

Jędrzej Blaut, Rafał Rumin, Jacek Cieślak, Paweł Hyla, Janusz Szpytko

Zastosowanie TKEO w procesie automatycznego wyważania wirnika

JEL: L93 DOI: 10.24136/atest.2019.028

Data zgłoszenia: 15.12.2018 Data akceptacji: 08.02.2019

W artykule zaprezentowano przykład zastosowania Operatora Energetycznego Teagera-Kaisera w automatycznym wyważaniu wirnika. Operator Energetyczny Teagear-Kaisera jest metodą analizy sygnału, która pozwala w dla niektórych obiektów mechanicznych oszacować zmiany energii w ujęciu newtonowski za pomocą sygnału przemieszczenia

Wirniki są elementem konstrukcyjnym wykonującym obrót wokół osi. Tradycyjne wyważanie wirników polega na wprowadzaniu mas korekcyjnych, których celem jest zmniejszenie drgań i hałasu podczas pracy maszyn. Możliwe jest również nadążne wyważania rotorów. Może ono być realizowane przez system mas korekcyjnych o zmiennej odległości od osi obrotu. Zmiana odległości masy korekcyjnej od osi obrotu wpływa na zmianę bezwładności obiektu a tym samym zmniejsza niewyważenie. W zależności od konstrukcji urządzenia modernizacja może zakładać rozbudowę lub wymianę poszczególnych elementów. Poprawa pracy urządzenia wymaga selekcji elementów w zależności od całościowej ingerencji w pracę maszyny oraz wpływu na prace całego urządzenia. Przedstawiona autorska metoda sterowania automatycznego niewyważeniem z wykorzystaniem Operatora Energetycznego z doбором parametrów została wykonana na rzeczywistym stanowisku laboratoryjnym.

Słowa kluczowe: TKEO, Teagear-Kaiser, Operator Energetyczny Teagear-Kaisera, aktywna kontrola drgań, maszyny wirnikowe, wyważanie wirnika, regulator, dynamika wirnika.

Wstęp

Jednym z głównych zadań przy projektowaniu maszyn wirujących (np. turbin wiatrowych, pomp, wentylatorów i wirówek) jest minimalizacja drgań, hałasu i wstrząsów jakie oddziałują na te maszyny. Jedną z głównych przyczyn powstawania drgań jest brak wyważenia wirników w powodu niedokładności produkcyjnych, montażowych lub innych czynników wynikających z pracy urządzenia. Niewyważenie prowadzi do nadmiernego zużycia łożysk i powoduje przedczesne awarie. Najczęściej stosowaną metodą wyważenia wirnika jest zastosowanie mas korekcyjnych w określonych miejscach [1, 2]. Przedstawiona metoda opiera się na unikalnym systemie wyważania wykorzystującym płyn jako masę korekcyjną. W opracowanym stanowisku badawczym przedstawiamy rozwiązanie umożliwiające przepływ płynu korekcyjnego wewnątrz zaprojektowanego układu do aktywnego wyważania wirników cieczą. Układ sterowania oparty jest na kontrolowaniu ilości płynu w każdej z komór korekcyjnych znajdujących się na tarczy korekcyjnej.

1 Niewyważenie

1.1 Niewyważenie wirników

Maszyny obrotowe wykorzystywane w przemyśle stanowią często urządzenia o skomplikowanej budowie (np. wirówki chemiczne, maszyny i różnego rodzaju elektronarzędzia, wentylatory itp.) Koszty ich wykonania i utrzymania w odpowiednim stanie są wysokie. Natomiast straty w wyniku postoju maszyn są niekorzystne dla przedsiębiorcy i generują niepotrzebne koszty. Dlatego ciągle poszukuje się metody wydłużenia czasu sprawnego użytkowania

wszelkich urządzeń. Niestety każda pojawiająca się usterka skutkuje realnym zagrożeniem dla życia i zdrowia pracownika [1, 2, 3].

Nie dostosowanie elementów maszyny może skończyć się uszkodzeniem łożysk. Należy zaznaczyć, że łożysko jest jednym z najważniejszych składników maszyny. Awaria taka zasadniczo kończy się unieruchomieniem urządzenia. Możliwość analizy wzrostu niewyważenia i opis autorskiego rozwiązania konstrukcyjnego jest tematem tego artykułu

Jednym z najważniejszych problemów pojawiających się podczas eksploatacji wirników jest przekroczenie dopuszczalnej liczby amplitud drgań wału oraz łożysk, spowodowanym niewyważeniem wirnika. Jednak rozwój badań z zakresu dynamiki wirników pozwala na opracowanie coraz bardziej efektywnych rozwiązań zmniejszających ryzyko wystąpienia awarii.

