

DIAGNOZA - GENEZA - PROGNOZA => PODSTAWA KAŻDEJ DECYZJI

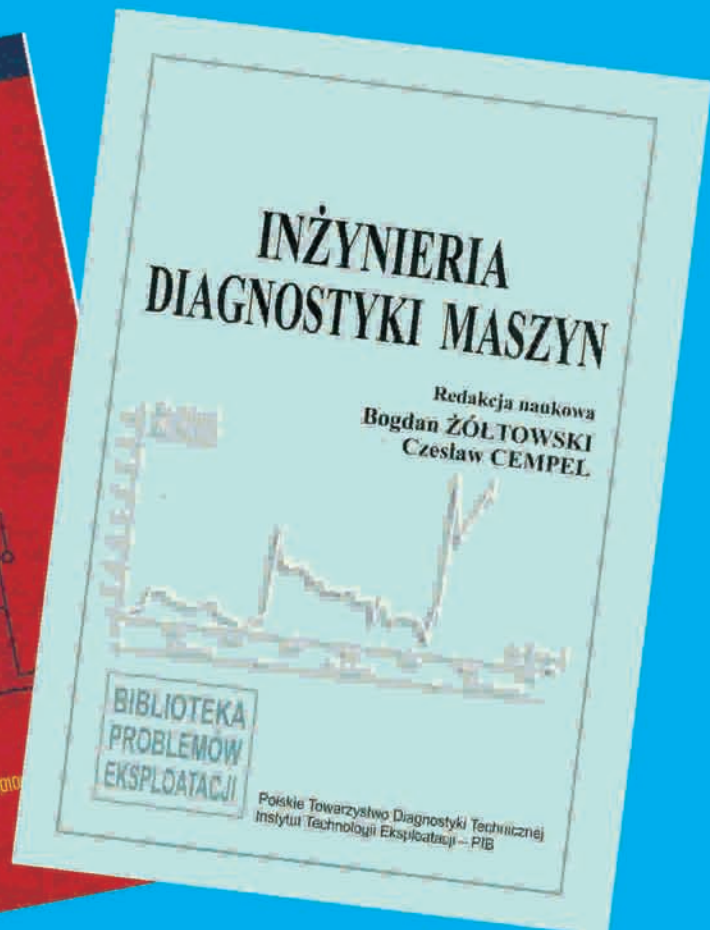
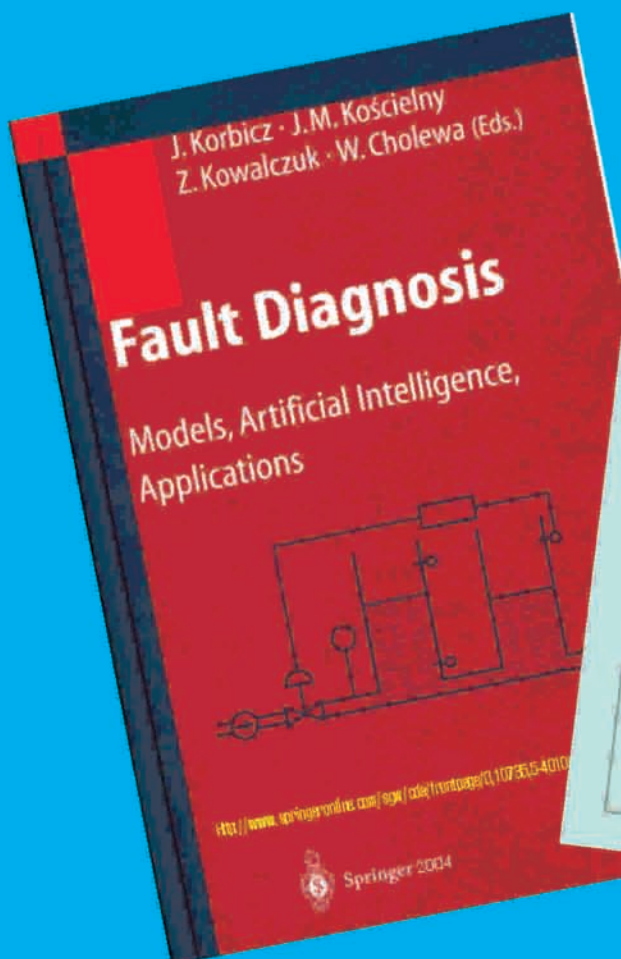
Polskie
Towarzystwo
Diagnostyki
Technicznej

afiliowane przy

Wydziale Nauk
Technicznych
Polskiej Akademii Nauk

Diagnostyka

ISSN 641-6414



VOL. 32
2004 r.

Rada programowa

Przewodniczący:

prof. dr hab. **Czesław CEMPEL** *Politechnika Poznańska*

Redaktor Naczelny:

prof. dr hab. inż. **Ryszard MICHALSKI** *UWM w Olsztynie*

Członkowie:

prof. dr hab. inż. **Jan ADAMCZYK**
AGH w Krakowie

dr inż. **Roman BARCZEWSKI**
Politechnika Poznańska

prof. dr hab. inż. **Walter BARTELMUS**
Politechnika Wroclawska

prof. dr hab. inż. **Wojciech BATKO**
AGH w Krakowie

prof. dr hab. inż. **Lesław BĘDKOWSKI**
WAT Warszawa

prof. dr hab. inż. **Adam CHARCHALIS**
Akademia Morska w Gdyni

prof. dr hab. inż. **Wojciech CHOLEWA**
Politechnika Śląska

prof. dr hab. inż. **Zbigniew DĄBROWSKI**
Politechnika Warszawska

prof. dr hab. inż. **Marian DOBRY**
Politechnika Poznańska

dr inż. **Tomasz GAŁKA**

Instytut Energetyki w Warszawie

prof. dr hab. inż. **Jan KICIŃSKI**
IMP w Gdańsku

prof. dr hab. inż. **Jerzy KISIŁOWSKI**
Politechnika Warszawska

prof. dr hab. inż. **Wojciech MOCZULSKI**
Politechnika Śląska

prof. dr hab. inż. **Stanisław NIZIŃSKI**
UWM w Olsztynie

prof. dr hab. inż. **Stanisław RADKOWSKI**
Politechnika Warszawska

prof. dr hab. inż. **Tadeusz UHL**
AGH w Krakowie

prof. dr hab. inż. **Andrzej WILK**
Politechnika Śląska

prof. dr hab. inż. **Bogdan ŻÓŁTOWSKI**
ATR w Bydgoszcz

Obszar zainteresowania czasopisma to problemy diagnostyki, identyfikacji stanu technicznego i bezpieczeństwa maszyn, urządzeń, systemów i procesów w nich zachodzących.

