

WYKORZYSTANIE ZWIĄZKÓW USZKODZENIE – SYMPTOM – ZADANIE FUNKCJONALE W PROJEKTOWANIU ELEMENTÓW UKŁADU NAPĘDOWEGO

Robert GUMIŃSKI, Stanisław RADKOWSKI

Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Politechnika Warszawska
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, (022) 660 86 22, rgumin@simr.pw.edu.pl, ras@simr.pw.edu.pl

Streszczenie

Użycie w trakcie projektowania informacji o uszkodzeniach ma decydujący wpływ na zapobieganie uszkodzeniom. Aby podczas projektowania nowych wyrobów ocenić ich funkcjonowanie potrzebna jest wcześniej zdobyta wiedza, doświadczenie i możliwości diagnostyczne. W artykule wykorzystano podobieństwo istniejące między różnymi rodzajami uszkodzeń pod względem wykrywalności i funkcjonalności elementu. Metoda ta została wykorzystana do elementów przekładni zębatej by przedstawić uszkodzenia i metody diagnostyczne które można wykorzystać przy spełnianiu wymogów bezpieczeństwa.

Słowa kluczowe: Zapobieganie uszkodzeniom w projektowaniu, diagnostyka

USING THE FAILURE SYMPTOM FUNCTION RELATIONSHIPS IN DESIGN OF THE UNIT POWER ELEMENTS

Summary

Using failure mode information during design is a crucial task for failure prevention. When new products are being designed the prior knowledge and experience as well possibility of diagnostic information detection might help designers to estimate the products lifetime. This paper makes use of similarities that exist between different failure modes based on the detectability and functionality of component. The method is applied to gearbox components and is proposed as a means to account power unit failure modes and diagnostic, addressing stringent safety and performance requirements for high risk applications.

Keywords: Failure prevention in design, diagnosis

1. WPROWADZENIE

Identyfikacja zagrożeń związanych z wystąpieniem możliwych uszkodzeń jest decydującym elementem analizy ryzyka na etapie projektowania oraz w procedurach podejmowania decyzji eksploatacyjnych. Niezawodność, zakres obsługi i naprawy, a przede wszystkim satysfakcjonująca realizacja zadań funkcjonalnych wytworu w znacznym stopniu zależy od zrozumienia, zdolności detekcji i wynikających stąd sposobów eliminacji mechanicznych uszkodzeń jak i doboru sposobów prewencji. Mechaniczne uszkodzenie obejmuje zmiany rozmiarów i kształtu, zmiany właściwości materiałów, węzłów, struktury elementów, podzespołów i zespołów maszyn oraz maszyn, które objawiają się w postaci niezdolności do właściwej realizacji wyznaczonych funkcji [1]. W nowoczesnym ujęciu projektowania przyjmuje się

[13], że dla osiągnięcia założonych celów niezbędnym jest rozpoznanie i ocenienie krytyczności wszystkich potencjalnych rodzajów uszkodzeń już na koncepcyjnym etapie projektowania. Sposób zaproponowany w [13] jest rozszerzeniem metody podobieństwa funkcjonalności różnych wytworów [11] na analizę podobieństwa rodzajów uszkodzeń, które mogą wystąpić w ciągu ich funkcjonowania, w określonej rodzinie składowych i wytworów.

Odpowiednio wektor rodzajów uszkodzeń jest definiowany na podstawie standardowych rodzajów uszkodzeń, opracowanych przez Collinsa i zaprezentowanych w pracy [1]. Sposób określania kategorii i podkategorii uszkodzeń według Collinsa przytoczono w tabeli 1. Zgodnie z przedstawioną metodologią, należy przede wszystkim określić wektor rodzajów uszkodzeń $F(n)$, zwykle występujących w rozważanym obszarze aplikacji.

W podobny sposób określa się wektor wszystkich elementarnych zadań funkcjonalnych $E(r)$, które powinny być realizowane przez składowe projektowanego wytworu.

