

Jacek GROSEL
Wojciech SAWICKI
Zbigniew WÓJCICKI
Politechnika Wrocławska

ZASTOSOWANIE OPERACYJNEJ ANALIZY MODALNEJ DO BADANIA DYNAMICZNEJ PRACY RYS W RURACH SSĄCYCH ELEKTROWNI WODNYCH

Tematem pracy jest prezentacja możliwości zastosowania operacyjnej analizy modalnej (OMA) do eksperymentalnego badania „dynamicznej pracy” rys w rurach ssących elektrowni wodnych. Przez „dynamiczną pracę” rozumie się możliwość wykonywania względnych ruchów fragmentów konstrukcji podzielonej rysami wzdłuż oraz w poprzek tych rys, a także obracania się tych fragmentów względem siebie.

Słowa kluczowe: badania eksperymentalne, OMA, rura ssąca, rysy, elektrownia wodna

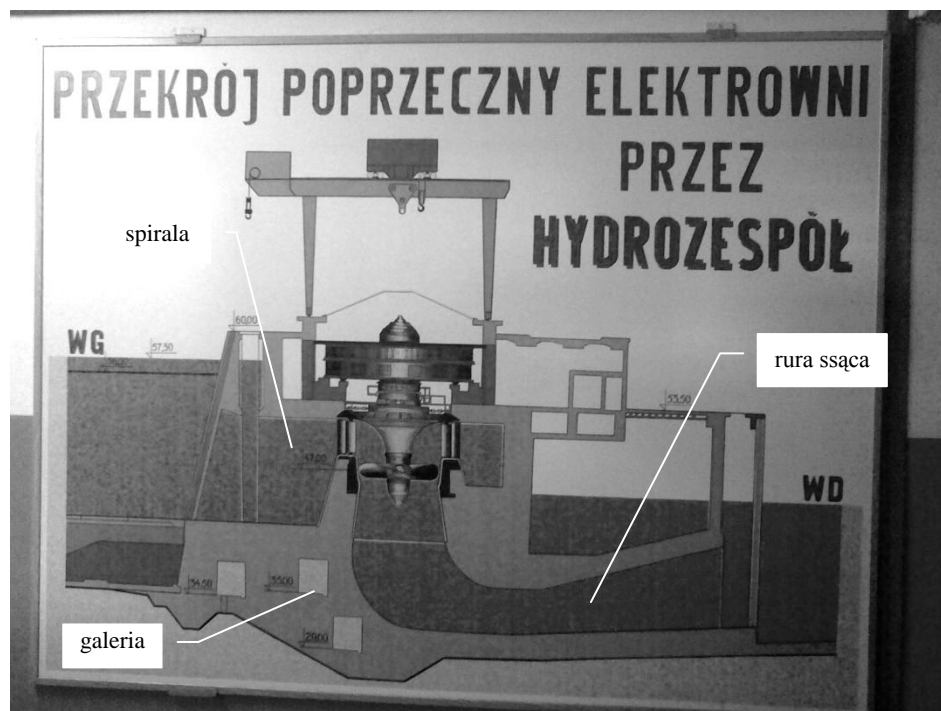
1. Wprowadzenie

Tematem pracy jest prezentacja możliwości zastosowania operacyjnej analizy modalnej (OMA) do eksperymentalnego badania „dynamicznej pracy rys” w rurach ssących elektrowni wodnych. Przez „dynamiczną pracę rys” rozumie się możliwy względny ruch fragmentów konstrukcji wzdłuż lub w poprzek rys, a także możliwy obrót względem siebie fragmentów konstrukcji oddzielonych rysami. Tematyka pracy jest nowatorska ze względu na rodzaj i specyfikę obiektu badań oraz sposób wykorzystania OMA do diagnostyki rys.

Prezentowana praca jest fragmentem pierwszego etapu znacznie bardziej różnorodnych badań realizowanych w latach 2010 i 2011 przez pracowników Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. Badania te dotyczyły kompleksowej analizy przyczyn powstawania pęknięć w elementach konstrukcji betonowej największej w Polsce elektrowni wodnej oraz określenia wytycznych dla poprawy kondycji tych betonów. Identyfikowano stan zarysowania ścian konstrukcji bloków elektrowni wraz z pomiarem szerokości rozwarcia rys. Wykonano cały szereg nieniszczących badań konstrukcji w celu sprawdzenia występowania w betonach: pustek powietrznych, raków,

delaminacji oraz głębokich pęknięć i rys. Zrealizowano także badania niszczące (z wykorzystaniem odwiertów) w celu określenia bieżących parametrów wytrzymałościowych, fizykomechanicznych i chemicznych betonów. W szczególności wykonano wiele pomiarów i analiz dynamicznych bloków elektrowni.