1.2 Diagnostyka

Sygnał wibracji jest powszechnie stosowany w diagnostyce wirników. Wiele metod wykorzystuje sygnały wibroakustyczne. Najpopularniejsze obecnie stosowane metody analizy sygnału to szybka transformata Fouriera, transformata Falkowa czy analiza rzędów. Jak każda metoda także i te posiadają wady przede wszystkim należy uwzględnić ograniczenie czasowo- częstotliwościowe. Przetwarzane sygnały muszą być adekwatnie szybko próbkowane. Jedną z aktualnie rozwijanych analiz sygnału diagnostycznego jest metoda oparta na Operatorze Energetycznym Teagera-Kaisera. Zaletą tej metody jest szybka analiza sygnału w czasie rzeczywistym dzięki zastosowaniu małego okna czasowego. Wystarczające okno czasowe w przypadku tej metody to trzy próbki. Pozwala to nie tylko na szybką analizę ale również na niewielkie obciążenie jednostki obliczeniowej. Metoda bazuje na obserwacji zmian energii sygnału oraz pozwala zidentyfikować chwilową częstotliwość dla pojedynczego sygnału [4,5]. Tak więc wartość amplitudy Operatora Energetycznego Teagera-Kaisera jest związana z częstotliwością, która może być powiązana z utratą stabilności pracy łożyska ślizgowego. Podstawy tej metody zostaną opisane w dalszej części artykułu. Rozwój jest zdeterminowany poszukiwaniem metod diagnostycznych pozwalających na przedłużanie czasu eksploatacji łożyska poprzez zapobieganie występowaniu stanów niestabilnej pracy łożysk.

1.3 Wyważanie

Wyważanie wirników ma szerokie zapotrzebowanie w przemyśle. W ramach prac badawczych [20] opracowano metodę wyważania za pomocą ciągłej masy korekcyjnej. Zmiana położenia masy korekcyjnej odbywa się poprzez dostarczenie płynu do odpowiedniej komory poprzez układ hydrauliczny. Zbiornikiem magazynującym płyn korekcyjny są hydroakumulatory, które znajdują się wewnątrz specjalnie opracowanego dysku korekcyjnego umieszczonego na obracającym się wale. Układ sterowania identyfikuje parametry niewyważenia i na tej podstawie steruje przepływem masy w postaci płynu do poszczególnych komór, tak aby wirnik był wyważony. Wyważanie może realizować się w obydwóch kierunkach - tzn. poprzez dostarczenie lub usunięcie masy korekcyjnej z tarczy wirnika. Korekcja możliwa jest tylko w odpowiedniej płaszczyźnie, w taki sposób, że środek ciężkości znajduje się na osi obrotu wału, która

jest także główną centralną osią bezwładności. Wirnik może być wyważony statycznie (w jednej płaszczyźnie) i dynamicznie (w dwóch płaszczyznach). Nowość opracowanego rozwiązania pozwala na wyważenie w trakcie pracy wirników, bez konieczności ich zatrzymywania i demontażu. System wyważający będzie w stanie umieścić wypadkową masę korekcyjną z poszczególnych zbiorników korekcyjnych w miejscu odpowiadającym pozycji masy korekcyjnej. System sterowania pozwala na zastosowanie różnych metod wykrywania niewyważenia i jego korekcyi zmniejszając vibracje całego układu.

1.4 Automatyczne wyważanie

Badania z zakresu wyważania wirników mają istotne znaczenie dla przemysłu - szczególnie wentylatorów używanych do transportu pyłu węglowego do pieców elektrociepłowniczych.

Problem niewyważenia wirnika może pojawić się w wyniku:

- przyklejania się cząsteczek pyłu do łopatek wentylatorów;
- nierównomiernego odklejania się pyłu od łopatek wentylatorów.

Mając na uwadze dotychczasowe rozwiązania techniczne oraz wcześniejsze publikacje na ten temat, czynnikami skłaniającymi do podjęcia badań były:

- zmniejszenie liczby przypadków wstrzymania pracy maszyn z powodu niewyważenia wirników;
- koncepcja zastąpienia masy stałej przez płyn, która stwarza nowe możliwości przy wyważaniu wału i jest atrakcyjna dla zastosowania jej w przemyśle.

