproc.exe** zawiera folder OPIS-KINWIR, również zamieszczony na dysku CD.

*Program KINWIR-I umożliwia rozwiązanie układów statycznie niewyznaczalnych jakimi są układy wielopodporowe i tym samym umożliwia wyznaczenie, w postępowaniu iteracyjnym, położenia środków czopów w łożyskach i reakcji w podporach po osiągnięciu warunków równowagi statycznej z uwzględnieniem wszystkich statycznych sił i momentów zewnętrznych i obciążeń masowych. Ponadto istnieje możliwość zaprogramowania przemieszczeń środków panwi w stosunku do linii geodezyjnej wirnika o wartości AMONT i BMONT (w zbiorach łożyskowych **nazwa.ii„nrp”**). Stwarza to doskonałą możliwość modelowania rozosiowania linii wirników. Program umożliwia modelowanie łożysk o praktycznie dowolnym kształcie szczeliny smarnej (np: łożyska wieloklinowe z dowolnie usytuowanymi klinami w przestrzeni luzów). Trafny dobór lepkości dynamicznej oleju w znacznym stopniu pozwoli zmniejszyć ograniczenia izotermicznego modelu cieplnego. W efekcie, poza*

charakterystykami statycznymi łożysk i deformacjami kinetostatycznymi wirnika, otrzymujemy współczynniki sztywności i tłumienia filmu olejowego dla wszystkich podpór (zbiór nazwa.gab), co umożliwia już obliczenia dynamiki układu w zakresie liniowym.

DYNWIR-W (moduł wykonywalny: **dynwir-w.exe**) – do analizy zagadnień dynamiki w zakresie liniowym wielopodporowych i wielomasowych wirników ułożyskowanych ślizgowo. Model matematyczny na którym bazuje program przedstawiony został w rozdziale 2.1. Strukturę tego programu przedstawia rys. 3.64.

Z programem współpracują następujące programy graficzne:

- **preproc.exe** umożliwiający zapis graficzny siatki MES linii wirników i ułatwiający odczyt poszczególnych parametrów dyskretyzacji (jak dla programu KINWIR-I);
- **wykr4_dynwir.m** rysujący przestrzenne trajektorie przemieszczeń dynamicznych (elipsy drgań) wybranych węzłów wzdłuż linii wirników lub przemieszczenia bezwzględne panwi i względne filmu olejowego na tle ugięć kinetostatycznych wirnika (pracuje w środowisku MATLAB).

Szczegółowy opis wszystkich parametrów wejściowych i zbiorów wynikowych programu DYNWIR-W oraz programów graficznych zawiera folder OPIS-DYNWIR, również zamieszczony na dysku CD.

*Punktem wyjścia do obliczeń dynamicznych są m. in. współczynniki sztywności i tłumienia filmu olejowego w poszczególnych łożyskach (wynik obliczeń programem KINWIR-I) oraz współczynniki sztywności i tłumienia samych podpór mocujących panwie, czyli konstrukcji podpierającej – rys. 3.64. Te ostatnie mogą być wyznaczone bądź drogą bezpośrednich pomiarów eksperymentalnych na obiekcie lub też obliczeń za pomocą innych programów (np: komercyjnych) czy też innych szacunków. Przyjęcie skrajnie dużych wartości współczynników sztywności i tłumienia podpór (np: rzędu $e15$) oznacza praktycznie nieskończenie sztywne podpory i fundament, co też w niektórych przypadkach może być zasadne, zwłaszcza w przypadku obliczeń wstępnych. Siłami wymuszającymi drgania układu są w przyjętym modelu siły typu „niewyważenie wirnika”, czyli wirujące na odpowiednich promieniach masy usytuowane w wybranych węzłach z uwzględnieniem przesunięć fazowych. Trajektorie przemieszczeń są w tym przypadku zawsze elipsami (właściwość opisu liniowego). Warto zwrócić uwagę na fakt, iż poprzez sprzężenie z programem KINWIR-I (za pomocą współczynników sztywności i tłumienia filmu olejowego łożysk ślizgowych), mamy możliwość modelowania **oddziaływań dynamicznych** układu, w którym pracują łożyska o złożonej geometrii szczeliny smarnej lub też w którym zaprogramowaliśmy rozosiowania linii wirników. Zmieniając współczynniki sztywności i tłumienia podpór możemy z kolei modelować charakterystyki fundamentu i analizować ich wpływ na cały układ. Stwarza to interesujące możliwości badawcze.*