Tabela 1. Podstawowe kategorie uszkodzeń

| Główne kategorie | Podkategorie | Główne kategorie | Podkategorie |
|-----------------------|--|--|-------------------------|
| Elastyczne deformacje | Wywołane siłą Wywołane temperaturą | Uderzenie | Pęknięcie Deformacja |
| Ugięcie | | | Zużycie Fretting |
| Plastyczne zerwanie | | | Zmęczenie |
| Kruche pęknięcie | | Fretting | Zmęczenie |
| Zmęczenie | Wysoko cyklowe Nisko cyklowe Ciepłne Powierzchniowe | | Zużycie Korozja |
| | Uderzeniowe | Pełzanie Relaksacja termiczna | |
| | Korozja | Naprężeniowe pęknięcie, zerwanie | |
| | Fretting | Wstrząs termiczny | |
| Korozja | Aktywność czynnika chemicznego Galwaniczna | Zacieranie i zakleszczenie Łuszczenie | |
| | Pitting | Szkodliwe promieniowanie | |
| | Międzyziarnowa | Wyboczenie | |
| | Wypłukiwanie | pelzające | |
| | Erozja | Korozja naprężeniowa | |
| | Kawitacja | Zużycie korozyjne | |
| | Szkodliwy wpływ wodoru | Zmęczenie korozyjne | |
| | Biologiczna | Pełzanie i zmęczenie | |
| Zużycie | Naprężenie Adhezyjne Ścierne Korozyjne Zmęczenie powierzchniowe Deformacja Uderzenie Fretting | | |

Następnie uwzględniając zbiór elementów wytworu tworzone są macierze $CF(m \times n)$ oraz $EC(r \times m)$, które odpowiednio ujmują związki pomiędzy zbiorem składowych i zbiorem uszkodzeń (macierz uszkodzeń składowych) oraz zbiorem składowych i zbiorem elementarnych zadań funkcjonalnych (funkcjonalna macierz składowych)

Tabela 2. Macierz uszkodzeń składowych(CF)

| | F1: zużycie | F2: zmęczenie | F3: korozja | F4: fretting | F5: uderzenie |
|------------------|-------------|---------------|-------------|--------------|---------------|
| C1: koła | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| C2: łożyskowanie | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| C3: wałek | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |

Tabela 3. Funkcjonalna macierz składowych (EC)

| | koła | łożyskowanie | wałek |
|---|------|--------------|-------|
| E1: zmiana energii mechanicznej | 1 | 0 | 0 |
| E2: kierowanie energii mechanicznej | 1 | 0 | 1 |
| E3: przenoszenie energii mechanicznej | 1 | 0 | 1 |
| E4: pozycjonowanie energii mechanicznej | 0 | 1 | 0 |
| E5: stabilizowanie energii mechanicznej | 0 | 1 | 0 |

Macierz EC jest konstruowana jako macierz binarna, gdzie wartość 1 oznacza, że określony element realizuje pewne zadanie funkcjonalne, natomiast wartość 0 wskazuje na brak takiego związku. Macierze CF i EC są wykorzystywane do analizy związków pomiędzy poszczególnymi zadaniami funkcjonalnymi a rodzajami uszkodzeń dla analizowanego zbioru składowych wytworu w zadanym zakresie aplikacyjnym.

$$EF(r \times n) = EC(r \times m) \times CF(m \times n) \quad (1)$$

Tabela 4. Funkcjonalna macierz uszkodzeń (EF)

| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|----|----|----|----|----|----|
| E1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| E2 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 |
| E3 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 |
| E4 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| E5 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |

Każdy element funkcjonalnej macierzy uszkodzeń ef_{ij} , wskazuje czy określony element realizujący zadanie i może być zniszczony przez rodzaj uszkodzenia j .

Tak otrzymana macierz $EF(r \times n)$ jest podstawą do wyznaczenia potencjalnych rodzajów uszkodzeń dla analizowanej składowej wytworu, natomiast bezpośrednio dostarcza informacje odnośnie skorelowania określonych funkcji z analizowanymi rodzajami uszkodzeń.

