

*diagnostyka agregatów pompowych, uszkodzenia,
analiza spektralna (FFT), analiza falkowa (WT)*

Paweł EWERT*, Czesław T. KOWALSKI*

WYKRYWANIE USZKODZEŃ W ZANURZONYCH AGREGATACH POMPOWYCH Z SILNIKAMI INDUKCYJNYMI

W artykule omówiono możliwości wykrywania niesprawności agregatów pompowych pracujących w zanurzeniu, między innymi w oczyszczalniach i przepompowniach ścieków. Przedstawiono przegląd podstawowych uszkodzeń pomp zanurzonych z silnikami indukcyjnymi oraz charakterystykę symptomów tych uszkodzeń. Do analizy sygnałów diagnostycznych (przyspieszenie drgań oraz prądy stojana silnika) zastosowano szybką transformatę Fouriera (FFT) i przekształcenie falkowe (WT). Przedstawiono wyniki badań zrealizowanych na obiektach rzeczywistych (agregaty pompowe w oczyszczalni ścieków oraz na pompy zanurzone w stanowisku laboratoryjnym).

1. WPROWADZENIE

Celem badań diagnostycznych jest określenie stanu obiektu w chwili uznanej za ważną. Przez porównanie stanu chwilowego rzeczywistego ze stanem wzorcowym można wydać orzeczenie o zdatności lub niezdatności obiektu technicznego, a także dokonać prognozy przyszłego stanu obiektu.

W przypadku agregatów pompowych pracujących w oczyszczalniach i przepompowniach ścieków bieżąca diagnoza ich stanu może zapobiec problemom zarówno technicznym, związanym z funkcjonowaniem systemu ściekowego oraz sanitarnym. Prowadzenie ciągłej kontroli tych urządzeń jest również wskazane ze względu na charakter pompowanej cieczy, która jest niejednorodna i może zawierać składniki powodujące szybkie zużywanie się elementów konstrukcyjnych, jak również powodować zatkania pomp. Ze względu na niejednokrotnie duże systemy kanalizacyjne, w skład których wchodzić może nawet kilkadziesiąt lokalnych przepompowni, wczesna in-

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, pawel.ewert@pwr.wroc.pl, czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl.

formacja o problemach technicznych jest szczególnie istotna. Taka informacja pozwala na zaplanowanie działań serwisowych i przyspiesza usuwanie awarii.

Najwygodniejszym sposobem określenia stanu agregatu pompowego, który pracuje w zanurzeniu jest pomiar jego prądów fazowych i szukanie w nich symptomów świadczących o uszkodzeniu. Ze względu na możliwość zainstalowania na korpusie pompy specjalnego wodoszczelnego akcelerometru możliwa jest również diagnostyka z wykorzystaniem analizy drgań mechanicznych.

Rozwój technik komputerowych umożliwia przetwarzanie, w czasie zbliżonym do rzeczywistego, zmierzonych sygnałów diagnostycznych za pomocą zaawansowanych algorytmów. Umożliwia to analizę sygnałów nie tylko pod kątem zawartości charakterystycznych dla uszkodzenia częstotliwości, ale również daje możliwość określenia czasu pojawienia się czy też zaniku interesującej składowej. W badaniach wykorzystuje się przekształcenia czasowo-częstotliwościowe oraz przekształcenie falkowe (WT) [1], [3]. Szczególnie przekształcenie falkowe daje duże możliwości w analizie sygnałów niestacjonarnych.

W literaturze stosunkowo niewiele miejsca poświęcono diagnostyce agregatów pompowych. W [1] oraz [5] podane są informacje o możliwości wykrywania częstotliwości charakterystycznych związanych z pracą wirników pomp oraz występowaniem kawitacji. W niniejszej pracy zależności te nie będą wykorzystywane. W [6] natomiast podano ogólne wiadomości na temat możliwych niesprawności (uszkodzeń) oraz ich symptomów dla jednostopniowych pomp wirnikowych. Jednakże informacje te są pewną sumą ogólnej wiedzy na temat widocznych objawów, której nie da się bezpośrednio wykorzystać w badaniach diagnostycznych opartych na analizie prądu oraz drgań mechanicznych. W [4] przedstawione zostały przyczyny drgań pomp oraz możliwe skutki, jakie może nieść zlekceważenie tych objawów przez obsługę.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań pomp zanurzonych pracujących w przepompowni w oczyszczalni ścieków oraz pomp zainstalowanych na stanowisku laboratoryjnym.

2. OBIEKT BADAŃ

Przedstawione poniżej badania dotyczą zatapialnych agregatów pompowych pracujących w oczyszczalniach i przepompowniach ścieków. Na rys. 1 przedstawiono przekrój typowego agregatu pompowego wyposażonego w rozdrabniacz. W jego konstrukcji wyróżnić można trzy zasadnicze bloki:

1. Silnik napędzający.

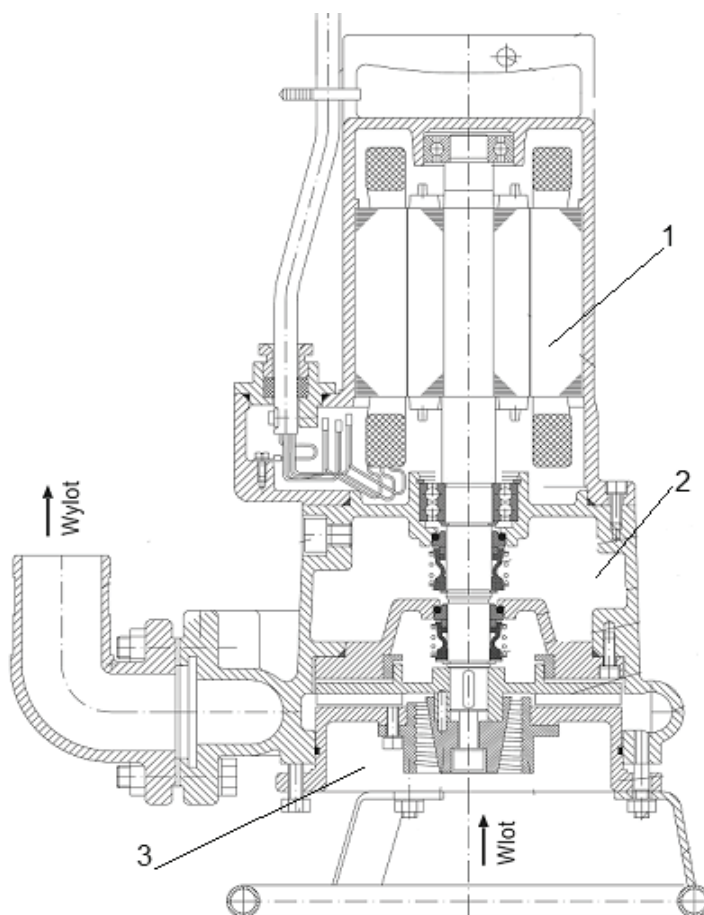
Wszystkie seryjnie produkowane zatapialne agregaty pompowe wyposażone są w silniki indukcyjne. Takie rozwiązanie podyktowane jest przede wszystkim ich wysoką niezawodnością oraz niską ceną.

2. Sprzęgło wraz z uszczelnieniami mechanicznymi.

Komora sprzęgła wypełniona jest olejem. W komorze zainstalowany jest czujnik wilgotności, który daje informacje o przecieku pompowanej cieczy do komory sprzęgła. Uszczelnienie mechaniczne zbudowane jest z dwóch pierścieni, z czego jeden wiruje wraz z wałem, natomiast drugi osadzony jest sztywno. Występująca pomiędzy pierścieniami mikroskopijna szczelina uniemożliwia przedostawanie się cieczy.

3. Pompa.

W przypadku konstrukcji samej pompy elementem, który różnicuje poszczególne typy jest wirnik. Od kształtu wirnika zależą również wszystkie parametry pompy. Badania prowadzone były na pompie typu przepływowego z wirnikiem otwartym oraz na pompie wyposażonej w rozdrabniacz.



Rys. 1. Przekrój agregatu pompowego

3. PRZEGLĄD USZKODZEŃ AGREGATÓW POMPOWYCH

W eksploatacji wszystkich urządzeń pompowych można wyróżnić dwa typy uszkodzeń: uszkodzenia typowe, które stanowią 90% ogółu, oraz uszkodzenia szczególne, stanowiące pozostałą część występujących przypadków [1], [4]–[6]. Typowe uszkodzenia zostały zestawione w tabeli 1, natomiast w tabeli 2 przedstawiono objawy uszkodzeń, podzielone na grupy. W kategoriach I i IV przedstawiono „*niesprawności parametryczne*”. Kategoria I dotyczy niesprawności nowych pomp, które występują podczas ich uruchomienia. Natomiast kategoria IV dotyczy niesprawności ujawniających się podczas pracy urządzeń.

Tabela 1. Zestawienie typowych uszkodzeń jednostopniowej pompy wirowej

Przykładowe niesprawności
1. Zatarcia spowodowane odkręceniem nakrętki.
2. Erozja w szczelinie i zatarcia spowodowane np. drganiami.
3. Erozja kanałów przepływowych i łopatek odciążających, kawitacja.
4. Zniszczenie szczeliwa na skutek zbyt dużego docisku dławikiem.
5. Przeciek spowodowany np. biciem wału.
6. Grzanie się łożysk spowodowane np. wadliwym montażem.
7. Wypływ oleju spowodowany utratą szczelności.
8. Niewłaściwe smarowanie – ograniczenie trwałości łożysk.
9. Zniszczenie łożysk spowodowane wadliwym montażem.
10. Grzanie na skutek niewłaściwego uszczelnienia.

Przyczyny występowania niesprawności pomp są złożone: od złego doboru pompy na etapie projektowania instalacji (dotyczy niesprawności nowych urządzeń) do typowych przyczyn, czyli złej obsługi technicznej (niewłaściwy montaż, zbyt duży lub zbyt mały docisk poszczególnych elementów).

Wymienione powyżej niesprawności dotyczą samej pompy. W skład agregatu pompowego wchodzi również silnik napędzający. W znakomitej większości agregatów stosowane są silniki indukcyjne. Typowe uszkodzenia tych maszyn zostały przedstawione w [3] i nie będą tu omawiane.