Przykładowe zapotrzebowanie na taką technologię występuje w energetyce, gdzie wirnik o średnicy 3,05m służy do transportu pneumatycznego węgla w instalacji spalania węgla. Pył węglowy osadza się na łopatach wentylatora powodując nierównomierne rozmieszczenie masy wywołując niewyważenie. Pojawiające się tam drgania mogą uszkodzić łożyska i zniszczyć wentylator. Po-nad to każdy przestój serwisowy służący do oczyszczenia łopatek z pyłu węglowego kosztuje firmę około 1000 USD i wymagany jest 2 razy/m-c. Samo tylko wyeliminowanie tych dodatkowych przestoju serwisowych pozwoli przedsiębiorstwu zaoszczędzić w skali 2-3 lat kwotę pokrywającą koszty inwestycji w układ do automatycznego wyważania.



Rys. 1 Wentylator do transportu pyłu węglowego w instalacji spalania węgla

Kolejnym przykładem miejsca gdzie może być zastosowana technologia automatycznego wyważania wirników to cementownia. W takim zakładzie produkcyjnym również wykorzystuje się wentyla-

tory do transportu pneumatycznego pyłu. W efekcie co 2 miesiące musi być organizowany dodatkowy przestój technologiczny na czas 12 godzin w celu demontażu i oczyszczenia wentylatora. Dzięki temu wirnik znowu był wyważony i mógł pracować bez generowania niebezpiecznych drgań. Istotne jest to, że usuwana warstwa pyłu z łopatek wentylatora mała grubość sięgającą nawet 2 cm.

1.5 Wyważanie w jednej płaszczyźnie

Wyważanie w jednej płaszczyźnie jest procedurą, pozwalającą korygować rozkład masy wirnika sztywnego w celu zapewnienia statycznego niewyważenia resztkowego we właściwych granicach. Wyważanie to jest realizowane jest poprzez zmianę masy na tarczy wirnika w odpowiedniej płaszczyźnie, tak aby środek ciężkości znajdował się na głównej centralnej osi bezwładności. Zupelne wyważenia wymaga wykonania zarówno wyważania statycznego jak i wyważania dynamicznego.

1.6 Stanowisko do automatycznego wyważania

Po wykryciu nadmiernych drgań na łożyskach za pomocą czujników akcelerometrycznych (Rys. 2) inicjuje się proces aktywnej detekcji i kontroli niewyważenia (czerwony wykres - Rys. 3). Pomiar przesunięcia fazowego między maksymalną amplitudą drgań i znacznikiem obrotu na wale pozwala na określenie kąta fazowego (niebieski wykres - Rys. 3). Przesunięcie fazowe jest mierzone jednocześnie wraz z pomiarem drgań za pomocą czujników podłączonych do sterownika. Podczas gdy amplituda drgań odpowiada wartości masy niewyważającej wirnik, to przesunięcie fazowe wskazuje położenie tej masy wokół obwodu wirnika.

Na podstawie pomiarów wykreślamy wektory:

F - jest to wartość siły niewyważającej, która jest zależna od zmierzonej wartości amplitudy "A" drgań czujnika umieszczonego na łożysku nr. 1. Wartość φ - kąta fazowego między wektorem siły F, a lokalizacją znacznika fazy umieszczonego w danym punkcie obwodu wirnika 0° , odczytujemy z czujnika nr. 2.

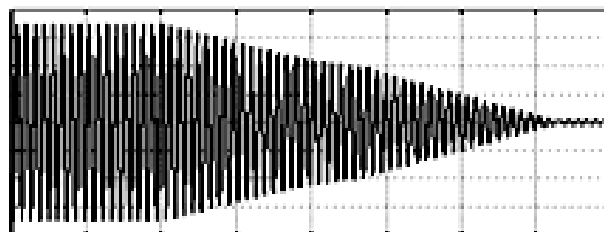
Tak otrzymany wektor korekcyjny rozkładamy na poszczególne składowe siły korekcyjne, które są zlokalizowane w miejscach zbiorników korekcyjnych.