Przedmiotowy obiekt jest jednym z elementów piętrzących stopnia wodnego na rzece Wiśle. Tworzą go trzy bloki, zdylatowane między sobą. W każdym z bloków są zainstalowane dwa turbozespoły, tworząc dwie sekcje – hydrozespoły (rys. 1.).



Rys. 1. Przekrój poprzeczny elektrowni przez hydrozespół

W części podziemnej hydrozespołu można wyróżnić następujące charakterystyczne elementy podstawowe: spiralę wlotową, rurę ssącą oraz galerie łączące wszystkie hydrozespoły. Elementy te, jako znajdujące się poniżej poziomu wody, powinny charakteryzować się szczelnością. Niestety obecny stan konstrukcji charakteryzuje się występowaniem w każdym z hydrozespołów szeregu rys i spękań. Występujące w konstrukcji każdej sekcji rysy oraz spękania różni-cuje (w ogólności) ich lokalizacja, stan rozwarcia, układ przestrzenny i przebieg.

Z przeprowadzonych różnymi metodami badań jednoznacznie wynika, że w istniejącej sieci spękań można wyróżnić, ze względu na lokalizację oraz prze-

bieg, dwie jakościowo różne ich rodziny. Takie wyróżnienie topologii spękań umożliwia geometryczna powtarzalność struktury analizowanego obiektu, tj. sześciu geometrycznie podobnych hydrozespołów. Wraz z powtarzalnością geometrii konstrukcji hydrozespołu występuje rodzina spękań (spękania systemowe), w których można było zauważyć wyraźną powtarzalność geometrii sieci zarysowań, oraz rodzina spękań (spękania losowe), w których takiej korelacji (powtarzalności) nie zaobserwowano.

Spękania systemowe wykazują periodyczność, podobnie jak geometria hydrozespołów, przy czym powtarzalność ta dotyczy zarówno geometrii sieci zarysowań, w zakresie ich lokalizacji i przebiegu, jak i stanu rozwarcia rys. Taki systemowy układ spękań występuje w rurach ssących, przy czym ich przebieg ma charakter obwodowy.

Największe problemy podczas badania rys pojawiły się w rurach ssących. Zarówno badania nieniszczące wykonywane z wykorzystaniem tomografu ultradźwiękowego, jak i metodą odpowiedzi na impuls (*impulseresponse*) wymagają, aby beton był suchy. Obecność wody zniekształca odczyty, a ścian w rurze ssącej praktycznie nie da się wysuszyć, nie mówiąc już o dnie rury ssącej, gdzie woda częściowo zalega, przedostając się przez nieszczelności w zasuwie odcinającej od strony dolnej wody. Odwierty kontrolne także nie dawały precyzyjnej odpowiedzi na pytania dotyczące charakteru rys, tzn. czy są one wskrośne, czy nie, ponieważ odwierty w dnie rury ssącej mogły być wykonywane maksymalnie do głębokości nie większej niż 0,5 m a najmniejsza grubość płyty dennej wynosiła 2,5 m. Głębsze odwierty mogłyby być niebezpieczne dla konstrukcji, gdyż przebicie dna rury ssącej, przy słupie wody ok. 20 m, stanowiłoby ogromne zagrożenie zarówno dla ludzi przebywających w rurze ssącej, jak i konstrukcji samej elektrowni. Rdzenie o długości 0,5 m pobrane z odwiertów w ścianach i na dnie rury ssącej wykazały istnienie rysy na całej długości rdzenia.

Aby uzyskać odpowiedź na zasadnicze pytanie, czy wykryte rysy obwodowe w rurach ssących są wskrośne, czy też nie, postanowiono zastosować metodę dynamiczną. Zespół badawczy złożony z autorów niniejszej pracy, będących pracownikami Zakładu Dynamiki Budowli Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, pod kierownictwem Kierownika Zakładu dr. hab. inż. Zbigniewa Wójcickiego, prof. PWr, zaproponował nowatorskie rozwiązanie polegające na wykorzystaniu technik OMA do zbadania dynamicznej pracy rys.

Do badań eksperymentalnych wykorzystano 34-kanalowy system PULSE firmy Brüel & Kjær, przeznaczony do wszechstronnych pomiarów i analiz dynamicznych wielkich konstrukcji inżynierskich. System ten jest własnością Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej. Możliwości systemu istotne dla treści pracy zostały omówione w następnym punkcie.