IZOTER (moduł wykonywalny: **izoter.exe**) – do wyznaczania charakterystyk statycznych poprzecznego łożyska ślizgowego o prostej i złożonej

(wieloklinowej) geometrii szczeliny smarnej oraz charakterystyk dynamicznych sprzężonego z tym łożyskiem prostego, symetrycznego i jednomasowego wirnika. Model matematyczny łożyska przedstawiony został w rozdziale 2.2 a model wirnika w rozdziale 2.3. Schemat logiczny programu przedstawia rys. 3.65 a jego strukturę rys. 3.66.

Z programem współpracują następujące programy graficzne:

- **klin-izo.exe** rysujący położenie klinów smarnych na tle koła luzów oraz rozkład ciśnienia hydrodynamicznego w linii środkowej łożyska,
- biblioteka **IZOGRAF** w której znajduje się program startowy **izograf.m** do rysowania przestrzennych rozkładów ciśnienia w szczelinie smarnej z możliwością wyboru tylko określonego klina smarnego lub całej szczeliny (pracuje w środowisku MATLAB).

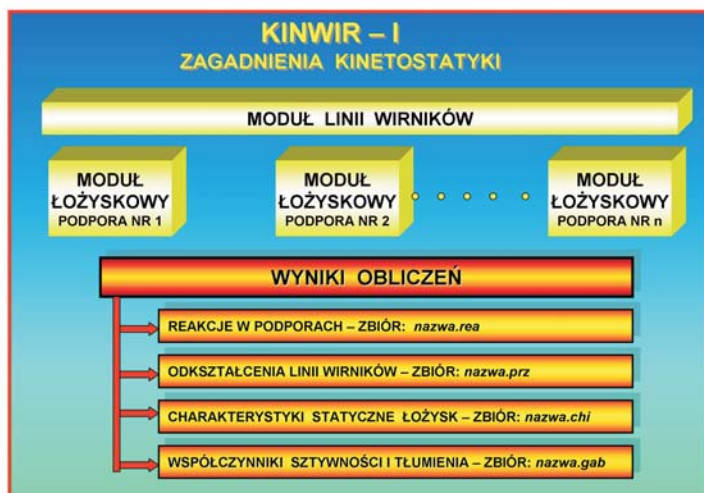
Szczegółowy opis wszystkich parametrów wejściowych i zbiorów wynikowych programu **IZOTER** oraz programów graficznych zawiera folder **OPIS-IZOTER** również zamieszczony na dysku CD.

Program IZOTER bazuje na izotermicznym modelu cieplnym (stała temperatura i lepkość oleju w szczelinie smarnej). Dla zadanego obciążenia zewnętrznego łożyska PST działającego pod kątem FIZ program samoczynnie dobiera, w postępowaniu iteracyjnym, położenie środka czopa EPS i GAM w którym reakcja filmu olejowego równoważy zadane obciążenie statyczne. W tak dobranym położeniu równowagi statycznej program oblicza podstawowe charakterystyki dynamiczne przyjętego układu (prosty, jednomasowy i symetryczny wirnik). Program określa współczynniki sztywności i tłumienia filmu olejowego a także tłumienie i częstotści drgań własnych układu oraz parametry elipsy drgań dla założonego zmiennego wymuszenia zewnętrznego (synchroniczna siła wirująca lub pulsująca).