Na rysunku 3 znajdują się poniższe oznaczenia:

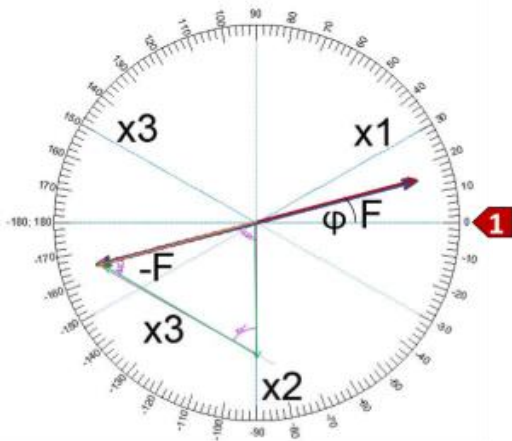
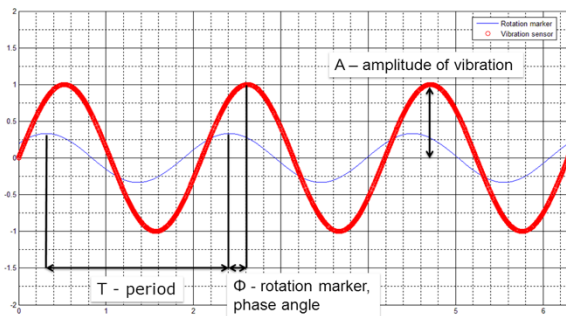
-F – siła korekcyjna ($F \approx A$)

A – amplituda niewyważenia

X1, X2, X3 - wektory składowe sił korekcyjnych na które składa się siła niewyważająca. Wektory te są zgodne z rozmieszczeniem zbiorników z płynem korekcyjnym.



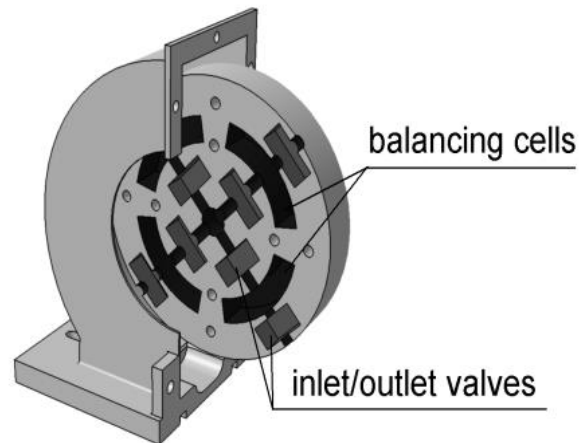
Rys. 2 Wykrywanie nadmiernych drgań na łożyskach za pomocą akcelerometrów.



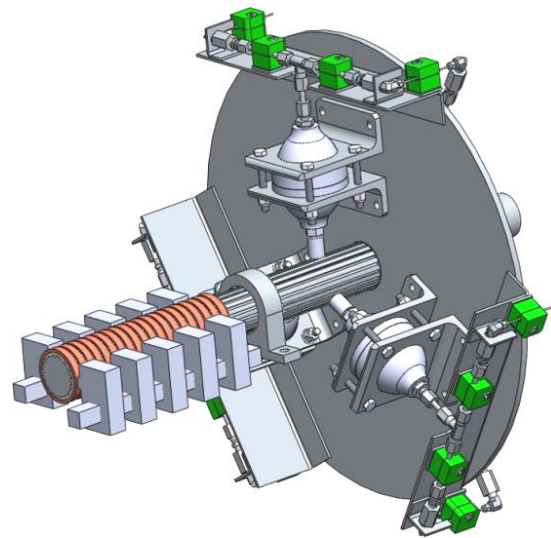
Rys. 3 Wektor siły niewyważającej (F) oraz siły korekcyjnej oznaczonej ($-F$), czyli siłą o takiej samej amplitudzie i kierunku, lecz przeciwnym zwrocie. Siła ($-F$) rozdzielona jest na dwa elementy wektora $X2$ i $X3$; $X1$, $X2$, $X3$ - trzy komory umieszczone na tarczy korekcyjnej.

W rezultacie pomiaru niewyważenia otrzymujemy wartość siły niewyważającej przedstawionej w postaci "wektora obrotowego" (siła F po prawej stronie - Rys. 3). Siła niewyważająca (F) jest redukowana przeciwnie skierowaną siłą korekcyjną poprzez dodanie masy korekcyjnej po przeciwnej stronie wirnika. Regulacja wypadkowej wypadkowej wartości oraz wypadkowego kierunku działania siły korekcyjnej ($-F$) odbywa się poprzez wypełnianie zbiorników $x2$ i $x3$. Na powyższym rysunku widać siłę korekcyjną ($-F$) jaka powstała dzięki wypadkowej sile wynikającej z oddziaływania dwóch mas korekcyjnych wypełniających zbiorniki wzdłuż linii $x2$ i $x3$. W ten sposób wypełniając zbiorniki odpowiednią ilością płynu zmniejszono drgania co zostało przedstawione na wykresie z Rys. 2.