Idea nieniszczącej metody, która umożliwia jednoznaczne określenie, czy rysy obwodowe w ścianach i dnie rury ssącej są, czy nie są wskrośne, sprowadza się do oceny kształtu form własnych elementów zdylatowanych rysami i na tej

podstawie określenia charakteru dynamicznej pracy rys. Zaproponowano zainstalowanie czujników drgań po obu stronach każdej rysy wzdłuż jednej linii (poprzecznej do rys) i na podstawie pomiarów drgań sporządzenie form własnych. Przyjęto założenie, że na podstawie kształtu form własnych będzie można ocenić, czy na rysach występują względne ruchy translacyjne i/lub rotacyjne.

Badania cech modalnych konstrukcji mogą być realizowane na dwa sposoby. Pierwszy sposób – to klasyczna analiza modalna. W metodzie tej, w największym uproszczeniu, mierzy się siły wymuszające drgania w punktach pomiarowych i odpowiedź układu na działanie tej siły w tych punktach pomiarowych. Stosując metodę tę do dużych, masywnych konstrukcji, trzeba się liczyć z trudnościami pomiarowymi. Po pierwsze, aby wzbudzić drgania dużej konstrukcji, konieczne są wzbudniki drgań wymuszające bardzo duże siły, co samo w sobie nie jest łatwe w technicznej realizacji, tym bardziej, że wzbudzanie musi być realizowane w różnych miejscach konstrukcji, a dostęp do tych punktów jest często utrudniony. Po drugie, należy z jednej strony posiadać bardzo czułe czujniki drgań, ponieważ w masywnych konstrukcjach trudno jest bezpiecznie wzbudzić drgania o dużych amplitudach. Z drugiej jednak strony drgania w pobliżu wzbudnika są relatywnie duże i na czujnikach zlokalizowanych w pobliżu wzbudnika pojawiają się wtedy przesterowania.

Drugi sposób – to operacyjna analiza modalna (OMA) zwana także eksploatacyjną analizą modalną. W metodzie tej mierzy się tylko odpowiedź układu wywołaną jedynie działaniem czynników środowiskowych lub/i eksploatacyjnych. Nie mierzy się wartości sił wymuszających, a jedynie odpowiedź dynamiczną układu. Metoda ta jest wolna od wad klasycznej analizy modalnej, ale wymagana jest bardzo duża czułość pomiarów i rejestracja znacznie dłuższych przebiegów czasowych drgań.

W przypadku rury ssącej tak dużej konstrukcji, jaką jest blok elektrowni, praktycznie możliwe było zastosowanie tylko tej drugiej metody.

2. System PULSE do pomiarów dynamicznych wielkich konstrukcji inżynierskich

System PULSE 3560 firmy Brüel & Kjær (rys. 2.) charakteryzuje się ważnymi cechami pomiarowymi, takimi jak:

- kanały wejściowe o częstotliwości 0-25,6 kHz,
- system i jego moduły akwizycji wykonane w technice Dyn-X, tzn. zawierające dwie 24-bitowe karty pomiarowe; dzięki temu wejścia osiągają:
 - dynamikę 160 dB (po 80 dB na każdą kartę),
 - idealną liniowość oraz zgodność fazową między kanałami pomiarowymi.

Tak rozbudowana diagnostyka stanu kanałów wejściowych systemu umożliwia bezobsługową akwizycję sygnałów, co w szczególności nie wymaga zwracania uwagi na regulację zakresów pomiarowych.



Rys. 2. System PULSE 3560 firmy Brüel & Kjær do pomiaru i analizy drgań

Do badań wykorzystano akcelerometry sejsmiczne DeltaTron 8340 (tab. 1.). W badanym przypadku szczególnie istotna była możliwość pomiarów niskich częstotliwości (zgodnie z danymi producenta od poziomu 0,1 Hz) i to z wystarczającą precyzją gwarantowaną przez bardzo dużą czułość tych akcelerometrów. Niskie częstotliwości własne są bowiem cechą charakterystyczną wielkich konstrukcji inżynierskich.