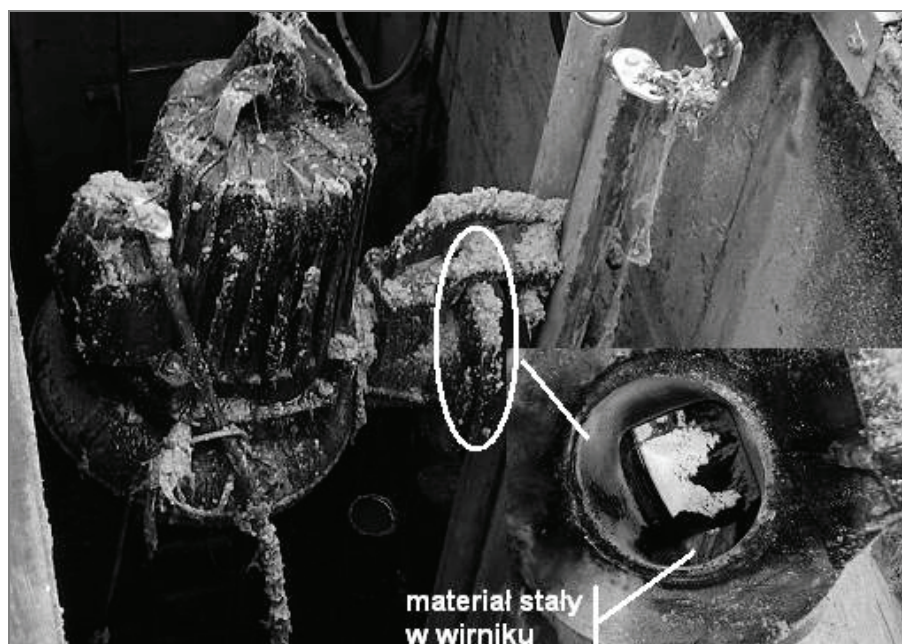
W przypadku agregatów pompowych pracujących w zanurzeniu i tłoczących ścieki największym problemem jest zapychanie się wirników pomp. Jak podają eksploatacy agregatów jest to częsty i poważny problem. W stanie zatkania pompa może zostać wyłączona przez zabezpieczenie nadprądowe, bądź pracować dalej, lecz nie tłocząc cieczy. Na rysunku 2 przedstawiono zdjęcie przytkanego wirnika w pompie zainstalowanej na zlewni ścieków w jednej z oczyszczalni. Kolejnym problemem związanym z obsługą pomp jest szybkie zużywanie się łożysk. Wynika to z faktu pracy pompy w środowisku ciepłym i zanieczyszczonym, co istotnie zwiększa ryzyko szybkiego uszkodzenia łożysk. Nadmierne przecieki wody (cieczy) w pompach po-

wodują przedostawanie się jej do korpusów łożyskowych, korozji elementów konstrukcyjnych pompy. Przepięki przez złącza, poza dławnicami, wymagają odstawienia pompy i zabiegów o charakterze remontowym [4], [6].

Nadzór łożysk w pompach polega na ocenie ich stanu i zapewnieniu obecności odpowiedniego środka smarnego. Wstępna ocena stanu łożysk z reguły jest dokonywana poprzez pomiar temperatury i drgań. Niezależnie od tego w łożyskach smarowanych należy kierować się oceną smaru oraz przeciekami zużytego smaru przez uszczelnienia. Nadzór stanu łożysk jest szczególnie utrudniony w przypadku pomp zanurzonych.

Tabela 2. Typowe objawy uszkodzenia pompy wirowej

I. Parametry inne niż oczekiwane			
1. Pompa nie tłoczy ciecży	2. Wydajność mniejsza od oczekiwanej	3. Ciśnienie mniejsze od oczekiwanego	
II. Drgania i głośność			
III. Grzanie i zatarcia			
IV. Utrata parametrów			
V. Niesprawności podzespołów pompy			
1. Dławnica	2. Łożyska	3. Sprzęgło	4. Złącza ciśnieniowe



Rys. 2. Przykład zatkanego wirnika w pompie zlewni oczyszczalni ścieków

4. SYGNAŁY DIAGNOSTYCZNE ORAZ SYMPTOMY USZKODZEŃ

W badaniach stanu pomp zanurzonych wykorzystano sygnały prądów fazowych silnika oraz drgań mechanicznych, ze względu na stosunkowo łatwy dostęp do ich pomiaru. Symptomami mogącymi świadczyć o wystąpieniu uszkodzenia są harmoniczne związane z częstotliwością obrotową oraz ich zwiększona amplituda [3], [4].

Częstotliwość obrotowa i jej kolejne wielokrotności modulują podstawową harmoniczną sieciową, co w efekcie powoduje pojawienie się w prądzie stojana charakterystycznych częstotliwości uszkodzeniowych:

$$f_u = f_s \pm k \cdot f_r \quad (1)$$

gdzie:

f_u – częstotliwość uszkodzeniowa,

f_s – częstotliwość napięcia zasilającego,

$k = 1, 2, 3 \dots$, kolejne harmoniczne,

f_r – częstotliwość obrotowa wirnika $f_r = n/60$, gdzie n – prędkość obrotowa [obr./min].