Ta metoda wyważania polega na użyciu płynu jako masy korekcyjnej. Określona ilość płynu jest pompowana do odpowiednich komór (hydroakumulatorów) znajdujących się na obwodzie tarczy korekcyjnej. W przypadku, gdy masa korekcyjna musi zostać zmniejszona, odpowiednia ilość cieczy jest wypuszczana z komory przez zawór wylotowy na skutek działania siły odśrodkowej. Ta ciągła możliwość zmiany rozkładu masy korekcyjnej poprzez napełnianie i opróżnianie wybranej komory na tarczy korekcyjnej, pozwala na wyważenie wirnika bez przerywania jego pracy.



Rys. 4 Pojedyncze komory w tarczy korekcyjnej mogą być wypełnione przez płyn korekcyjny.

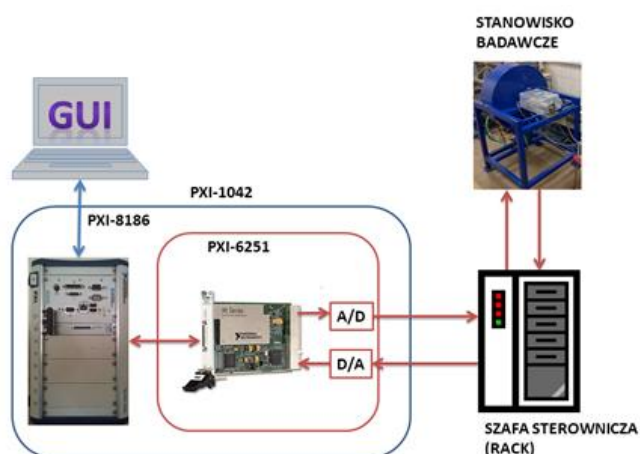


Rys. 5 Wstępny projekt tarczy korekcyjnej.

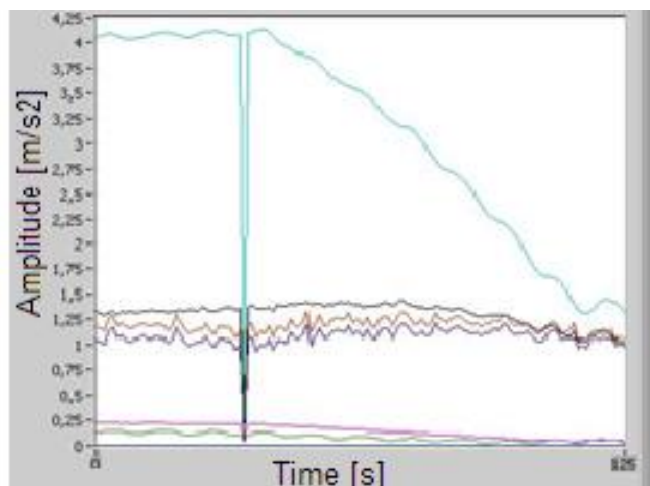
1.7 Układ kontrolno-pomiarowy

W celu przeprowadzenia eksperymentu zaprojektowano i zbudowano układ sterowania opracowany na sterowniku PXI firmy National Instrument. W celu odczytu pomiarów przygotowano specjalny interfejs do komunikacji operatora maszyny z układem do wyważania. Opracowane algorytmy zostały zaimplementowane przy pomocy środowiska programistycznego LabView.