Tabela 1. Charakterystyki przetwornika

Typ przetwornika	Akcelerometr sejsmiczny DeltaTron 8340
Masa	775 g
Zakres częstotliwości	0,1-1500 Hz
Zakres pomiarowy	do 4,9 m/s ²
Czułość	1000 mV/ms ⁻²
Poziom szumów	0,24 mm/s ²

Omówione cechy systemu pomiarowego umożliwiają wykonywanie zaawansowanych analiz dynamicznych. Niezbędnym warunkiem jest posiadanie

stosownego oprogramowania. Na wyposażeniu systemu jest m.in. pakiet analizy modalnej, obejmujący wszystkie metody analizy operacyjnej, operacyjna analiza modalna (OMA), animacji drgań strukturalnych (ODS) oraz klasyczna analiza modalna (wzбудnik, młotek) z modyfikacją obiektu i pracami symulacyjnymi. Pakiet OMA wyposażono w najnowsze osiągnięcia w tej dziedzinie, w tym automatyczne wyszukiwanie i wskazywanie postaci drgań własnych oraz samoczynną eliminację zakłóceń od sygnałów harmoniczných [1].

Pakiet OMA zawiera sześć algorytmów uzyskiwania częstotliwości własnych i form własnych. Ponadto niektóre z tych algorytmów umożliwiają określenie tłumienia modalnego dla poszczególnych form własnych.

W badaniach wykorzystano wszystkie 6 algorytmów, tj.:

- 1) FDD (*Frequency Domain Decomposition*),
- 2) EFDD (*Enhanced Frequency Domain Decomposition*),
- 3) CFDD (*Curve-Fit Frequency Domain Decomposition*),
- 4) SSI-UPC (*Stochastic Subspace Identification-Unweighted Principle Components*),
- 5) SSI-PC (*Stochastic Subspace Identification-Principle Components*),
- 6) SSI-CVA (*Stochastic Subspace Identification-Canonical Variate Analysis*).

Pierwsze trzy algorytmy należą do grupy analiz w dziedzinie częstotliwości [2, 3]. Ich idea opiera się na rozkładzie odpowiedzi układu dyskretnego (w dziedzinie częstotliwości) na sumę odpowiedzi wielu układów o jednym stopniu swobody. W algorytmach 4-6. zastosowano stochastyczną metodę identyfikacji podprzestrzeni. Metoda ta jest oparta na równaniu stanu układu dynamicznego i jego dekompozycji z użyciem filtracji Kalmana [3, 4].

3. Rozmieszczenie akcelerometrów w rurze ssącej

Pomiary dynamiczne wykonano za pomocą bardzo czułych akcelerometrów sejsmicznych DeltaTron 8340 (tab. 1.). Przetworniki mocowano z wykorzystaniem specjalnego systemu mocowania (rys. 3.). System ten zapewniał możliwość łatwego zainstalowania czujników w każdym z trzech wzajemnie prostopadłych kierunków. Można je montować zarówno osobno, jak i równocześnie dwa lub trzy do jednej kostki, co umożliwia wykonywanie precyzyjnych pomiarów jedno-, dwu- lub trójosiowych w jednym punkcie pomiarowym.

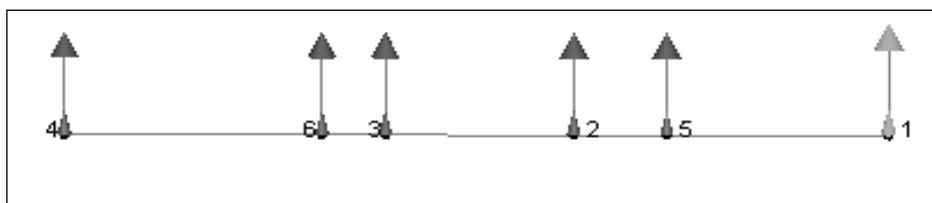
W przykładowej rurze ssącej Hz6, gdzie wykryto dwie rysy obwodowe, akcelerometry sejsmiczne DeltaTron 8340 instalowano poprzecznie do rys na dnie lewej rury ssącej oraz na lewej ścianie tej rury, patrząc w kierunku płynięcia wody. Na dnie zamontowano sześć czujników mierzących drgania pionowe, a na ścianie – siedem czujników mierzących drgania poziome prostopadłe do powierzchni ściany. Rozmieszczenie punktów pomiarowych pokazano na rys. 4. Pomiary powiązano fazowo przez czujnik referencyjny nr 13 z pomiarami wykonywanymi w galeriach.

Pomiarów dokonano przy wyłączonej turbinie, przy czym pozostałe turbiny pracowały, wzbudzając drgania eksploatacyjne obiektu. Jednocześnie rejestrowano przebiegi czasowe przyspieszeń wszystkich punktów pomiarowych w formie nagrania do dalszej obróbki. Wykorzystywano moduł akwizycji danych systemu pomiarowego PULSE. Dwukrotnie wykonano zarówno pomiary jednogodzinne, jak i analizy OMA. Jeżeli dwukrotna analiza modalna z wykorzystaniem wszystkich sześciu algorytmów analizy modalnej dawała te same wyniki, uznawano, że są one wiarygodne. Oprócz częstotliwości własnych zidentyfikowano formy własne odpowiadające tym częstotliwościom własnym.