2. WYKORZYSTANIE USZKODZENIOWO ZORIENTOWANYCH PARAMETRÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Zauważmy, że w przedstawionej metodzie milcząco zakłada się, że przyjęta zasada podobieństwa odnośnie rodzajów uszkodzeń, może być traktowana jako tożsama z zadaniem detekcji, identyfikacji i lokalizacji uszkodzeń. Przyjęcie takiego założenia w praktyce oznacza możliwość pominięcia problematyki diagnozowania rozwoju uszkodzeń.

Niestety, jak wskazuje praktyka przemysłowa, próby pominięcia procedur diagnozowania procesów degradacyjnych i zmęzeniowych w wielu przypadkach doprowadziły do awarii z katastroficznymi konsekwencjami. Równocześnie diagnozowanie wczesnych faz rozwoju tego typu uszkodzeń, mimo rozwoju metod diagnozowania i zastosowania wysublimowanych środków diagnostycznych w dalszym ciągu nie jest zadaniem trywialnym.

Jednym z podstawowych celów diagnostyki jest odpowiednio wczesne podanie informacji o osiągnięciu przez uszkodzenie stanu zagrażającego realizacji zadań funkcjonalnych bądź możliwości wystąpienia uszkodzenia katastroficznego.

We wstępnym okresie rozwoju diagnostyki wibroakustycznej podstawą do sformułowania diagnozy był, przeprowadzony na obudowie łożyska, pomiar wartości skutecznej drgań, obliczonej dla całego pasma częstotliwości. Jako następny etap rozwoju diagnostyki przekładni zębatych Smith [12] wyróżnia okres, w którym zastosowano pasmową analizę częstotliwości, stanowiącą podstawę do estymacji kurtozy i będącej podstawą do prowadzenia analiz porównawczych z rozkładem Gaussa, przyjmowanym jako rozkład referencyjny.

Obecnie w literaturze można spotkać przykłady zastosowań w diagnostyce przekładni różnych narzędzi i metod analizy sygnału poczynając od widma mocy, synchronicznych uśrednień w dziedzinie czasu, analizy falkowej, sieci neuronowych, analizy widma wyższego rzędu, demodulacji i innych, jednak często opracowane na ich podstawie sygnały ostrzegawcze przychodzą za późno lub wcale, bądź liczba fałszywych alarmów jest tak duża, że operatorzy układów napędowych tracą resztki zaufania do zainstalowanych systemów diagnostycznych.

Jednym z głównych powodów wspomnianych trudności i wielu rozczarowań jest przekonanie, że warunkiem osiągnięcia wiarygodnej diagnozy stanu technicznego przekładni zębatej jest dostęp do nowoczesnych metod analizy sygnału. W rzeczywistości jest to warunek konieczny, ale nie

wystarczający. Okazuje się, że głównym problemem jest taki dobór metod i środków diagnostycznych, aby możliwa była detekcja informacji uszkodzeniowo zorientowanej, zarówno jeśli chodzi o typ uszkodzenia jak i fazy jego rozwoju.

Podstawą takiego działania jest zrozumienie i określenie wpływu poszczególnych uszkodzeń na zachowanie się przekładni i związany z tym proces generacji sygnału wibroakustycznego. Takie ujęcie pozwoli w następnym kroku wykorzystać tak uzyskaną informację diagnostyczną do modyfikacji modeli niezawodnościowych. Dla przybliżenia tego sposobu rozwiązania zadania diagnostycznego w pierwszej kolejności przeanalizujemy rodzaje głównych uszkodzeń występujących w przekładni zębatej.