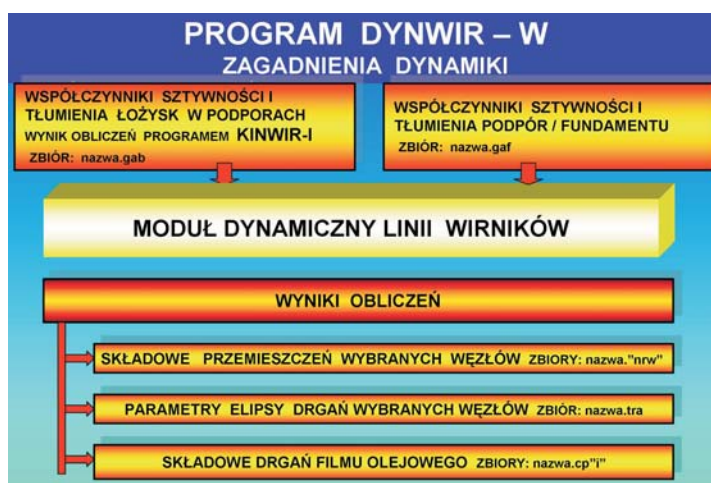
3.5.2 Przykład obliczeniowy

Na dysku CD zamieszczony został przykład obliczeniowy odnoszący się do wirnika trójpodporowego z dwoma dyskami pracującego na typowych łożyskach ślizgowych z luzem kołowo-cylindrycznym i dwiema kieszeniami smarnymi. Przykład ten odnosi się do programów **KINWIR-I** oraz **DYNWIR-W**, co umożliwia prześledzenie charakterystyk kinetostatycznych i dynamicznych tego samego obiektu. Natomiast do programu **IZOTER** zamieszczony został przykład odnoszący się do łożyska turbinowego typu Y z trzema klinami smarnymi umieszczonymi w specyficzny sposób w płaszczyźnie luzów.

Zamieszczone przykłady dotyczą zarówno wartości liczbowych w plikach wejściowych stanowiących dane do obliczeń (katalogi **DAN**), jak i w plikach wynikowych (katalogi **WYN**). Wyniki obliczeń przedstawione też zostały graficznie w postaci rysunków sporządzonych w oparciu o zamieszczone pakiety graficzne. Przedstawiają je rys. 3.67 do 3.69 (program **IZOTER**) oraz rys. 3.70 do 3.73 (programy **KINWIR-I** oraz **DYNWIR-W**).



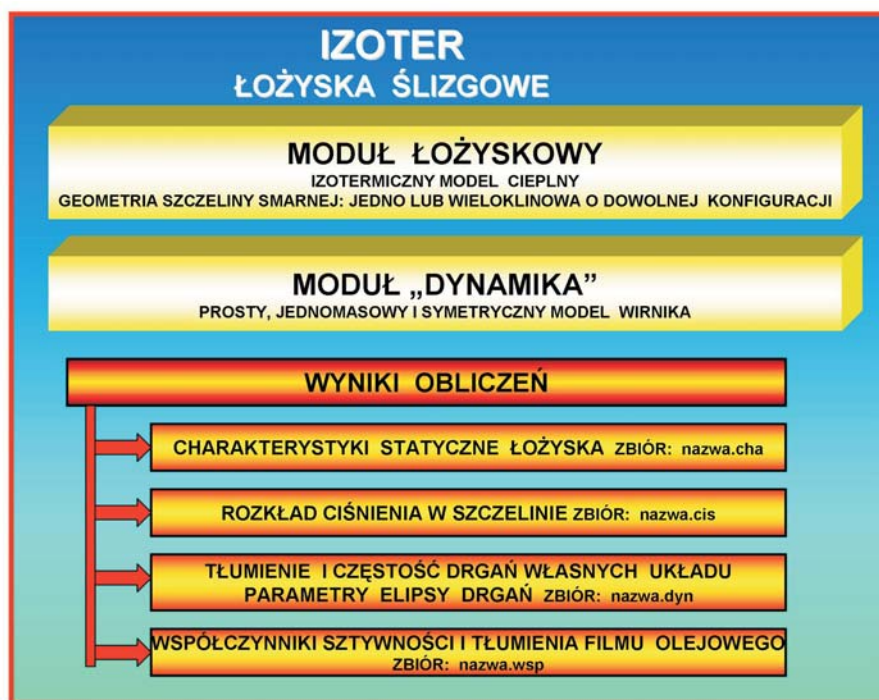
Rys. 3.63. Struktura programu KINWIR-I stanowiącego część środowiska MESWIR