4. Analiza modalna (OMA)

4.1. Dno rury ssącej

Na rysunku 5. zaprezentowano model OMA przyjęty do identyfikacji częstotliwości i form własnych dna rury ssącej. Punkt 1. znajduje się najbliżej zasuw, a punkt 4. najdalej od niej (patrz też rys. 4.). Rysy przebiegają między punktami 3. i 6. oraz 2. i 5.

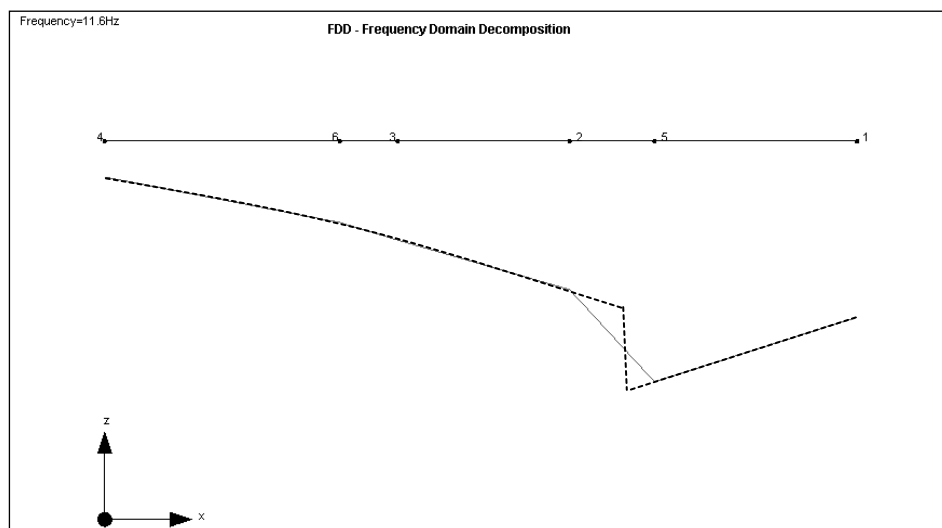
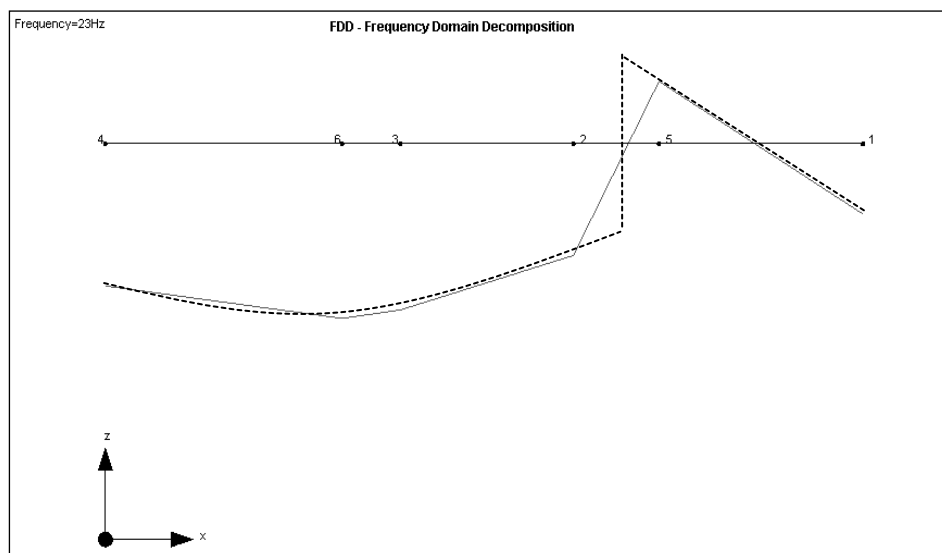