Drukujemy oryginalne prace teoretyczne, aplikacyjne, przeglądowe i krótkie doniesienia z badań, innowacji i kształcenia w tych zagadnieniach.

Recenzenci nadesłanych prac:

dr hab. inż. **Zbigniew DĄBROWSKI**, prof. WAT

dr inż. **Tomasz GAŁKA**

prof. dr hab. inż. **Jan KICIŃSKI**

dr hab. inż. **Sylwester KŁYSZ**, prof. UWM

prof. dr hab. inż. **Zbigniew KOZANCEKI**, prof. PŁ

dr hab. inż. **Piotr KRZYWORZEKA**

dr hab. inż. **Bogusław ŁAZARZ**

prof. dr hab. inż. **Ryszard MICHALSKI**

prof. dr hab. inż. **Stanisław NIZIŃSKI**

dr hab. inż. **Andrzej PIĘTAK**, prof. WAT

prof. dr hab. inż. **Stanisław RADKOWSKI**

dr hab. inż. **Franciszek TOMASZEWSKI**, prof. PP

prof. dr hab. inż. **Tadeusz UHL**

prof. dr hab. inż. **Andrzej WILK**

WYDAWCA:

Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej
02-981 Warszawa, ul. Augustówka 5

REDAKTOR NACZELNY:

prof. dr hab. inż. **Ryszard MICHALSKI**

CZŁONKOWIE KOMITETU REDAKCYJNEGO:

dr inż. **Paweł MIKOŁAJCZAK**

mgr inż. **Krzysztof LIGIER**

SEKRETARZ REDAKCJI:

dr inż. **Sławomir WIERZBICKI**

tel.: (0-89) 523-37-51

REDAKCJA CZASOPISMA:

Uniwersytet Warmiński – Mazurski w Olsztynie,
Katedra Eksploatacji Pojazdów i Maszyn
10-736 Olsztyn, ul. Oczapowskiego 11,
tel./fax: (0-89) 523-34-63
e-mail: diagnostyka@uwm.edu.pl

KONTO PTDT:

Bank Przemysłowo Handlowy S.A.

II O/ Warszawa

nr konta: 40 1060 0076 0000 3200 0046 1123

Spis treści

Słowo Redaktora Naczelnego.....5

Komunikaty PTDT.....6

ARTYKUŁY GŁÓWNE

Jan KICIŃSKI, Sławomir BANASZEK, Aleksandra MARKIEWICZ – IMP Gdańsk, Wojciech MIĄSKOWSKI – UWM Olsztyn.....7*Przykładowe relacje typu defekt-symptom silnika S-4003 pozyskane metodą diagnostyki według modelu
An Example Defect-Symptom Relations Of The S-4003 Engine Obtained By The Way Of Model Based
Diagnostics***Rafał PAWLETKO – Akademia Morska w Gdyni**.....15*Ocena wrażliwości diagnostycznej przebiegu ciśnienia indykowanego średnioobrotowego silnika okrętowego
Estimation Of Diagnostic Sensivity Of Indication Diagram Of Marine Medium Speed Diesel Engine***Adam SOŁBUT – Politechnika Białostocka**.....19*Sygnal diagnostyczny dla silnika asynchronicznego zasilanego z falownika napięcia
Diagnostic Signal For Asynchronous Motor Supplied With The Voltage Inverter***Tadeusz UHL, Krzysztof MENDROK – Akademia Górniczo Hutnicza**.....23*Zastosowanie wektorów Ritza w diagnostyce konstrukcji
Beam Crack Detection With Use Of Ritz Vectors***Waldemar DUDDA – UWM Olsztyn**.....31*Numeryczne modelowanie roboczych cykli konstrukcji w warunkach korozyjnych
Numerical Modeling Of Construction Work Cycles Under Corrosion Degradation***Wojciech SOBIESKI – UWM Olsztyn**.....37*Stanowisko laboratoryjne do badania zjawiska kawitacji metodą wibroakustyczną
Vibroacoustic Analysis Of Cavitation Flows***Jan KICIŃSKI – IMP Gdańsk, Wojciech MIĄSKOWSKI – UWM Olsztyn**.....43*Własności kinetostatyczne i dynamiczne typowego łożyska turbinowego
Properties Of The Steady-State Analysis And Dynamics Of Typical Turbine Bearing***Henryk G. SABINIAK – Politechnika Łódzka**.....51*Skutki ściernego zużycia zębów w przekładniach ślimakowych
The Effects Of Abrasive Wear Of Teeth In The Worm Gears***Henryk TYLICK, Jacek RÓŻYCKI, Joanna ŻÓŁTOWSKA - ATR w Bydgoszczy**.....57*Badanie jakości zbioru sygnałów diagnostycznych
Investigation Of Gathering Diagnostics Signals Quality***Henryk TYLICK, Joanna ŻÓŁTOWSKA - ATR w Bydgoszczy**.....63*Badanie jakości diagnozy maszyn
The Investigation Of Diagnosis Machine Quality***Karol KWIATKOWSKI, Bogdan ŻÓŁTOWSKI, – ATR Bydgoszcz**.....71*Silniki spalinowe źródłem szkodliwych składników spalin
Combustion Engines As The Source Of Exhaust Gas Harmful Components***Marcin ŁUKASIEWICZ, Bogdan ŻÓŁTOWSKI, – ATR Bydgoszcz**.....77*Identyfikacja stanów przekładni zębatych eksploatacyjną analizą modalną
The States Identification Of Toothed Gear With Operational Modal Analysis*