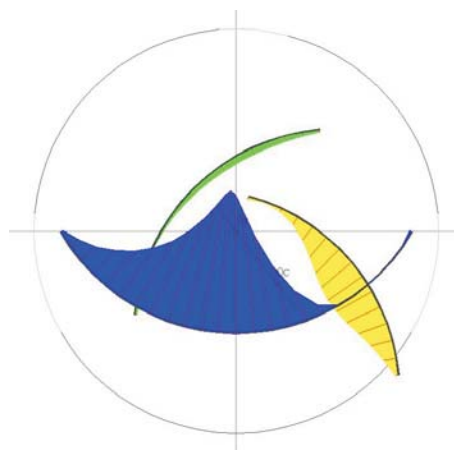
Rys. 3.64. Struktura programu DYNWIR-Q stanowiącego część środowiska MESWIR



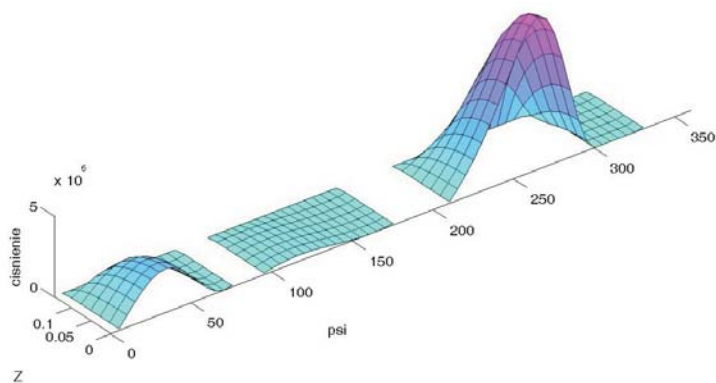
Rys. 3.65. Przyjęta kombinacja (schemat logiczny) modelu łożyska z prostym modelem wirnika



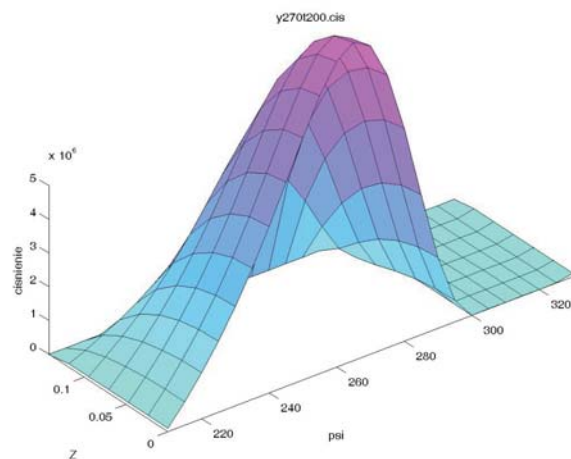
Rys. 3.66. Struktura programu IZOTER stanowiącego część środowiska MESWIR



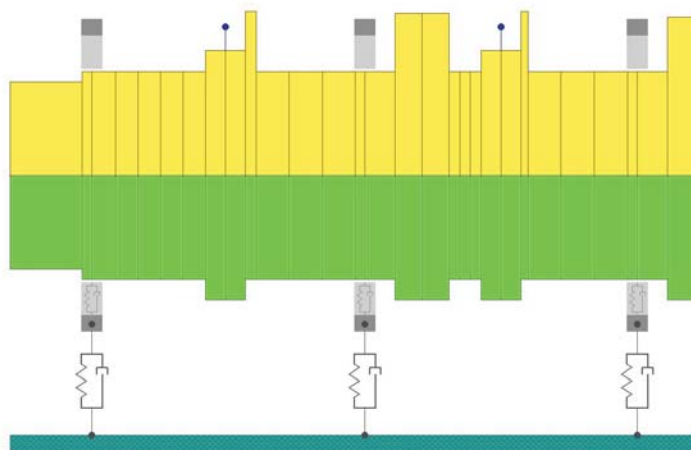
Rys. 3.67. Położenie klinów smarnych na tle koła luzów oraz rozkład ciśnienia w linii środkowej łożyska. Przykład obliczeniowy do programu *IZOTER*: łożysko turbinowe typu Y. Graficzna prezentacja wyników za pomocą programu *klin-izo.exe*