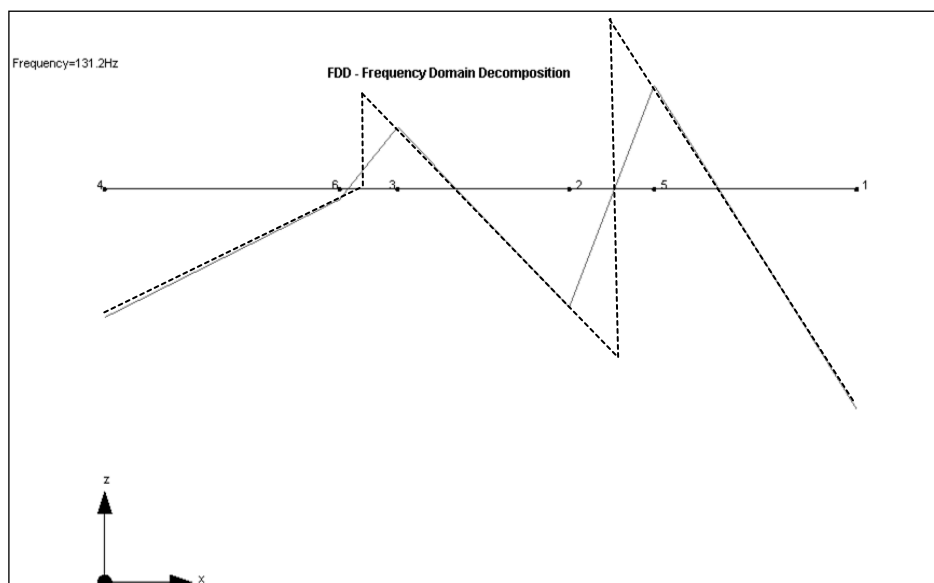
Rys. 5. Model OMA w rurze ssącej hydrozespołu Hz6 – dno rury

Zidentyfikowano trzy częstotliwości własne:

$$f_1 = 11,6 \text{ Hz}, \quad f_2 = 23 \text{ Hz}, \quad f_3 = 131,2 \text{ Hz}.$$

Odpowiadające tym częstotliwościom trzy formy własne przedstawiono na rys. 6-8. Uzyskane formy przedstawiono linią ciągłą. Linią przerywaną zaznaczono przewidywany kształt formy w przypadku zbliżania do siebie czujników rejestrujących drgania po obu stronach rys. Dzięki temu zabiegowi wyraźnie widać dynamiczny charakter pracy rys.

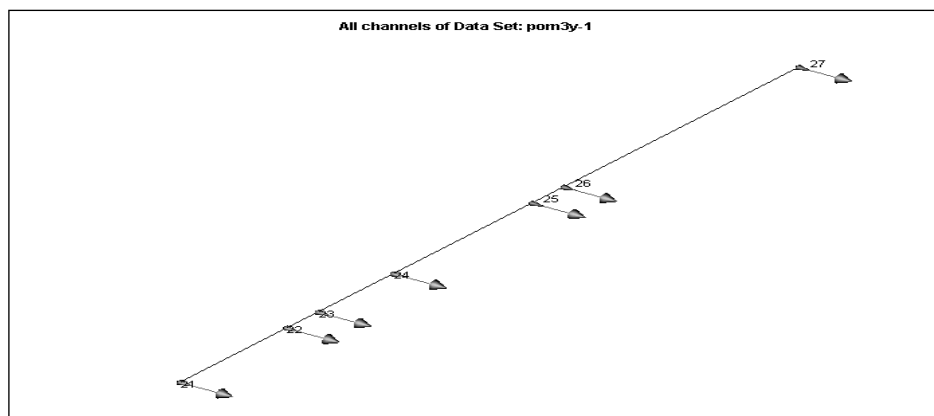
Rys. 6. Pierwsza forma własna dna rury ssącej $f_1 = 11,6$ HzRys. 7. Druga forma własna dna rury ssącej $f_2 = 23$ Hz