W widmie drgań mechanicznych pojawiają się kolejne harmoniczne częstotliwości obrotowej:

$$f_u = k \cdot f_r \quad (2)$$

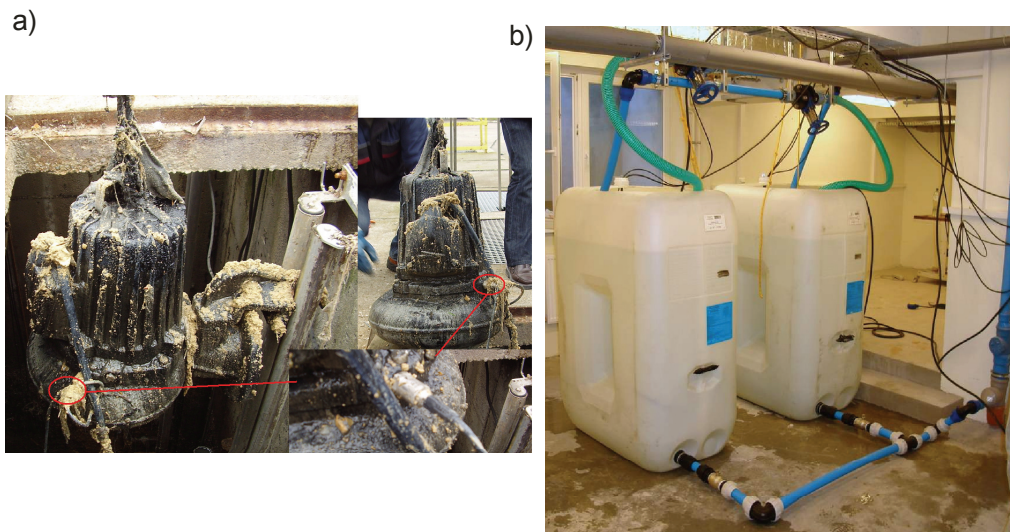
5. WYNIKI BADAŃ NA OBIEKCIE RZECZYWISTYM

Badania zostały wykonane na dwóch obiektach. Pierwszym obiektem był agregat zaptalny produkcji FLYGT o mocy 4,7 kW i prędkości synchronicznej $n_s = 1500$ obr./min. Pompa pracowała na zlewni oczyszczalni ścieków. Na pompie tej zainstalowany był wodoszczelny akcelerometr typu M622B11/M012AC. Na rysunku 3a przedstawiono widok pompy z zaznaczonym miejscem montażu akcelerometru. Drugim obiektem było stanowisko laboratoryjne z zainstalowanymi pompami firmy MEPROZET o mocy 1,1 kW i prędkości synchronicznej $n_s = 3000$ obr./min. Na stanowisku laboratoryjnym możliwe jest fizyczne modelowanie stanów występujących w rurociągu tłocznym poprzez kryzy umieszczone na wylocie pompy. Widok stanowiska przedstawiono na rys. 3b.

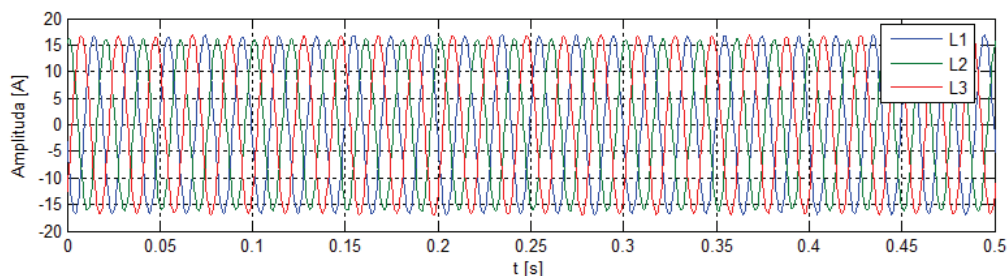
System pomiarowy zbudowany został przy wykorzystaniu komputera przemysłowego serii PXI-1042 firmy National Instrument wraz z kartą pomiarową PXI-4462. Karta ta posiada cztery wejścia analogowe przystosowane do współpracy z piezoelektrycznymi czujnikami drgań. Rozdzielczość przetworników wynosiła 24 bity, zaś częstotliwość próbkowania 204,8 kS/s. Komputer wyposażony został w oprogramowanie LabVIEW. Pomiar prądów fazowych dokonywany był cęgami pomiarowymi typu CA60.

Sygnal mierzony był z częstotliwością próbkowania: $f_{pr} = 2$ kHz. Czas akwizycji próbek wynosił $t_p = 10$ s. Przy takim czasie akwizycji osiągnięto rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości na poziomie 0,1 Hz.

Pomiary prowadzone były kilkakrotnie na pompie znajdującej się w różnym stanie technicznym. Na rysunku 4 przedstawiono czasowe przebiegi prądów zmierzonych w trzech fazach na stanowisku „zlewnia ścieków”. Pomiar ten wykazał pełną symetrię zasilania, co pozwoliło analizować przebiegi wyłącznie w jednej fazie.



Rys. 3. Widok pompy z zainstalowanym akcelerometrem (a). Widok stanowiska laboratoryjnego (b)