Jako przykład takiego sposobu podejścia rozpatrzmy problem diagnozowania uszkodzeń zębów pary kół zębatych traktując, że diagnozowanie łożysk tocznych jest z tego punktu widzenia łatwiejsze [9]. Przede wszystkim zauważmy, że podstawowe składowe widma sygnału wibroakustycznego w pasmach niskich i średnich częstotliwości są związane z oddziaływaniem wymuszeń oraz są funkcją głównych parametrów geometrycznych przekładni oraz jakości wytwarzania elementów przekładni oraz jakości jej montażu. Natomiast powstawanie i rozwój eksploatacyjnych uszkodzeń oraz ewolucja degradacyjnych procesów w przekładni będzie mieć wpływ na zmianę modulacyjnych charakterystyk zarówno w pasmach związanych z drganiami własnymi jak i wymuszonymi przekładni. Przyjmując za podstawę wyniki analizy związku pomiędzy uszkodzeniami powierzchni kontaktowych a zaburzeniami warunków współpracy zębów wzdłuż odcinka przyporu, rozważmy wynikające stąd możliwe zaburzenia procesu generacji sygnału wibroakustycznego, modele zmian struktury widma oraz związany z tym dobór koniecznego sposobu obróbki sygnału.

Według danych zamieszczonych w literaturze [2], do najważniejszych uszkodzeń eksploatacyjnych zębów należą: zmęczeniowe wykruszenie warstwy wierzchniej współpracujących profili zębów (pitting), zmęczeniowe i doraźne złamania zębów, zatarcie współpracujących powierzchni, zużycia cierne. Odnośnie krytyczności zagrożeń związanych z różnymi uszkodzeniami w literaturze można spotkać bardzo zróżnicowane opinie. Na przykład za najbardziej niebezpieczne Niemann [6] uważa zjawisko pittingu. Zwraca przy tym uwagę na konieczność rozpoznawania i interwencji już w początkowych stadiach rozwoju tego typu uszkodzenia, szczególnie w obiektach których awaria zagrożona jest dużymi konsekwencjami. Natomiast Gienkin i Sokolowa [3] największe

ryzyko awarii przypisują zjawisku zatarcia. Przed wszystkim zwracają uwagę na lawinowy rozwój zacierania, praktycznie od momentu powstania uszkodzenia.

Analizując zmiany warunków współpracy kół zębatych wywołanych zjawiskami pittingu, zacierania lub rozwojem pęknięć można zauważyć, że w każdym przypadku wystąpienie uszkodzenia prowadzi do zaburzenia warunków przyporu, przy czym rodzaj zaburzeń jest jakościowo różny.

Pitting jest zjawiskiem zmęczeniowym i objawia się w postaci drobnych wykruszeń powierzchniowych, które są następstwem cyklicznie powtarzających się nacisków stykowych w miarę wchodzenia w przypór i przemieszczania się punktu przyporu. Proces zmęczeniowego uszkodzenia powierzchni rozpoczyna się zwykle u podstawy zęba, w strefie ujemnego poślizgu i ma bezpośredni wpływ na wielkość odkształceń zęba w punkcie przyporu. Wynika to z faktu, że wypadkowe odkształcenie zęba zależy zarówno od deformacji w punkcie kontaktu jak od odkształceń giętych całego zęba [5]. Przy założeniu, że proces zmęczeniowego uszkodzenia rozpoczyna się od pojedynczego zęba, raz na obrót wału nastąpi odpowiednio większe przesunięcie punktu przyporu względem jego hipotetycznego, teoretycznego położenia. Wywoła to efekt zmodulowania okresu podziałki zasadniczej z częstotliwością równą częstotliwości obrotów wału lub wałów, powodując tym samym występowanie dodatkowych składowych w pasmach wokół odpowiednich częstotliwości nośnych.

Z uszkodzeniem typu pitting związane jest okresowe zaburzenie warunków przyporu, zgodne z obrotem wału na którym osadzone jest koło z uszkodzonym zębem. Wchodzenie w przypór zęba z uszkodzoną powierzchnią boku generuje cykliczne zaburzenie, w którego detekcji i analizie skuteczną pomoc stanowi synchroniczne uśrednianie sygnału, zgodnie z częstotliwością obrotową odpowiedniego wału.

W fazie rozwiniętego pittingu, gdy uszkodzenie w postaci kilkudziesięciu jam obejmuje 80-90% powierzchni boku u podstawy zęba, zmiana warunków zaburzeń jest bardziej skomplikowana i może prowadzić z jednej strony do wystąpienia ustalonego ugięcia na wszystkich zębach z drugiej strony do wystąpienia częstotliwości zazębienia przez liczbę jam pittingowych. Wywołane w ten sposób wysokoczęstotliwościowe zaburzenie jest słabo mierzalne na obudowach łożyska wału, ze względu na efekt tłumienia dynamicznego oraz dominujące zjawisko odbicia krótkotrwałych impulsów zarówno przez łożyska ślizgowe jak i toczone [12].