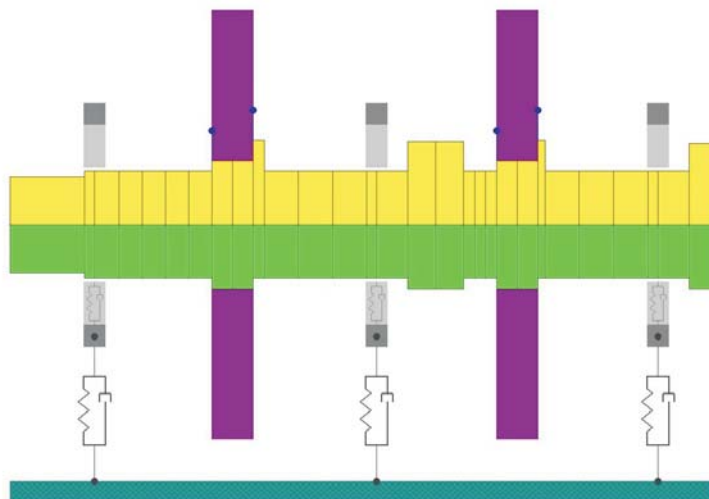
Rys. 3.68. Przestrzenny rozkład ciśnienia we wszystkich klinach smarnych. Przykład obliczeniowy do programu *IZOTER*: łożysko turbinowe typu Y. Graficzna prezentacja wyników za pomocą programu *izograf.m*



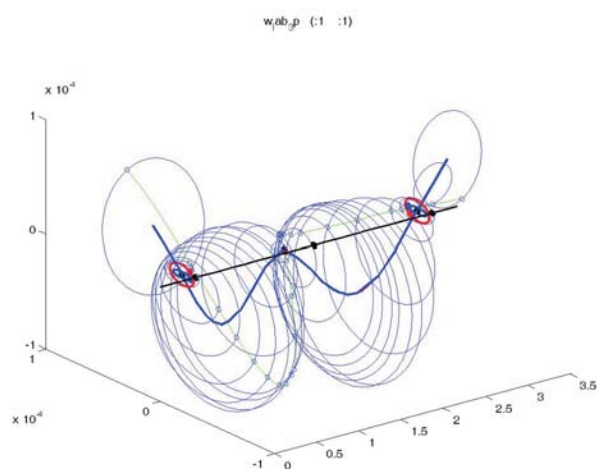
Rys. 3.69. Przestrzenny rozkład ciśnienia w wybranym klinie smarnym. Przykład obliczeniowy do programu IZOTER: łożysko turbinowe typu Y. Graficzna prezentacja wyników za pomocą programu **izograf.m**



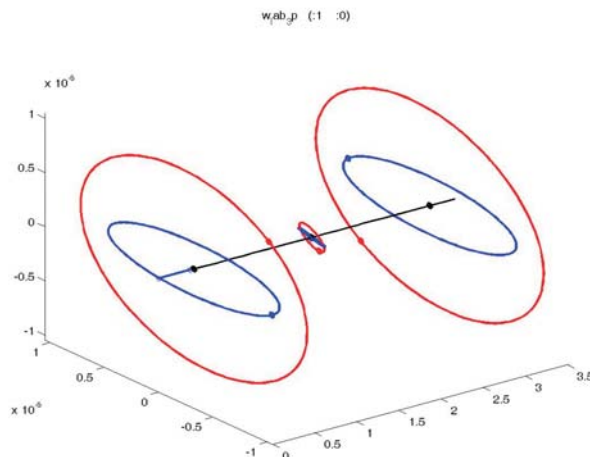
Rys. 3.70. Dyskretyzacja MES linii wirników do programu KINWIR-I uzyskana za pomocą preprocesora **preproc.exe**. Wirnik trójpodporowy