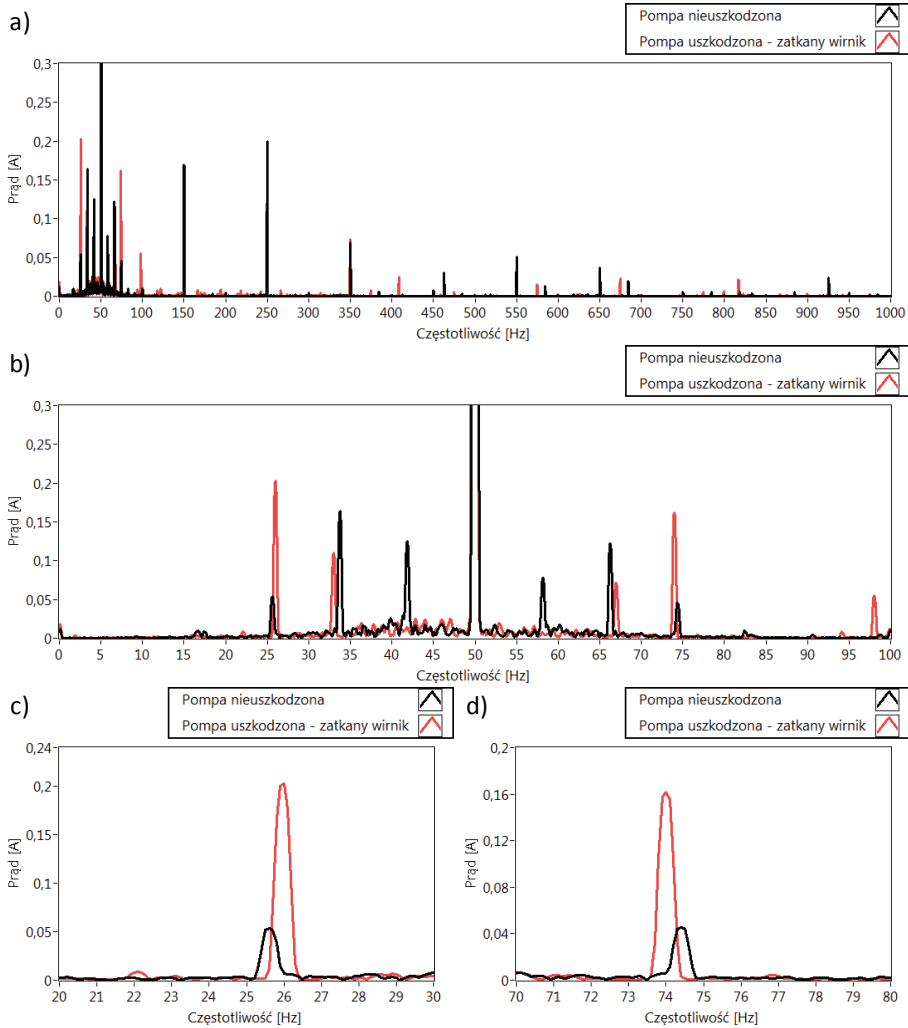


Rys. 4. Przebieg prądów zmierzonych na „Zlewni ścieków”

5.1. ANALIZA FFT

Na rysunku 5 przedstawiono widma prądów stojana zarejestrowanych w różnym czasie i przy różnych stanach technicznych agregatu pompowego.

Analizując widma można zauważyć, że w przypadku wystąpienia problemów z zatkanie się wirnika pompy wzrasta obciążenie silnika (zmniejszenie się wartości częstotliwości rotacyjnej oraz wzrost jej amplitudy). Takie „zachowanie” obiektu jest wynikiem nawinięcia się włóknistej tkaniny na wirnik, co spowodowało wzrost tarcia, a w konsekwencji obniżenie się prędkości i wzrost obciążenia. W wyniku opisywanego zjawiska wzrasta również niewyważenie wirnika, co w konsekwencji prowadzi do wzrostu składowej rotacyjnej.