Pierwszy efekt dodatkowego odkształcenia zębów prowadzi do przesunięcia punktu kontaktu zębów na odcinku przyporu wywołując efekt uderzeniowego wejścia w przypór. Skutki tego typu współpracy zębów można obserwować analizując strukturę obwiedni wąskopasmowego procesu wibroakustycznego.

Złamanie zęba może nastąpić wskutek gwałtownego przeciążenia lub jako efekt zmęczenia materiału. Zmęczeniowe złamanie zęba następuje w miejscu największej koncentracji naprężeń i jest wynikiem powtarzających się wielokrotnie cykli naprężeń w niebezpiecznym przekroju zęba. Pierwszy rodzaj złamania jest trudny do przewidzenia, bowiem samo zjawisko przeciążenia ma przeważnie charakter czynnika zewnętrznego (awaria innych zespołów, błąd sterowania). Drugi rodzaj złamania może być prognozowany na podstawie zmian zarówno przebiegu czasowego jak i struktury częstotliwościowej widma. W tym przypadku, oprócz zaobserwowanego przy pittingu zaburzenia warunków przyporu, wystąpi dodatkowo zakłócenie okresu przyporu [10] oraz efekt zmodulowania częstotliwości drgań własnych zębów. Jeżeli przyjmiemy, że podobnie jak poprzednio, tylko jeden ząb został uszkodzony to analizowana funkcja modulująca będzie miała częstotliwość odpowiadającą obrotom wału [3].

Głównym efektem powstawania pęknięcia u podstawy zęba jest zmniejszenie jego sztywności giętej. W skrajnym przypadku można mówić o zaniku sztywności do tego stopnia, że ząb nie jest w stanie przejąć na siebie żadnej części obciążenia. Zauważmy, że jest to sytuacja powtarzająca się okresowo z każdym wejściem zęba w przypór, co określa skuteczność operacji uśredniania sygnału w detekcji informacji o rozwijającym się procesie zmęczeniowego uszkodzenia zęba.

Trzecią główną kategorią uszkodzeń zęba jest zjawisko zacierania, występuje na boku zęba. Zatarcie zębów występuje wówczas, gdy dochodzi do metalicznego styku i mikrosparania współpracujących zębów w warunkach wysokiej temperatury, niedostatecznego smarowania oraz nadmiernych nacisków powierzchniowych. Względny ruch współpracujących powierzchni zębów powoduje ich zniszczenie przez rysowanie, mikroskrawanie i bruzdowanie. W odróżnieniu od pittingu i zmęczeniowego złamania zęba zatarcie jest uszkodzeniem doraźnym, które może być zapoczątkowane nawet przez krótkotrwałe przeciążenie. Wyróżnia się kilka faz rozwoju zatarcia: I – początkową fazę zatarcia, II – rozcieranie, III – fazę progresywnego zatarcia, IV – zatarcie z odkształceniami plastycznymi.

Ze względu na lawinowy charakter rozwoju tego typu uszkodzenia, głównym celem diagnozowania

staje się w tym przypadku rozpoznanie fazy początkowej i uniemożliwienie osiągnięcia, grożących awarią przekładni faz III i IV.