Zdzisław KRÓLICKI, Bogdan ŻÓŁTOWSKI, – ATR Bydgoszcz	83
<i>Modele diagnostyczne przekładni zębatej</i> <i>Models Diagnostic Of Toothed Gear</i>	
Zdzisław KRÓLICKI, Bogdan ŻÓŁTOWSKI, – ATR Bydgoszcz	89
<i>Metodyka badania drganiowego przekładni zębatej</i> <i>The Toothhead Gear Vibration Investigation Metodology</i>	
Maciej WOROPAY, Bogdan LANDOWSKI, Daniel PERCZYŃSKI – ATR Bydgoszcz	95
<i>Metoda diagnozowania przydatności obiektów technicznych do użytkowania w systemie eksploatacji</i> <i>Usefulness Diagnosis Method Of The Technical Objects To Be Used In The Maintenance System</i>	
Maciej WOROPAY, Bogdan LANDOWSKI, Daniel PERCZYŃSKI – ATR Bydgoszcz	101
<i>Prognozowanie stanu systemu na podstawie badań modelu procesu eksploatacji</i> <i>The State Condition Prognosis Based On The Investigation Of The Maintenance Process Model</i>	
Leszek MAJKUT – AGH	107
<i>Identyfikacja pęknięcia w belkach o znanych warunkach brzegowych</i> <i>Identification Of Crack In Beams With Well-Known Boundary Conditions</i>	
Józef PSZCZÓŁKOWSKI, Kazimierz KOLIŃSKI - WAT	117
<i>Model napędzania wału korbowego jako narzędzie diagnozowania silników</i> <i>The Model Of Crankshaft Driving As A Tool Of Engines Diagnosing</i>	
Magdalena KRAKOWIAK, Czesław CEMPEL – Politechnika Poznańska	125
<i>Pewność diagnozy stanu maszyn w podejściu jedno i wielowymiarowym</i> <i>Reliability Of Condition Assessment In A Single And Multi Dimensional Approach</i>	
Aleksander JASTRIEBOW, Stanisław GAD, Grzegorz SŁOŃ, Andrzej ZAWADZKI, Mariusz ŁASKAWSKI - Politechnika Świętokrzyska	135
<i>Analiza rozróżnialności uszkodzeń przy diagnozowaniu samochodowych urządzeń elektrycznych</i> <i>The Analysis Of Faults Discrimination In Diagnosing Of Motor-Car's Electrical Devices</i>	
Aleksander JASTRIEBOW, Stanisław GAD, Grzegorz SŁOŃ, Andrzej ZAWADZKI, Mariusz ŁASKAWSKI - Politechnika Świętokrzyska	139
<i>Sygnaly diagnostyczne w diagnozowaniu wyposażenia elektrycznego samochodów</i> <i>Diagnostic Signals In Diagnosing Of Motor-Car's Electrical Equipment</i>	
Renata WALCZAK - Politechnika Warszawska	143
<i>Identyfikacja zmiennych procesowych suszarki daszkowej w systemie Symuneuron w aspekcie diagnostyki</i> <i>Process Variables Identification In Symuneuron System Considering Dryer Selection And Drying Process Diagnosis</i>	
WARTO PRZECZYTAĆ	
<i>„Inżynieria diagnostyki maszyn”</i> pod red. B. ŻÓŁTOWSKI, Cz. CEMPEL	151
<i>„Fault Diagnosis. Models, Artificial Intelligence, Diagnosis”</i> J. KORBICZ, J.M. KOŚCIELNY, Z. KOWALCZUK, W. CHOLEWA	152
KONFERENCJE	
Informacje o Konferencjach.....	154

SŁOWO REDAKTORA NACZELNEGO

Niniejszy numer „Diagnostyki” zawiera opracowania z zakresu tworzenia relacji diagnostycznych, numerycznego modelowania zjawisk pękania, korozji w maszynach, badań stanowiskowych oraz zastosowania wybranych metod sztucznej inteligencji w diagnozowaniu. Zamieszczamy również kilka artykułów poświęconych diagnozowaniu przekładni zębatych i układów elektrycznych oraz problematyce pewności diagnozy.

Kończący się rok 2004 przyniósł istotny wkład środowiska w rozwój diagnostyki technicznej w naszym kraju. Odkonferencje, sympozjów i kongresów, z których do najważniejszych zaliczyć można: *3rd International Congress of Technical Diagnostics* zorganizowany przez Politechnikę Poznańską, Akademię Techniczno-Rolniczą w Bydgoszczy, i PTDT, *XXXI Ogólnopolskie Sympozjum „Diagnostyka Maszyn”* przygotowane przez Wydział Transportu Politechniki Śląskiej oraz *III Seminarium Degradacji Systemów* zorganizowane przez Politechnikę Warszawską.

Wydano szereg opracowań z zakresu diagnostyki, w tym obszerne dzieło pt.: *„Inżynieria diagnostyki maszyn”* pod red. Cz. Cempla i B. Żółtowskiego, pełniące funkcję poradnika i systematyzujące wiedzę nt. diagnostyki technicznej.

Inną ważną publikacją jest pozycja *„Fault Diagnosis, Models, Artificial Intelligence, Applications”* wydana przez prestiżowe wydawnictwo Springer-Verlag. Jest to obszerna monografia zbiorowa pod redakcją profesorów Józefa Korbicza, Jana M. Kościelnego, Zdzisława Kowalczyka oraz Wojciecha Cholewy.

W imieniu Rady Programowej i Redakcji składam wszystkim Autorom serdeczne podziękowania za dotychczasową współpracę, a Czytelnikom życzę wielu interesujących prac na łamach „Diagnostyki” w 2005 roku.



ZMIANY W TRYBIE ZGŁASZANIA ARTYKUŁÓW

Uprzejmie informujemy Autorów, że począwszy od nr 33 Diagnostyki zmienia się nieco tryb zgłaszania artykułów. Oprócz przesłania wydruku i wersji elektronicznej pracy, prosimy o dołączenie oświadczenia zawierającego dane instytucji, na którą ma być wystawiona faktura za publikowane artykuły w Diagnostyce. Przesłanie takich informacji uprości procedurę wystawiania faktur przez PTDT, które zostaną przesłane na wskazany adres i będą podstawą do uiszczenia opłaty. Poniżej zamieszczamy wzór takiego oświadczenia, również wzór ten jest dostępny na stronie internetowej Redakcji: <http://www.uwm.edu.pl/wnt/diagnostyka/>

Sekretarz Redakcji Diagnostyki
Sławomir WIERZBICKI

(pieczętka)

.....
(miejsce, data)

**Redakcja czasopisma „Diagnostyka”
Katedra Budowy, Eksploatacji Pojazdów i Maszyn
Wydział Nauk Technicznych
UWM Olsztyn
ul. Oczapowskiego 11
10-736 Olsztyn**

Zwracam się z prośbą o opublikowanie na łamach czasopisma Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej „Diagnostyka” następującego artykułu/(ów):

.....
(należy podać autora/(ów) oraz tytuł artykułu)

.....
.....
.....