Rys. 3.71. Dyskretyzacja MES linii wirników do programu DYNWIR-W uzyskana za pomocą preprocesora **preproc.exe**. Wirnik trójpodporowy



Rys. 3.72. Trajektorie przemieszczeń wybranych węzłów wzdłuż linii wirników na tle ugięć kinetostatycznych. Przykład wirnika trójpodporowego. Wyniki obliczeń: program DYNWIR-W, grafika: program **wykr4_dynwir.m**



Rys. 3.73. Trajektorie przemieszczeń bezwzględnych panwi (linia czerwona) i względnych filmu olejowego (linia niebieska) w łożyskach wirnika trójpodporowego. Wyniki obliczeń: program DYNWIR-W, grafika: program *wykr4_dynwir.m*

Bibliografia do rozdziału 3

- [3.1] Modelowanie i diagnostyka oddziaływań mechanicznych, aerodynamicznych i magnetycznych w turbozespołach energetycznych, praca zbiorowa pod red. J. Kicińskiego, PAN Wydział IV Nauk Technicznych, Wydawnictwa IMP PAN, Gdańsk 2005, str. 1326.
- [3.2] Kiciński J.: *Teoria i badania hydrodynamicznych poprzecznych łożysk ślizgowych*, Ossolineum 1994.
- [3.3] Rybczyński J.: *Możliwości diagnozowania stanu dynamicznego maszyny wirnikowej na podstawie zmierzonych trajektorii czopów łożysk ślizgowych*, Problemy Eksploatacji Nr 2/99 (33), 123-131 (ref. na IV Krajową Konf. Nauk.-Techn. „Inżynieria Łożyskowania’99 – Diagnostyka Węzłów Łożyskowych”, Gdańsk-Gdynia-Sopot, 19-21.05.1999).
- [3.4] DT200-1. *System diagnostyczny dla turbozespołów energetycznych o mocy 200 MW*, praca zbiorowa pod red. W. Cholewy i J. Kicińskiego, Gdańsk 1998.
- [3.5] Rybczyński J.: *Stanowisko do badań dynamiki wirników i łożysk ślizgowych*, Zeszyty Naukowe IMP PAN w Gdańsku Nr 429/1394/94.
- [3.6] Rybczyński J.: *Próby wyjaśnienia przyczyny drgań wirnika trójpodporowego zarejestrowanych na stanowisku badawczym dynamiki wirników*, Materia-