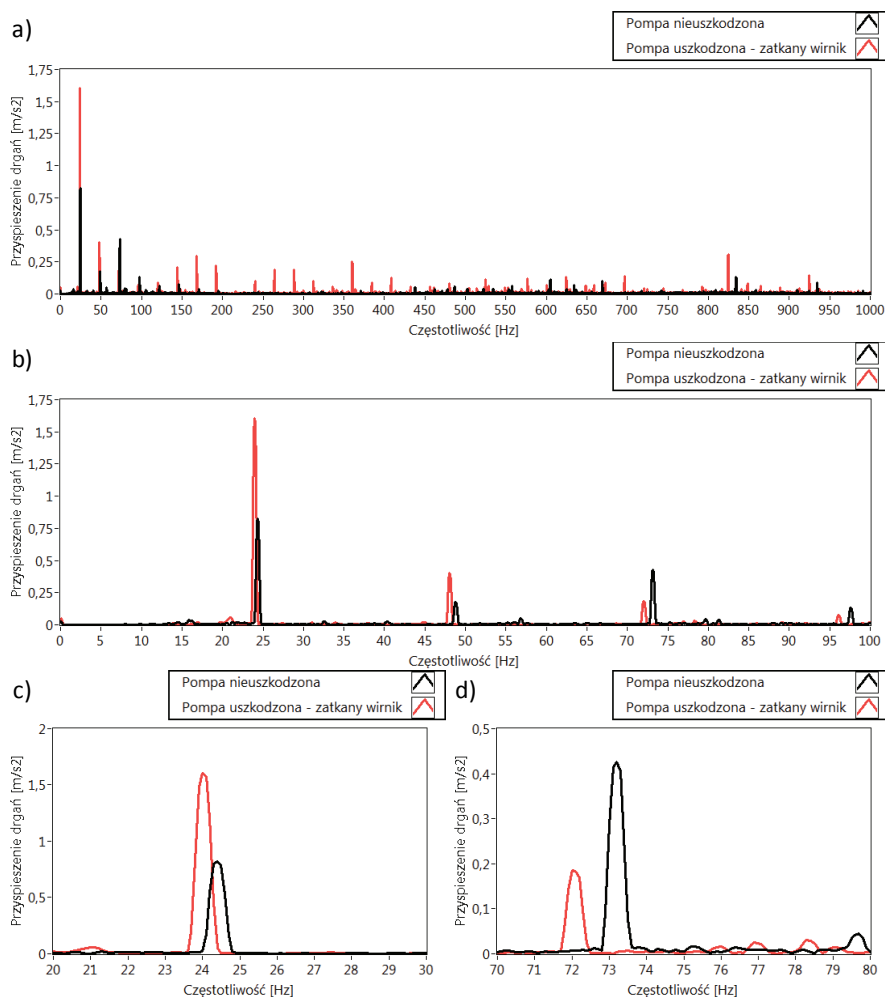


Rys. 5. Zestawienie wybranych pomiarów prądów:

- a) widno w pełnym zakresie mierzonych częstotliwości, b) widno w zakresie 0–100 Hz,
 c) widno wokół częstotliwości $f_s - f_r$, d) widno wokół częstotliwości $f_s + f_r$.

Na rysunku 6 przedstawiono widma drgań mechanicznych zmierzonych w różnym stanie technicznym pompy. Częstotliwość obrotowa oraz jej druga wielokrotność zachowują się analogicznie jak harmoniczne $f_s \pm f_r$ w widmie prądu stojana.

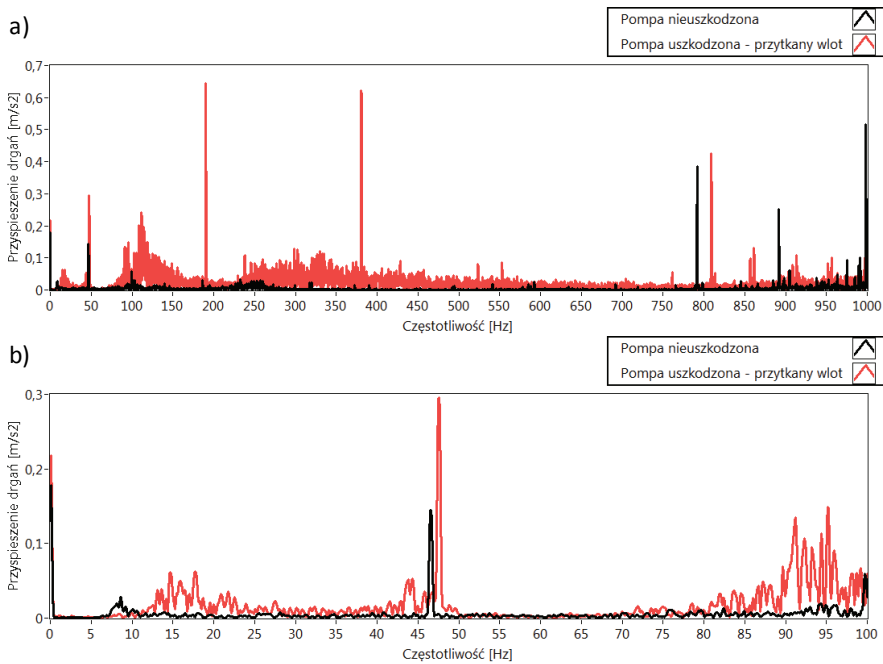
Inny charakter uszkodzenia zamodelowany został na stanowisku laboratoryjnym. Zamodelowane zostało uszkodzenie w postaci przytkania wlotu pompy. Taka sytuacja może wystąpić w wyniku dostania się większego ciała stałego w obszar wlotu pompy. Ze względu na jego duży rozmiar, nie zostaje ono wciągnięte do wnętrza pompy, lecz powoduje przytkanie wlotu.



Rys. 6. Zestawienie wybranych pomiarów przyspieszenia drgań:

- a) widmo w pełnym zakresie mierzonych częstotliwości, b) widmo w zakresie 0–100 Hz,
c) widmo wokół częstotliwości f_r , d) widmo wokół częstotliwości $2f_r$

Na rysunku 7 przedstawiono zestawienie widm drgań mechanicznych dla pompy sprawnej oraz dla pompy o częściowo zatkany wlocie do wirnika. Zestawienie zawiera widma dla pełnego zbiornika oraz dla zbiornika, w którym poziom cieczy jest minimalny (tuż przed wyłączeniem pompy przez pływak suchobiegu). Jak widać na rys. 7a w paśmie od 80 Hz do 180 Hz dla uszkodzonej pompy zwiększa się poziom drgań.



Rys. 7. Zestawienie widm drgań zmierzonych w laboratorium dla pompy sprawnej oraz przy częściowym zatkaniu wlotu do pompy:

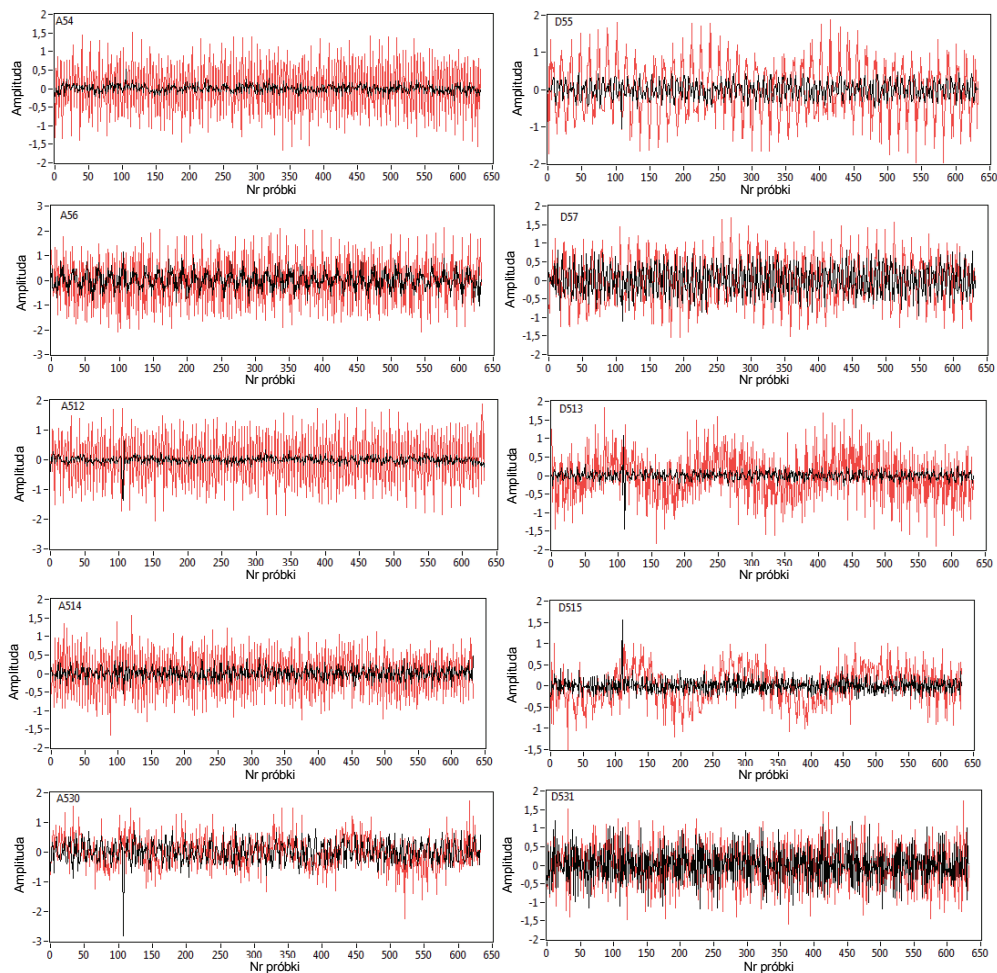
a) widmo w pełnym zakresie mierzonych częstotliwości, b) pasmo niskich częstotliwości

Podobny efekt widoczny jest w okolicy 300 Hz. Można zauważyć, że dominujący charakter mają harmoniczne z obszaru wysokich częstotliwości. W przypadku przytkanego wlotu do pompy znaczący udział zaczynają mieć składowe czwarta (ok. 190 Hz) i ósma (ok. 380 Hz) (ósma harmoniczna rotacyjna pojawia się dopiero dla pompy uszkodzonej).

Z przeprowadzonej analizy wynika, że w przypadku przytkania samego wlotu następuje zmniejszenie się obciążenia, co odpowiada zasadzie działania maszyn przepływowych (mniej tłoczonej cieczy to mniejsze obciążenie i większa prędkość). W analizowanym przypadku, po wystąpieniu uszkodzenia pojawiają się dodatkowe składowe, które w pompie nieuszkodzonej nie występują. W celu lepszej weryfikacji symptomów niezbędne są dalsze badania eksperymentalne.

5.2. ANALIZA Z WYKORZYSTANIEM PRZEKSZTAŁCENÍ FALKOWYCH

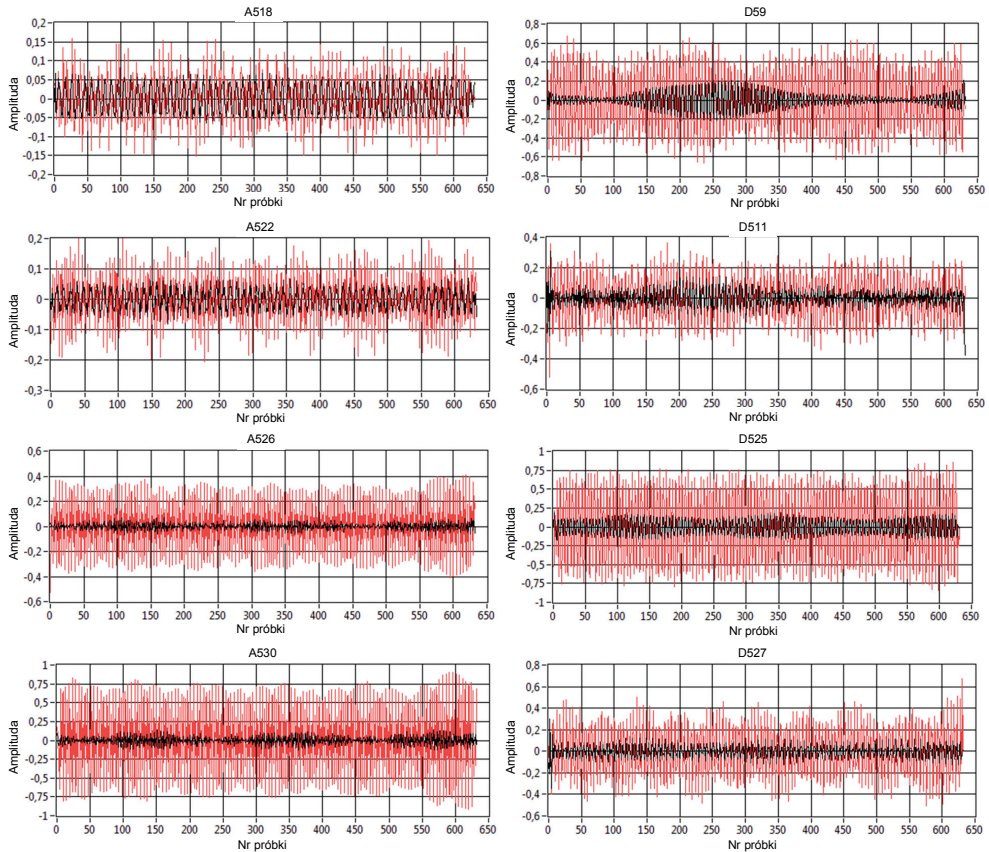
Trudności w wykrywaniu uszkodzeń za pomocą klasycznej analizy FFT coraz częściej skłaniają do wykorzystywania bardziej złożonych metod przetwarzania sygnałów, a w szczególności analizy falkowej [2], [3]. Poniżej przedstawiono wyniki zastosowania pakietowej analizy falkowej dla sygnału drganiowego i prądu stojana.