Jednocześnie w przypadku uzyskania pozytywnej recenzji artykułu/(ów) upoważniam Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej do wystawienia faktury za wydanie zgłoszonej publikacji bez naszego podpisu. Fakturę prosimy wystawić na:

.....
(należy podać adres instytucji oraz nr NIP)

.....

Fakturę proszę przesłać na adres:

.....
(należy podać adres w przypadku gdy adres do korespondencji różni się od adresu płatnika)

.....
.....

(podpis i pieczętka kierownika jednostki)

PRZYKŁADOWE RELACJE TYPU DEFEKT-SYMPATOM SILNIKA S-4003 POZYSKANE METODĄ DIAGNOSTYKI WEDŁUG MODELU*

Jan KICINŚKI¹⁾, Sławomir BANASZEK¹⁾, Aleksandra MARKIEWICZ¹⁾, Wojciech MIĄSKOWSKI²⁾

1) Instytut Maszyn Przepływowch im. R. Szewalskiego PAN
ul. Fiszera 14, 80-952 Gdańsk, tel. (+58) 346-08-81, kic@imp.gda.pl, tolek@imp.gda.pl, ola@imp.gda.pl

2) Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Wydział Nauk Technicznych
ul. Oczapowskiego 11, 10-736 Olsztyn, tel. (+89) 523-45-14, wojmek@uwm.edu.pl

Streszczenie

Praca przedstawia przykład generowania symulacyjnych relacji diagnostycznych obiektu – układu korbowego silnika spalinowego typu S-4003. Zastosowano oryginalną metodologię kojarzenia programów komputerowych do analizy liniowej konstrukcji (MES) z autorskimi programami do nieliniowej analizy łożysk ślizgowych. Wykorzystano przy tym linearyzację obciążeń w małych przedziałach czasowych. Przedstawiono silnik S-4003, jego układ korbowy, oraz obciążenia działające na niego w przypadku bazowym (odniesienia) i z niezdatnością w postaci nieszczelności komory spalania. Pokazano przykładowe wyniki analizy modalnej. Zasadniczą część pracy stanowi prezentacja wyników obliczeń dynamiki układu korbowego skojarzonymi metodami liniowymi i nieliniowymi oraz wskazanie możliwości pozyskiwania tą drogą relacji diagnostycznych.

Słowa kluczowe: diagnostyka, łożyska ślizgowe, silnik spalinowy

AN EXAMPLE DEFECT - SYMPTOM RELATIONS OF THE S-4003 ENGINE OBTAINED BY THE WAY OF MODEL BASED DIAGNOSTICS

Summary

An article presents an example of generating a simulation diagnostic relations of the object – a crankshaft of the S-4003 Diesel engine. An original methodology was used to couple computer codes used to linear analysis of the construction (FEM) with originally invented programs to nonlinear analysis of the slide bearings. It was done by using load linearization in short time intervals. An S-4003 Diesel engine and its crankshaft are presented. There are also presented loads of the crankshaft in the base (reference) case and in the case of defect – combustion chamber leakage. The modal analysis of the crankshaft is briefly shown. The main part of the work is a presentation of the results of the calculations made using coupled linear and nonlinear methods and showing the possibilities to obtain diagnostic relations in that way.

Keywords: diagnostics, slide bearings, Diesel engine

1. UWAGI WSTĘPNE

Każdy nowoczesny system diagnostyczny wymaga wiarygodnych baz danych procesowych i eksploatacyjnych dotyczących analizowanego obiektu. Szczególnie istotne są tu tzw. katalogi relacji diagnostycznych, a więc związki łączące defekty z ich symptomami. Relacje typu defekt-symptom stanowią podstawę dla wygenerowania danych uczących i tym samym „trenowania” zastosowanych układów automatycznego wnioskowania lub innych układów adaptacyjnych.

Pozyskanie kompletnych katalogów relacji diagnostycznych jest zagadnieniem niezmiernie trudnym. Uzyskane informacje, np. metodą badań eksperymentalnych lub protokołów służb dozoru eksploatacyjnego, są z jednej strony najbardziej wartościowe ale z drugiej strony są najczęściej

niejednoznaczne i mało kompletne. Wzrasta zatem rola zaawansowanych symulacji komputerowych i tzw. diagnostyki według modelu. Dotyczy to zwłaszcza analizy stanów dynamicznych obiektów i procesów a więc wibrodiaagnostyki. Wymaga to jednak stosowania analizy w zakresie **nieliniowym**, gdyż tylko ona umożliwi wygenerowanie nieeliptycznych trajektorii drgań w których kształcie zakodowane są symptomy przyjętych niezdatności i tym samym wygenerowanie niezwykle użytecznych w badaniach diagnostycznych widm drgań. Wszystkie dostępne na rynku komercyjne i profesjonalne programy takie jak np.: ABAQUS, czy, NASTRAN umożliwiają analizę wyłącznie w zakresie liniowym. Wyniki tej analizy mogą mieć znaczenie pomocnicze przy budowie relacji diagnostycznych. Pozostaje jednakże otwarte pytanie, jak pozyskać

* Pracę wykonano w ramach projektu badawczego KBN nr 5T07B03622

główne, a więc z reguły nieliniowe, relacje typu niezdatność-symptom? Rozwiązaniem może tu być próba połączenie programów do analizy liniowej konstrukcji z programami opisującymi najbardziej newralgiczne elementy obiektu w zakresie nieliniowym. Jak jednakże dokonać integracji tak różnych modeli i programów komputerowych? W niniejszym opracowaniu koncepcja taka została przedstawiona. Dotyczy ona pewnego rodzaju integracji znanego komercyjnego systemu ABAQUS z autorskim, opracowanym w IMP PAN w Gdańsku, programem TRADYN do analizy łożysk ślizgowych silników spalinowych w zakresie nieliniowym.