Rys. 8. Trzecia forma własna dna rury ssącej $f_3 = 131,2$ Hz

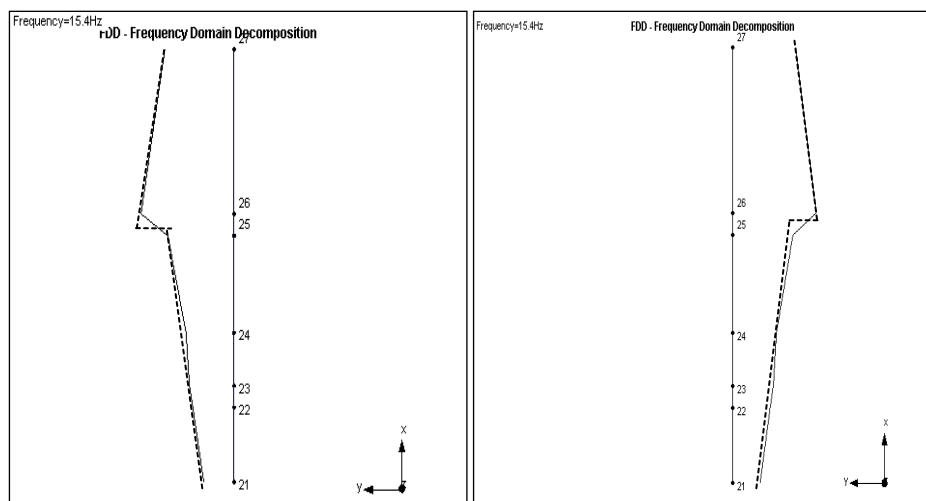
4.2. Ściana rury ssącej

Na rysunku 9. zaprezentowano model OMA przyjęty do identyfikacji częstotliwości i form własnych ściany rury ssącej. Punkt 27. znajduje się najbliżej zasuwu, a punkt 21. najdalej od niej (patrz też rys. 4.). Rysy przebiegają między punktami 22. i 23. oraz punktami 25. i 26.

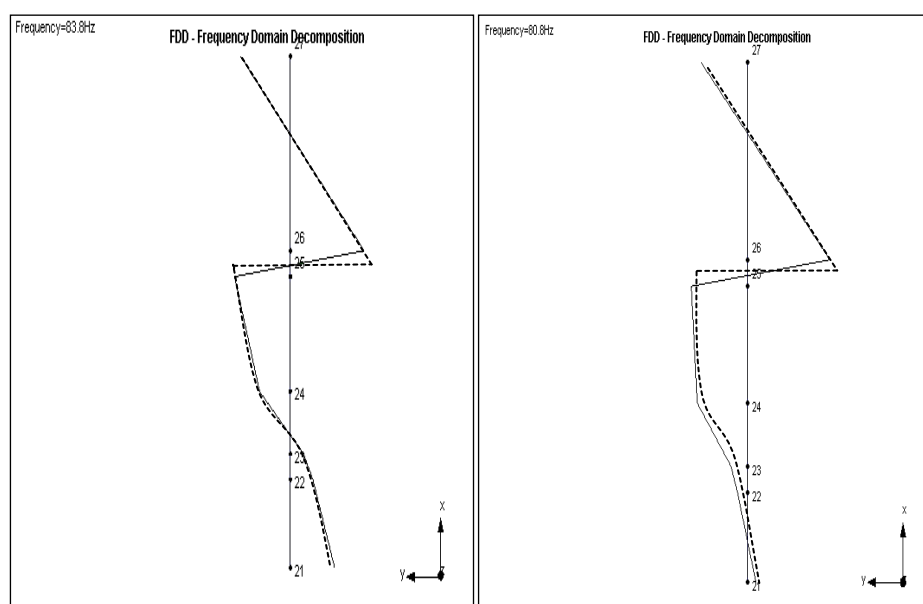


Rys. 9. Model OMA w rurze ssącej hydrozespołu Hz6 – ściana rury

Dwukrotnie wykonano zarówno pomiary, jak i analizy OMA. Zidentyfikowano dwukrotnie te same dwie częstotliwości własne $f_1 = 15,4$ Hz i $f_2 = 80,8$ Hz (83,8 Hz) oraz odpowiadające im formy drgań. Formy przedstawiono na rys. 10. i 11.



Rys. 10. Pierwsza forma własna ściany rury ssącej $f_1 = 15,4$ Hz



Rys. 11. Druga forma własna ściany rury ssącej $f_2 = 80,8$ Hz (83,8 Hz po lewej)

Podobnie jak poprzednio, uzyskane formy przedstawiono linią ciągłą. Linią przerywaną zaznaczono przewidywany kształt formy w przypadku zbliżania do siebie czujników rejestrujących drgania po obu stronach rys.

Na rysunkach 10. i 11. przedstawiono pozornie dwukrotnie te same wykresy. Są to jednak wykresy uzyskane z analiz dwóch różnych jednogodzinnych danych pomiarowych. Na wykresach po lewej stronie przedstawiono wyniki analizy uzyskane z przebiegów czasowych odpowiadających pierwszemu godzinemu pomiarowi, po prawej stronie – z przebiegów czasowych odpowiadających drugiemu pomiarowi.

W przypadku analizy modalnej w zakresie pierwszej częstotliwości i pierwszej formy własnej wyniki analiz dwóch serii pomiarowych są w zasadzie takie same. W zakresie drugiej częstotliwości własnej wyniki analiz dwóch serii pomiarowych są nieco inne – częstotliwości te różnią się o niecałe 4%. Natomiast formy własne odpowiadające tym częstotliwościom są praktycznie identyczne.