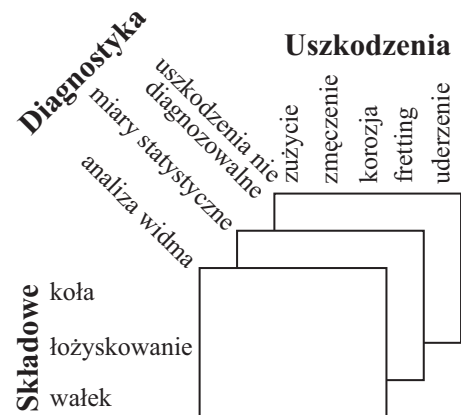
Zjawisko zatarcia nie jest powtarzalne okresowo, szczególnie w I i II fazie procesu. Poszczególne strefy przycierania mogą praktycznie co kilka obrotów przemieszczać się po powierzchni zęba a nawet zanikać, by po pewnym czasie pojawiać się na nowo. Oznacza to, że operacja uśredniania przez dużą liczbę obrotów będzie prowadzić do wygładzenia sygnału, a jej skutkiem będzie usuwanie z sygnału zaburzeń wywołanych efektem zacierania. W podobny sposób będą zanikać, w trakcie operacji uśredniania, efekty zaburzeń warunków przyproru związane z występowaniem w oleju przekładniowym zanieczyszczeń i opiłków żelaza, bowiem w tym przypadku zaburzenie ma charakter impulsowy i nie regularny. Stąd diagnozowanie początkowych faz uszkodzeń, których losowy charakter związany jest nie tylko z amplitudą ale także z okresem ich występowania, wymaga zastosowania specjalnych metod analizy sygnału. Jako jedną z możliwych Giemkin i Sokolowa [3] wskazuje na badanie rozkładu prawdopodobieństwa chwilowych wartości wąskopasmowego sygnału wibroakustycznego, w wybranym paśmie częstotliwości drgań wymuszonych. W tym przypadku również efektywną może okazać się analiza modulacji częstotliwościowej. W pasmach modulowanych będą również widoczne zmiany warunków smarowania przez zwiększenie poziomu szumu, parametrem diagnostycznym tych zaburzeń może okazać się wzrost wariancji i wyższych momentów obwiedni.

Ścieranie zębów jest szczególnie intensywne w momencie rozruchu przekładni, kiedy pomiędzy współpracującymi powierzchniami zębów smarowanie jest niewystarczające lub w ogóle go nie ma. Niemann [6] wprowadza cztery fazy zużycia zębów, następujące stopniowo po sobie, wraz z wydłużeniem się okresu eksploatacji. Wynika stąd, że zaawansowane zużycie ścierne zębów spowoduje wzrost luzu międzyzębowego; w efekcie uderzeniową pracę przekładni, objawiającą się wzmocnieniem wyższych harmonicznych częstotliwości zazębienia oraz podniesieniem ogólnego poziomu widma, praktycznie w całym zakresie częstotliwości [3 i 4]

Szczegółowy opis procesu ścierania jak i innych typów uszkodzeń zębów w przekładni zębatej przedstawiono podczas jednej z poprzednich konferencji Diagnostyka Maszyn Roboczych i Pojazdów [8].

3. ANALIZA PODOBIENSTWA USZKODZENIE – PARAMETR DIAGNOSTYCZNY

Warto by przedstawioną na początku analizę poszerzyć o aspekt detekcji uszkodzenia w funkcji fazy rozwoju i rodzaju uszkodzenia. Biorąc pod uwagę informacje na temat diagnozowania kół zębatych i łożysk tocznych rozbudowano dwuwymiarową macierz CF o wymiar diagnostyczny i w ten sposób powstała trójwymiarowa macierz CFD wiążąca składowe i rodzaje uszkodzeń z metodami diagnozowania.



Rys 1. Schematyczne przedstawienie macierzy CFD

Tabela 5. Macierz CFD – kolejne warstwy

| | D1: analiza widma | | | | |
|------------------|------------------------|---------------|-------------|--------------|---------------|
| | F1: zużycie | F2: zmęczenie | F3: korozja | F4: fretting | F5: uderzenie |
| C1: koła | 1 | 2 | 0 | 1 | 0 |
| C2: łożyskowanie | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| C3: wałek | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | D2: miary statystyczne | | | | |
| | F1: zużycie | F2: zmęczenie | F3: korozja | F4: fretting | F5: uderzenie |
| C1: koła | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C2: łożyskowanie | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C3: wałek | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