Dodać należy, iż prezentowane tu wyniki są rezultatem prac prowadzonych w ramach projektu badawczego KBN 5 T07 B 036 22 (kierownikiem projektu jest prof. R. Michalski z Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie) [3]

2. PRZEDMIOT BADAŃ

Przedmiot badań stanowi jednostka napędowa ciągnika rolniczego typu URSUS C-360 (rys.1). Jest to ciągnik średniej mocy przeznaczony do prowadzenia prac polowych oraz holowania przyczep o ładowności do 4,5 t.



Rys.1 Ciągnik kołowy Ursus C-360

Jednostką napędową ciągnika C-360 jest silnik typu S-4003 (rys.2) o mocy 38,3 kW i pojemności skokowej 3,12 dm³. Jest to silnik wysokoprężny, czterocyldrowy, rzędowy, którego dane techniczne przedstawiono w tab.1.

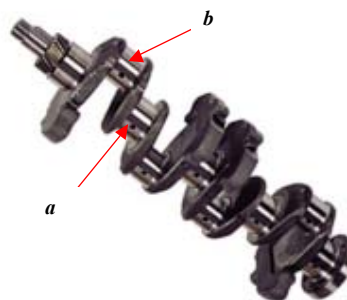


Rys. 2. Widok silnika S-4003

Tab. 1. Dane techniczne silnika S-4003

Moc maksymalna [kW/KM]	38,3/52
Średnica/skok tłoka [mm]	95/110
Pojemność skokowa [dm ³]	3,12
Stopień sprężania	17:1
Ilość cylindrów	4
Kolejność zapłonu	1-3-4-2
Maksymalny moment obrotowy [Nm]	186
Obroty nominalne [obr/min]	2200
Paliwo	Olej napędowy
Czynnik chłodzący	Ciecz

Wał korbowy (rys.3) silnika S-4003 jest podparty w pięciu punktach na łożyskach głównych o średnicy $\phi 70$ mm. Korbowody są połączone z wałem korbowym za pomocą łożysk korbowodowych $\phi 60$ mm.



Rys. 3. Wał korbowy silnika S-4003

3. KONCEPCJA ROZWIĄZANIA PROBLEMU – NARZĘDZIA BADAWCZE

Jak wynika z rozważań przeprowadzonych w rozdziale 1 podstawowy problem polega tu na odpowiednim skojarzeniu rozwiązań uzyskanych za pomocą systemów komputerowych do analizy liniowej konstrukcji z programami do analizy nieliniowej najbardziej newralgicznych elementów przyjętego obiektu. Skojarzenie to powinno być przeprowadzone w sposób umożliwiający wygenerowanie nieliniowych relacji diagnostycznych. W naszym przypadku będzie to znany komercyjny system ABAQUS, którym opisano odkształcenia wału korbowego pod wpływem ciśnienia spalania w cylindrach oraz autorski program TRADYN [1] do analizy przemieszczeń czopów łożyskowych w zakresie

nieliniowym (a więc analizy przy dużych i szybkich ich przemieszczeniach).

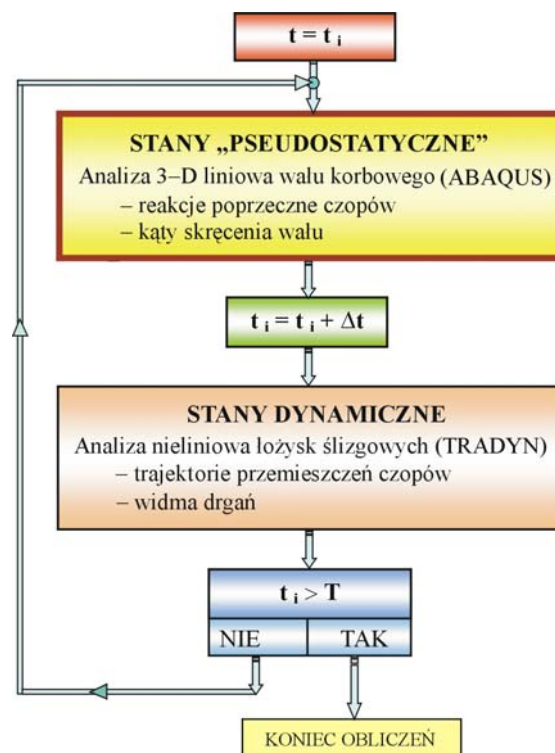
Podstawowym założeniem umożliwiającym odpowiednie kojarzenie wyników a więc w pewnym sensie integrację tak różnych systemów komputerowych jest stwierdzenie, że stany dynamiczne przyjętego układu można opisać jako sumę stanów „pseudostatycznych” liniowych w wystarczająco krótkich przedziałach czasu Δt . Założenie liniowości odnosi się tu wyłącznie do określenia dla danej chwili t_i wartości obciążeń poprzecznych Q_x , Q_y oraz kątów skręcenia wału φ wynikających z aktualnej wartości ciśnienia spalania w cylindrach w chwili t_i . Ponieważ przebieg ciśnienia spalania w cylindrach (wykresu indykatorowego) dla pełnego cyklu spalania wynoszącego w tym przypadku $T = \omega t = 720^\circ$ jest silnie nieliniowy, to również wartości Q_x , Q_y oraz φ w tym przedziale będą w efekcie nieliniowe, pomimo założenia liniowości zależności typu siła–przemieszczenie w danej chwili t_i i w krótkim przedziale czasu Δt (dla systemu ABAQUS). Z kolei przebieg wartości obciążeń Q_x , Q_y w cyklu pracy silnika oraz przyjęty przedział czasu Δt umożliwiają obliczenie przemieszczeń i przyspieszeń czopów w łożyskach, a więc uruchomienie procedury obliczeń już w pełni nieliniowych za pomocą programu TRADYN. Opisana powyżej koncepcja rozwiązania problemu została schematycznie przedstawiona na rys. 4.