Mimo pewnych nieznacznych różnic wyników analiz modalnych, należy stwierdzić, że podobieństwo wyników obu analiz jest bardzo duże, co pośrednio świadczy o poprawności i powtarzalności realizacji pomiarów i algorytmów OMA. Ponadto warto podkreślić, że każda turbina obraca się z częstotliwością nieco niższą od 1 Hz, co generuje niekorzystne w analizie modalnej wymuszenia harmoniczne. Każda turbina ma 4 łopatki, a więc jest generowane wzbudzenie o częstotliwości ok. 4 Hz oraz o częstotliwościach będących kolejnymi wielokrotnościami tej częstotliwości. Wszystkich turbin jest sześć, przy wyłączeniu badanej turbiny pracowało pięć pozostałych. Metoda analizy modalnej automatycznie eliminuje zakłócenia od tych sygnałów harmonicznych generowanych przez pracujące turbiny, dlatego OMA mogła być zrealizowana bez wstrzymywania pracy elektrowni. Jest to ogromna zaleta tej metody analizy modalnej.

5. Wnioski

Na podstawie badań dynamicznych przeprowadzonych przez zespół badawczy złożony z pracowników Zakładu Dynamiki Budowli, z wykorzystaniem systemu PULSE 3560 firmy Brüel & Kjær do pomiarów i analiz dynamicznych wielkich konstrukcji inżynierskich, oraz po analizie uzyskanych danych pomiarowych sformułowano następujące wnioski:

1. Badania dynamiczne spękań obwodowych rur ssących wskazały, że główne spękania mają charakter wskrośny. Potwierdziły to również obserwacje rdzeni betonów pobranych z elektrowni w miejscach występowania tych spękań. Z badania rdzeni o długości 0,5 m wynikało, że rysy występują na całej długości rdzeni, a więc rysy w tych miejscach muszą mieć co najmniej 0,5 m głębokości.
2. Możliwość ruchu na poszczególnych rysach ujawnia się dla jednej lub kilku częstotliwości (form) własnych.

3. Rysa obwodowa bliższa zasuwy (pomiędzy punktami 25. i 26. na ścianie oraz punktami 2. i 5. na dnie) jest rysą wskrośną, która pracuje dynamicznie i na której występują niezależne ruchy poprzeczne (translacyjne) i obrotowe (rotacyjne). Wynika to z nieciągłości i wyraźnego załamania form w miejscach występowania rys. Jest to szczególnie dobrze widoczne na rys. 11., przy częstotliwości własnej wynoszącej 80,8 Hz (83,8 Hz):
 - efekty załamania wykresów form są wyraźniejsze na ścianie niż na dnie rury ssącej,
 - uznano, że oddylatowanie się elementów betonowych rury ssącej Hz6 występuje głównie na rysie, która znajduje się bliżej zasuwy (ok. 10 m od niej) (rys. 6., 7., 10. i 11.),
 - na drugiej rysie w rurze ssącej (dalszej od zasuwy) oddylatowanie pojawia się jedynie na jej dnie między punktami 6. i 3. na rys. 8., przy częstotliwości własnej 131,2 Hz (relatywnie dość wysokiej), ale względny ruch translacyjny na tej rysie jest wyraźnie mniejszy niż na rysie bliższej zasuwy.
4. Podobne rysy zaobserwowano w innych rurach ssących, co świadczy o ich systemowym charakterze.

Literatura

- [1] Andersen P., Brincker R., Ventura C., Cantieni R.: Modal estimation of civil structures subject to ambient and harmonic excitation, Proc. of the 26th International Modal Analysis Conference (IMAC), Orlando, Florida, USA, 4-7 February 2008.
- [2] Brincker R., Zhang L., Andersen P.: Modal identification from ambient responses using Frequency Domain Decomposition, Proc. of the 18th International Modal Analysis Conference (IMAC), San Antonio, Texas 2000.
- [3] Batel M.: Operational Modal Analysis – Another way of doing modal testing, Sound and Vibration, August 2002.
- [4] Van Overschee P., DeMoor B.: Subspace identification for linear systems, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1996.

APPLICATION OF OPERATIONAL MODAL ANALYSIS TO THE STUDY OF DYNAMIC WORK OF CRACKS IN SUCTION PIPES OF HYDROPOWER PLANTS

S u m m a r y

The topic of the work is the presentation of the possible application of Operational Modal Analysis (OMA) to the experimental study of „dynamic work” of cracks in suction pipes in hydropower plants. „Dynamic work” means the possible relative movement of the construction pieces

along or across the cracks, and also the possible rotation (relative to each other) of pieces of the structure that are separated by the cracks.

Keywords: experimental studies, OMA, suction pipe, scratches, hydropower

DOI: 10.7862/rb.2012.2