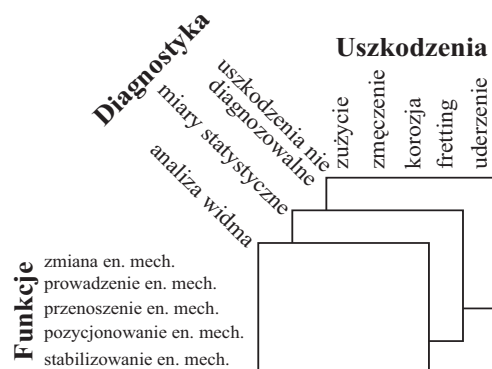
| | | | | | |
|-----------------------------------|-------------|---------------|-------------|--------------|---------------|
| D3: uszkodzenia nie diagnozowalne | F1: zużycie | F2: zmęczenie | F3: korozja | F4: fretting | F5: uderzenie |
| C1: koła | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| C2: łożyskowanie | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C3: wałek | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Każdy element macierzy cfd_{ijk} oznacza ile uszkodzeń kryjących się pod głównym rodzajem uszkodzenia j mogących wystąpić w składowej i może być diagnozowanych przy użyciu metody k . Nie możemy się tu posługiwać tylko głównymi rodzajami uszkodzeń, ponieważ nawet dla tej samej składowej mogą być różnie diagnozowane zależnie od postaci uszkodzenia. Przykładowo jeśli mówimy o zmęczeniowym uszkodzeniu koła może to być pitting ale może to być też zmęczeniowe wyłamanie zęba, w tym przypadku oba uszkodzenia mogą być diagnozowane przez analizę widma sygnału wibroakustycznego. Natomiast jeśli rozpatrujemy zużycie koła zębatego może to być ścieranie wykrywane przez analizę widma ale może to być również zacieranie, które może być diagnozowane przez analizę statystyczną sygnału wibroakustycznego. Dlatego też nie zawsze dla głównych rodzajów uszkodzeń można jednoznacznie wyznaczyć metody diagnozowania i dlatego jesteśmy zmuszeni korzystać z szczegółowego podziału uszkodzeń.

Należy zwrócić uwagę, że w analizie powinny być uwzględnione wszystkie występujące rodzaje uszkodzeń, ponieważ nie możemy z góry założyć, że określony rodzaj uszkodzenia nie wystąpi. Natomiast dążymy do ograniczenia metod diagnozowania, jeśli występuje kilka metod umożliwiających wykrycie danego rodzaju uszkodzenia dla określonego elementu w analizie uwzględniamy tylko jedną, wybieramy metodę dla nas korzystniejszą (dostępność sprzętu, znajomość metodyki itp.).

Wymnażając macierz EC przez wszystkie warstwy macierzy CFD otrzymujemy macierz EFD, która wiąże funkcje i uszkodzenia z metodami diagnostycznymi.

$$EFD = EC \times CFD \quad (2)$$



Rys 2. Schematyczne przedstawienie macierzy EFD

Tabela 6. Macierz EFD – kolejne warstwy
 D1: analiza widma

| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|----|----|----|----|----|----|
| E1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 0 |
| E2 | 1 | 3 | 0 | 1 | 0 |
| E3 | 1 | 3 | 0 | 1 | 0 |
| E4 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| E5 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |

D2: miary statystyczne

| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|----|----|----|----|----|----|
| E1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| E2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| E3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| E4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| E5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

D3: uszkodzenia nie diagnozowalne

| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|----|----|----|----|----|----|
| E1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| E2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| E3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| E4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| E5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Aby macierz CFD budować w określonym standardzie, celowym wydaje się uporządkowanie metod diagnozowania podobnie jak uczyniono to z rodzajami uszkodzeń. Problemem diagnozowania jest poświęconych wiele publikacji np. [14]. Spotyka się różne propozycje podziału metod diagnozowania, jedna z nich zawarta w [7] (tabela 7), wydaje się że może być przyjęta za podstawę opracowania takiej systematyki.