Oczywiście sama idea linearyzacji związków w krótkich przedziałach czasu w zagadnieniach nieliniowych jest doskonale znana. Nowością proponowanego podejścia jest integracja wybranych parametrów wynikających z linearyzacji opisu stanu obiektu za pomocą jednego modelu z parametrami innego modelu i programu umożliwiającego już analizę nieliniową. W tym sensie stany opisywane przez ten pierwszy liniowy model określone zostały jako „pseudostatyczne”. Znane z literatury przykłady odnoszące się do zaawansowanych obliczeń układów korbowych różnego rodzaju silników odnoszą się najczęściej do analizy modalnej bez wpływu łożysk lub analizy drgań wymuszonych, w której łożyska, jeśli w ogóle są uwzględniane, to w formie zlinearyzowanych głównych współczynników sztywności i tłumienia filmu olejowego bez tzw. współczynników skośnych. Taka analiza nie wygeneruje oczywiście najbardziej wartościowych z punktu widzenia diagnostyki nieeliptycznych trajektorii z ukrytymi defektami i stosownych widm drgań.

Autorom niniejszego opracowania nie są znane podobne rozwiązania stosowane przez innych badaczy.

Program ABAQUS jest znanym komercyjnym systemem komputerowym o zasięgu światowym, nie wymaga on zatem bliższego opisu.

Program TRADYN jest autorskim programem (autor: J. Kiciński) opracowanym w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku [1]. Rozwiązuje on równania ruchu metodą Eulera automatycznie dobierając krok całkowania w zależności od przyjętej dokładności obliczeń. Program wyposażony został w pełny pakiet procedur graficznych umożliwiających wizualną interpretację zarówno obciążeń zewnętrznych jak i przebiegów trajektorii czopa w łożysku i ciśnienia w filmie olejowym. Program ten został poddany gruntownej weryfikacji w warunkach laboratoryjnych. Był on też stosowany wielokrotnie w obliczeniach łożysk okrętowych silników spalinowych (na zlecenie Akademii Morskiej w Gdyni [2]) oraz w obliczeniach łożysk wielu innych maszyn i urządzeń, dając w pełni wiarygodne wyniki.



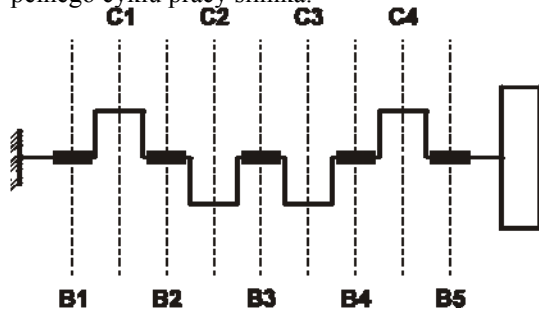
Rys. 4. Algorytm obliczeń w zakresie nieliniowym

4. OBCIĄŻENIA ZEWNĘTRZNE

Rys. 5 ilustruje schemat układu korbowego silnika wraz z numeracją cylindrów i łożysk.

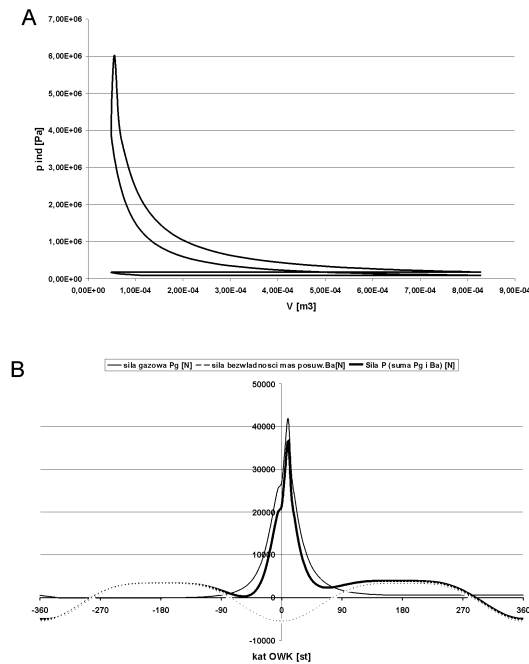
Rys. 6A przedstawia przebieg zmian ciśnienia w zależności od objętości przestrzeni roboczej pojedynczego cylindra. Oddziałując na denko tłoka powoduje powstanie siły gazowej P_g (rys. 6B). Wypadkowa P siły gazowej P_g i siły bezwładności B_a mas elementów będących w ruchu posuwisto-zwrotnym jest siłą, która poprzez korbówód przenosi się na czop korbowy. Siłę tę rozkłada się następnie na siłę styczną T , prostopadłą do

płaszczyzny wykorbienia oraz na siłę normalną K działającą wzdłuż wykorbienia. Siły te mają zmienne wartości (rys. 9A). W wyniku działania siły stycznej na ramieniu odpowiadającym długości wykorbienia (a więc połowie skoku tłoka) powstaje moment obrotowy powodujący obrót wału korbowego. Fluktuacje siły stycznej powodują wahania chwilowej wartości momentu obrotowego, jak również wywołują drgania skrętne. Rys. 7B pokazuje zmiany momentów od sił stycznych dla poszczególnych wykorbień w czasie jednego pełnego cyklu pracy silnika.



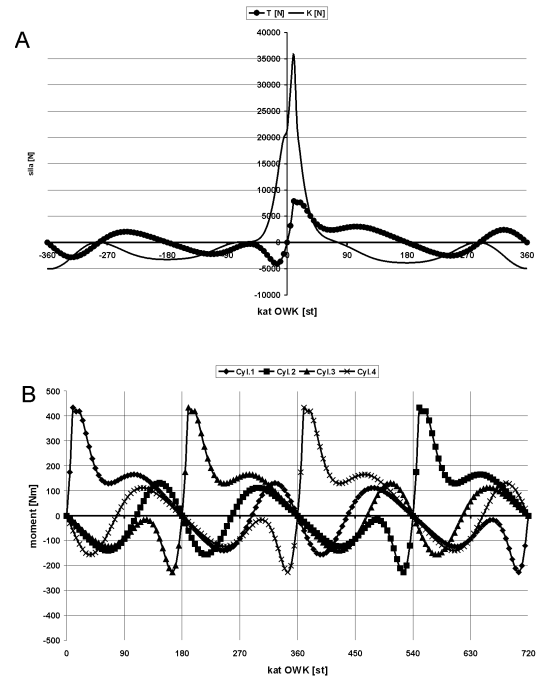
Rys. 5 Schemat układu korbowego silnika S-4003

Działanie sił stycznych i normalnych w poszczególnych wykorbieniach wywołuje siły poprzeczne (zmienne w czasie), obciążające poszczególne łożyska. Wprowadzając chwilowe wartości tych sił jako dane do obliczeń należy pamiętać o tym, iż cykle pracy w silniku czterosuwowym, czterocylindrowym występują co 180° OWK i występują kolejno w cylindrach 1-3-4-2 (kolejność zapłonów w cylindrach).