- ły II Międzynarodowego Kongresu Diagnostyki Technicznej „Diagnostyka 2000”, Warszawa, 19-22 września 2000, vol. 2, 219.
- [3.7] Kiciński J., Markiewicz-Kicińska A.: *Programy NLDW-70 do obliczeń sprzężonych form drgań giętno-wzdłużno-skrętnych z imperfekcjami typu pęknięcie wału i rozosiowania elementów*, opracowanie IMP PAN, nr arch. 357/2000, Gdańsk 2000.
- [3.8] Kiciński J., Markiewicz-Kicińska A.: *Program NLDW-75 do obliczeń sprzężonych form drgań giętno-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*, Oprac. IMP PAN, nr arch. 3094/03, Gdańsk 2003.
- [3.9] Kiciński J., Markiewicz-Kicińska A.: *Weryfikacja i testowanie programów komputerowych NLDW-LEW dla dużych obiektów energetycznych. Program NLDW-LEW-60*, Oprac. IMP PAN, nr arch. 3356 /2003, Gdańsk 2003.
- [3.10] Kiciński J., Markiewicz-Kicińska A.: *Program komputerowy NLDW-LEW-75*, oprac. IMP PAN, nr arch. 4751/04, Gdańsk 2004.
- [3.11] Markiewicz-Kicińska A.: *INSTRUKCJA – ogólne uwagi dotyczące niektórych programów obliczeniowych i graficznych opracowanych w O4/Z3*, Oprac. IMP PAN, nr arch. 4125/04, Gdańsk 2004.
- [3.12] Markiewicz-Kicińska A., Czoska B.: *Środowisko programów komputerowych MESWIR – opis danych wejściowych i zbiorów wynikowych. PRE- i POST-procesory graficzne*, Oprac. IMP PAN, nr arch. 5052/05, Gdańsk 2005.
- [3.13] Kiciński J., Rybczyński J., Banaszek S., Łuczak M.: *Bank danych eksploatacyjnych i geometrycznych turbozespołu 13K215*, Oprac. IMP PAN, nr arch. 1012/2001.
- [3.14] Cholewa W., Psiuk K., Chrzanowski P., Cholewa A.: *Karty diagnostyczne obejmujące wybrane dane z systemu DT200 dla różnych stanów obciążenia*, Oprac. PBZ K015/T10/2001/74.
- [3.15] Rybczyński J. Banaszek S.: *Generowanie przypadku bazowego dla turbiny 13K215*, Oprac. PBZ K015/T10/2001/85.
- [3.16] Kiciński J., Prońska A.: *Identyfikacja modelu obliczeniowego turbozespołu 13K215. Przypadek bazowy, propozycje klas defektów*, Oprac. PBZ K015/T10/2001/93.
- [3.17] Markiewicz-Kicińska A., Czoska B.: *Środowisko programów komputerowych MESWIR - opis danych wejściowych i zbiorów wynikowych. PRE- i POST-procesory graficzne*, Oprac. IMP PAN, nr arch.5052/05, Gdańsk 2005.
- [3.18] Kiciński J.: *Analiza częstości drgań i postaci własnych giętnych i skrętnych turbokompresora EH NK-50-45+BCL 607*, op Jrac. IMP PAN nr 3020/2003.

- [3.19] Kiciński J., Rybczyński: *Torsional Vibration Analysis DML6173 Train Before and After Modification*, Oprac. IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 2351/2002, zlecenie TURBOSERVICE Łódź.
- [3.20] Kiciński J., Rybczyński J., Banaszek S.: *Steady State Torsional Vibration Analysis of Motor-Gear-Compressor Train*, Oprac. IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 2419/2002, zlecenie TURBOSERVICE Łódź.
- [3.21] Kiciński J., Rybczyński J.: *Identyfikacja modeli defektów i ich klas*, oprac. IMP PAN w Gdańsku, nr arch. 1835/2001, zlecenie ALSTOM Power Elbląg.
- [3.22] *DT200-1. System diagnostyczny dla turbozespołów energetycznych o mocy 200 MW*, praca zbiorowa pod red. W. Cholewy i J. Kicińskiego, Gdańsk 1998.
- [3.23] Kiciński J.: *Generowanie danych uczących. Badanie wpływu zmian sztywności kinetostatycznej wybranej podpory turbozespołu 13K215*, Oprac. IMP PAN (zlec. ALSTOM Power Elbląg), 2001.
- [3.24] Kiciński J.: *Identyfikacja modeli defektów. Rozosiowanie linii wałów turbozespołu 13K215 oraz wirnika 3-podporowego*, opr. na zlecenie przemysłu, 2001.
- [3.25] J. Kiciński – *Badania drgań turbozespołu TK 215 w Elektrowni Kozienice S.A.*, Oprac. zewnętrzne na zlecenie przemysłu, 2001.
- [3.26] Kiciński J.: *Identyfikacja modeli defektów w pracy obiektu i adaptacja oprogramowania do ich opisu*, opr. zewnętrzne na zlecenie przemysłu, 2000.
- [3.27] Cholewa W., Kiciński J.: *Diagnostyka Techniczna – metody odwracania nieliniowych modeli obiektów*, Zeszyty Politechniki Śląskiej, nr 120, Gliwice 2001.
- [3.28] *Symulacja defektów i budowa relacji diagnostycznych modelu numerycznego*, praca zbiorowa pod red. J. Kicińskiego, Zeszyty Politechniki Śląskiej, Nr 125, Gliwice 2005.