Tabela 7. Metody diagnozowania uszkodzeń

| | | |
|--------------------------------|---|---|
| • modelowo wsparta diagnostyka | • modele wpływu zaburzeń – modele zaburzonego funkcjonowania (badanie zmian sygnału) | • model propagacji zaburzeń • jakościowe grafy procesu przyczynowego |
| | • modele normalnego funkcjonowania (generowanie residuów) | • funkcjonalna dekompozycja modelu • modele strukturalne • jakościowe modele funkcjonalne |
| • diagnostyka symptomowa | • metody statystyczne • metody analizy trendów • metody rozpoznawania obrazów z wykorzystaniem sztucznej inteligencji | |

4. WNIOSKI

W nowoczesnych metodach projektowania coraz częściej podejmuje się próby włączenia informacji o rodzajach i konsekwencjach występujących uszkodzeń do procedur decyzyjnych w trakcie projektowania. Wydaje się, że istotnym rozszerzeniem tego podejścia mogło być włączenie informacji o możliwości detekcji rodzajów i faz rozwoju uszkodzeń z wykorzystaniem metod diagnozowania w szczególności metod wibroakustycznych. Wymaga to dalszych prac nad zagadnieniem systematyzacji metod diagnozowania odwołującej się do fizycznej strony rozwoju uszkodzenia i ich związków z składowymi i funkcjami wykonywanymi przez te składowe.

LITERATURA

- [1] Collins J. A.: Failure of materials in mechanical design: analysis, prediction, prevention, Wiley Interscience 1993.
- [2] Dziama A., Michniewicz M., Niedźwiecki A.: Przekładnie zębate, Warszawa PWN, 1989
- [3] Gienkin M. D., Sokolova A. G., Vibroakusticheskaya Diagnostika Mashin i Mekhanizmov, Mashinostrojenije, Moscow 1987.
- [4] Kiyobiko U., Kouji H., Hiroshi K., Hiroyuki K.: On a Prognosis of Gear Surface Failure Using Sound of Gears, Bulletin of the JSME, 29 (203), 1982, str. 834–841.
- [5] Niemann G., Baethge J.: Drehwegfehler, Zahnfederhärte und Geräusch bei Stirnrädern, VDI – Zeitschrift, 112 (4), 1970 str. 205–214.
- [6] Niemann G., Winter H.: Maschinenelemente Band II. Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe – Grundlagen, Stirnradgetriebe, Berlin, Springer-Verlag, 1983.

- [7] Papadopoulos Y., McDermid J. A.: Automated Safety Monitoring: A Review and Classification of Methods, Comadem International, 2001.
- [8] Radkowski S.: Wykorzystanie sygnału wibroakustycznego w wykrywaniu uszkodzeń przekładni zębatej, Diagnostyka maszyn roboczych i pojazdów '99 Bydgoszcz – Borówno 1999.
- [9] Radkowski S.: Diagnozowanie łożysk tocznych, Inżynieria diagnostyki maszyn cz. 2 Edytorzy Zóltowski B., Cempel Cz., ITE Radom 2004.
- [10] Radkowski S., Samsonowicz J.: Modelowanie i symulacja komputerowa częstotliwości przyporu w ewolwentowych przekładniach zębatych, Przegląd Mechaniczny, 3, 1993.
- [11] Stone R. B., Wood K. L.: Development of a functional basis for design Journal of Mechanical Design 122 (4) 2000, str. 359-370
- [12] Smith J. D: Gear noise and vibration, Marcel Dekker, Inc. New York, Basel 1999.
- [13] Tumer T. Y., Stone R. B: Mapping Function to Failure Mode During Component Development ASME Design for Manufacturing Conference vol. DETC 2001/DFM – 21173, Pittsburgh USA 2001.
- [14] Zóltowski B., Cempel Cz., Inżynieria diagnostyki maszyn cz. 2, ITE Radom 2004



Mgr inż. **Robert Gumiński** uczestnik studiów doktoranckich na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej.



Prof. **Stanisław Radkowski** profesor Instytutu Podstaw Budowy Maszyn PW, kierownik zespołu Diagnostyki Technicznej i Analizy Ryzyka. Prezes Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej.

W pracy naukowej zajmuje się diagnostyką wibroakustyczną i analizą ryzyka technicznego.