Rys. 6. Wykres indykatorowy przypadku bazowego

A – wykres typu pV
B – wykres w funkcji kąta OWK.



Rys. 7. Obciążenie wału korbowego dla przypadku bazowego.

A – siły styczne T i normalne K dla pojedynczego wykorbienia
B - momenty od sił stycznych działających na wał dla poszczególnych wykorbień

6. STAN ODNIESIENIA – PRZYPADEK BAZOWY

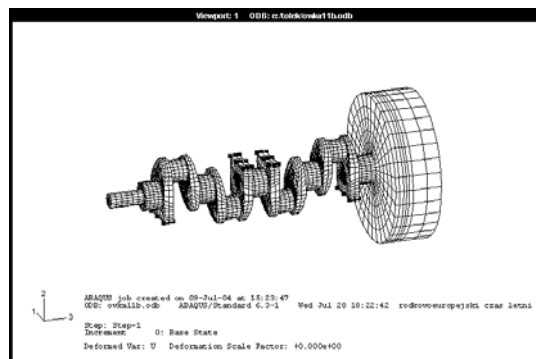
Pod pojęciem przypadku bazowego rozumiemy tu sytuację, w której silnik pracuje bez zakłóceń i osiąga wszystkie przewidziane parametry nominalne. Zakładamy, że każdy z czterech cylindrów generuje jednakowe obciążenia wału korbowego wynikające z przebiegu ciśnienia indykowanego jak na rys. 6 i 7. Oczywiście obciążenia te są przyłożone do układu z uwzględnieniem kierunku wykorbień wału i kolejności zapłonu w cylindrach.

Przedmiotem naszego szczególnego zainteresowania będą łożyska główne wału korbowego i w związku z tym reakcje poprzeczne i skrętne wału w miejscach jego posadowienia. Mamy tu zatem do czynienia z układem oddziaływań wzajemnie sprzężonych. Układ ten, statycznie niewyznaczalny, składa się z czterech cylindrów i pięciu łożysk – rys. 5. Rozwiązanie jest możliwe za pomocą przestrzennej analizy MES. Jak wspomniano wcześniej wykorzystano tu znany program komercyjny ABAQUS.

W pierwszym kroku, obliczenia sproszone zostały do klasycznej analizy modalnej przyjętego układu. Przyjętą dyskretyzację siatki MES układu korbowego przedstawia rys. 8. W tabeli 2

przedstawiono kilka pierwszych częstości własnych uzyskanych z obliczeń.

Siatka MES składa się z 11624 elementów i 15351 węzłów. Cały wał został zamodelowany przy pomocy elementów brylowych. Wpływ masy tłoków i korbowodów oraz przeciwcieżarów został uwzględniony poprzez odpowiednio dobrane masy. Całość opisywał układ 46053 równań.



Rys. 8. Siatka MES wału korbowego silnika S-4003

Tab. 2. Częstości własne układu korbowego

Nr formy	Częstość własna [Hz]
I	8,81E-05
II	116,36
III	192,94
IV	329,48
V	761,65
VI	831,98
VII	903,01
VIII	934,83

Wyniki analizy modalnej mają w tym przypadku jedynie znaczenie pomocnicze. Bardziej istotny jest, z punktu widzenia pracy węzłów łożyskowych i diagnostyki układu, wpływ sił poprzecznych i momentów skrętnych działających na wał korbowy w wyniku procesu spalania w cylindrach.

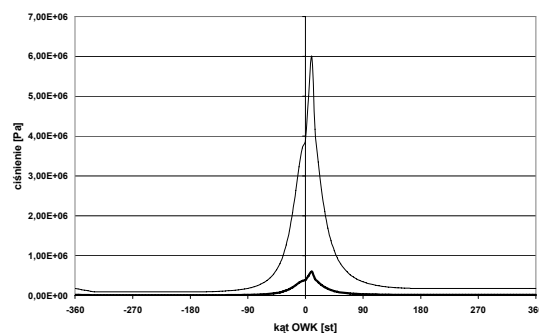
Przedstawione na rys. 6 i 7 przebiegi obciążenia wału stanowią punkt wyjścia do dalszych obliczeń związanych z przypadkiem bazowym. Obciążenia te generują bowiem poprzeczne reakcje Q_x oraz Q_y w miejscach posadowienia wału korbowego i determinują przebiegi trajektorii czopów w łożyskach ślizgowych.

7. NIEZDATNOŚĆ – NIESZCZELNOŚĆ KOMORY SPALANIA

Przyjęty model układu i algorytm obliczeń umożliwia zamodelowanie wielu klas niezdatności. Przyjęto, jako przykład możliwości zaproponowanej metodologii badań, tylko jedną,

dość typową niezdatność - nieszczelność komory spalania.

Odrębną kwestię stanowi przyjęcie konkretnych parametrów modelu właściwych dla danej niezdatności. Jest to zagadnienie bardzo trudne z uwagi na złożoność procesów tu zachodzących. Przyjmijmy zatem, z braku lepszych danych, że niezdatność tą możemy odwzorować dużym, ale proporcjonalnym spadkiem ciśnienia indykatorowego np. mnożąc przebieg tego ciśnienia przez współczynnik równy 0,1 (jak w niniejszej pracy), lub inny. Propozycję taką przedstawia rys. 9.