Rys. 8. Porównanie przebiegów czasowych aproksymat i detali przyspieszenia drgań agregatu pompowego sprawnego (kolor czarny) i zatkanego (kolor czerwony) w wybranych węzłach z 5 poziomu dekompozycji

Na rysunku 8 zestawiono przebiegi sygnałów aproksymat i detali w wybranych węzłach piątego poziomu dekompozycji sygnałów drganiowych, zmierzonych na

pompie w zlewni oczyszczalni ścieków. Przy częstotliwości próbkowania 2 kHz szerokość pasma w węźle wynosi 31,25 Hz. Z porównania przebiegów aproksymat i detali dla pompy sprawnej i uszkodzonej można zauważyć istotne zmiany wielkości amplitud oraz zmianę charakteru przebiegów (modulacja sygnałów spowodowana uszkodzeniem).



Rys. 9. Porównanie przebiegów czasowych aproksymat i detali prądu stojana pompy zatkanej (kolor czerwony) i pompy sprawnej (kolor czarny) w wybranych węzłach z 5 poziomu dekompozycji.

Na rysunku 9 przedstawiono porównanie wyników z piątego poziomu dekompozycji analizy falkowej prądów stojana dla pompy sprawnej i zatkanej wlotem, zmierzonych na „Zlewni ścieków”. W wybranych węzłach również widoczne są różnice w przebiegach czasowych sygnałów aproksymat i detali prądów fazowych silnika pompy sprawnej i uszkodzonej. W obu przedstawionych przypadkach podstawowym problemem jest wybór węzłów do oceny stanu technicznego agregatów pompowych

oraz sposób oceny zmian powodowanych uszkodzeniami. Będzie to przedmiotem dalszych badań.

6. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że do określenia stanu technicznego zanurzonego agregatu pompowego można z powodzeniem wykorzystać informacje diagnostyczne zawarte w sygnałach prądu stojana silnika indukcyjnego oraz drgań mechanicznych. Zastosowanie analizy FFT umożliwi wykrycie charakterystycznych częstotliwości, których pojawienie się lub zwiększona amplituda stanowią symptomy niesprawności agregatu. Analiza falkowa dostarcza nowych możliwości w wyodrębnianiu symptomów uszkodzeń, szczególnie w warunkach niestacjonarności sygnałów pomiarowych. Jednakże niezbędne jest opracowanie zasad wyboru węzłów i kryteriów oceny przebiegów detali i aproksymat pod kątem aktualnego stanu technicznego agregatu pompowego.

W celu weryfikacji opisywanych symptomów potrzebne są dalsze badania w warunkach zarówno przemysłowych jak i laboratoryjnych, a w szczególności w obszarze wykorzystania transformaty falkowej.

LITERATURA

- [1] CEMPEL C., *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*, PWN, Warszawa 1989.
- [2] EWERT P., KOWALSKI C.T., WOLKIEWICZ M., *The application of wavelet analysis and neural networks in the diagnosis of rolling bearing faults in induction motors*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, Vol. 89, nr 2b, 124–127.
- [3] KOWALSKI C.T., *Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- [4] PAKUŁA G., *Drgania pomp*, Forum eksploatorów, 4/2007.
- [5] SEDLER M., ZIMA P., POZDISEK T., *Analiza przepływu kawitacyjnego w pompach*, Pompy Pompownie, 2/2009.
- [6] ŚWITALSKI P., *ABC Techniki pompowej*, ZPBiP CEDOS Sp. z o.o., Wrocław 2008.

DETECTION OF THE DAMAGE OF THE SUBMERGED PUMP AGGREGATES WITH INDUCTION MOTORS

In this paper the ability to detect the rotor damage of the pumping units operating submerged in sewage treatment plants and sewage pumping stations is presented. The review of the pumps defects and symptoms of the damage is shown. The Fast Fourier Transform (FFT) and the Wavelet Transform (WT) are applied to analyse the diagnostic signals. Results obtained from a real object and a laboratory set-up are presented.