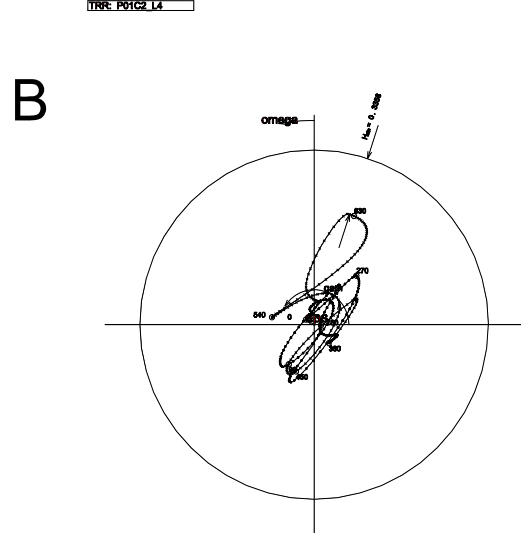
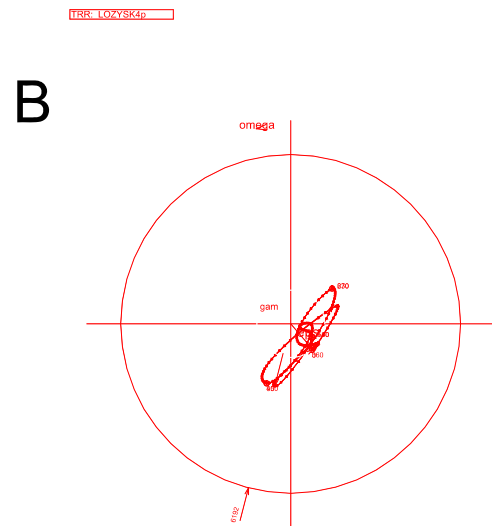
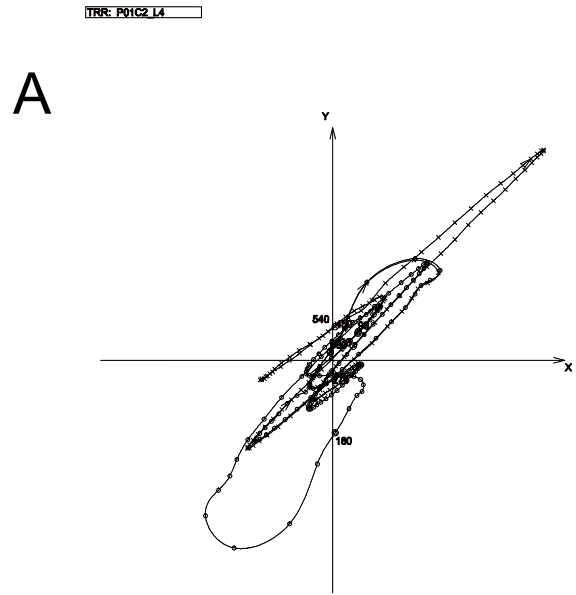
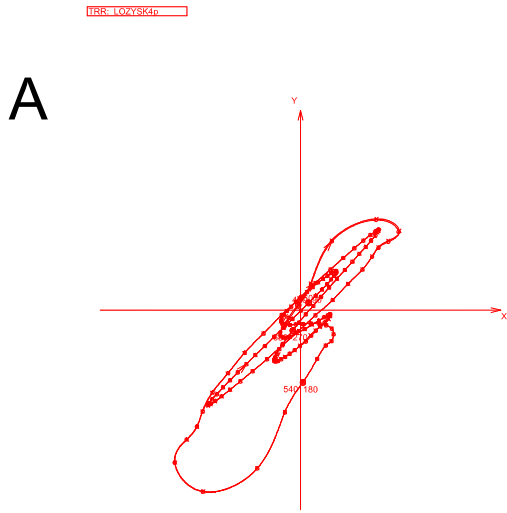
Rys. 9. Przebieg ciśnienia spalania w przyjętym do obliczeń przypadku z niezdatnością (gruba linia) w porównaniu z przypadkiem bazowym (linia cienka)

Do dalszych rozważań przyjęto, iż modelowana niezdatność wystąpiła w cylindrze nr 2. Stosownie do zmienionych obciążeń w tym cylindrze przeprowadzone zostały obliczenia przypadków niezdatności programem ABAQUS i TRADYN według algorytmu opisanego w rozdziale 3.

Oczywiście można w analogiczny sposób badać wpływ tych niezdatności w innych cylindrach i w zależności od innych wartości współczynników zmieniających kształt wykresów indykatorowych. Można też badać wpływ niezdatności z innych klas np. wadliwej pracy samych łożysk a w tym np.: przeciążenia łożysk, deformacje szczeliny smarnej czy niewłaściwe smarowanie itd. Badania tego rodzaju wykraczają jednakże poza zakres niniejszego opracowania.

8. WYNIKI OBLICZEŃ

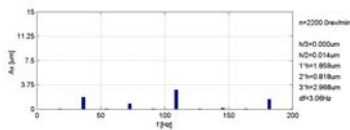
Poniższe rysunki przedstawiają przyjęte do obliczeń wykresy biegunowe obciążeń łożysk, oraz otrzymane w ich wyniku trajektorie czopów w łożyskach, przestrzenne rozkłady ciśnień w filmie smarnym i widma drgań w wybranych punktach układu.



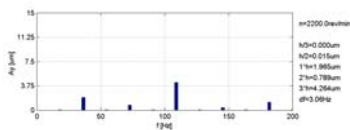
Rys. 10. Przebieg obciążenia A i przemieszczeń czopa B w łożysku nr 3 – przypadek bazowy

Rys. 11. Przebieg obciążenia A i przemieszczeń czopa B w łożysku nr 3 – przypadek z niezdatnością

kier. X

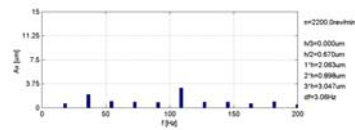


kier. Y

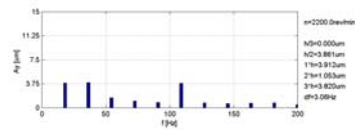


Rys. 12. Widma drgań składowych przemieszczeń poprzecznych czopa łożyska nr 3 – przypadek bazowy

kier. X



kier. Y



Rys. 13. Widma drgań składowych przemieszczeń poprzecznych czopa łożyska nr 3 – przypadek z niezdatnością