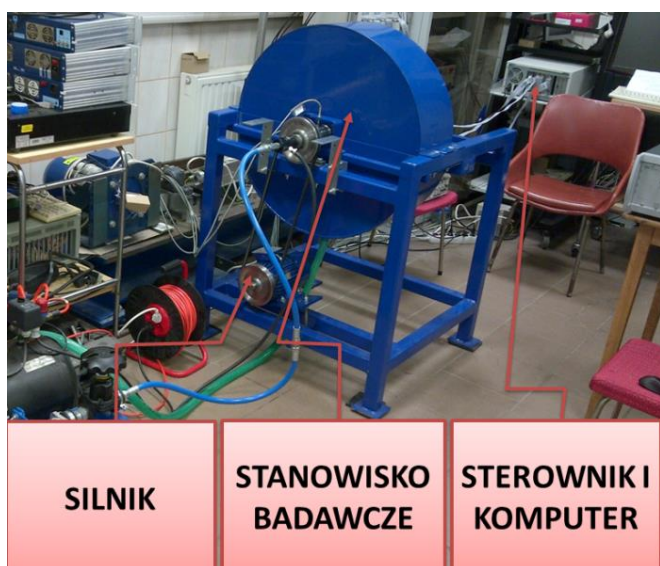
Na bazie sygnałów pochodzących ze zmierzonej amplitudy drgań na łożyskach oraz z pomiaru kąta fazowego obracającego się wirnika sztywnego – przygotowano algorytm sterowania. Wykrywanie niewyważenia umożliwia uruchomienie procedury wyważania statycznego metodą amplitudowo-fazową.



Rys. 6 Układ sterowania został przygotowany na sterowniku PXI w celu wyważania wirników w czasie ich normalnej pracy.



Rys. 8 Zarejestrowany sygnał podczas eksperymentu wyważania wału.



Rys. 7 Stanowisko laboratoryjne

1.8 Przebieg pomiaru

W trakcie eksperymentu zmierzono amplitudę drgań wirnika niewyważonego i wynosiła ona 4,10 m/s². Na skutek działania układu wyważającego uzyskano zmniejszenie wartości amplitudy drgań do 1,45 m/s² przy stałe obracającym się wirniku z prędkością 900 obr/min.

Stanowisko laboratoryjne posiadało własne niewyważenie resztkowe o wartości amplitudy 1,25 m/s² - wynikające z niedokładności montażowych oraz asymetrii konstrukcji.

Jeśli odejmiemy wartość amplitudy drgań resztkowych od całkowitej zmierzonej amplitudy drgań, to można stwierdzić, że amplituda przyspieszeń drgań wirnika zmniejszyła się z wartości 2,85 m/s² do 0,2 m/s² (przyjmując, że drgania resztkowe stanowią punkt odniesienia dla wyznaczenia zredukowanej wartości amplitudy drgań spowodowanych niewyważeniem). Taki rezultat oznacza zmniejszenie amplitudy drgań wywołanych niewyważeniem o około 92%.

2 Operator Energety Teagera Kaisera.

Operator Energetyczny Teagera- Kaisera (TKEO) został opracowany przez Huberta M Teagera i Shushan M. Teager w 1983 roku [17]. Początkowo znajdował zastosowanie w analizie mowy. W kolejnych latach operator energetyczny został użyty w badaniach łożyska helikoptera [18]. Jedną z zalet omawianej metody jest możliwość pracy na surowym sygnale. Pozwala to na analizę całości pasma częstotliwościowego bez potrzeby filtracji pasmowo przepustowej. Zostały przeprowadzone badania eksploatacyjne nad wykorzystaniem TKEO w elektrowniach wiatrowych [19]. Badania dotyczyły przekładni turbiny wiatrowej, która pracuje w różnorodnych warunkach obciążenia i temperatury. Badania porównały technikę diagnostyczną w oparciu o TKEO z opartą na transformacie Hilberta.

Operator energetycznych zdefiniowany jest w postaci ciągłej jako [17]:

$$\Psi(x(t)) = \dot{x}^2(t) - x(t)\ddot{x}(t)$$

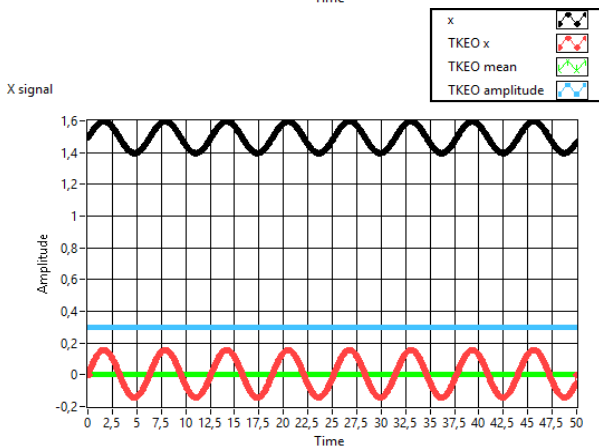
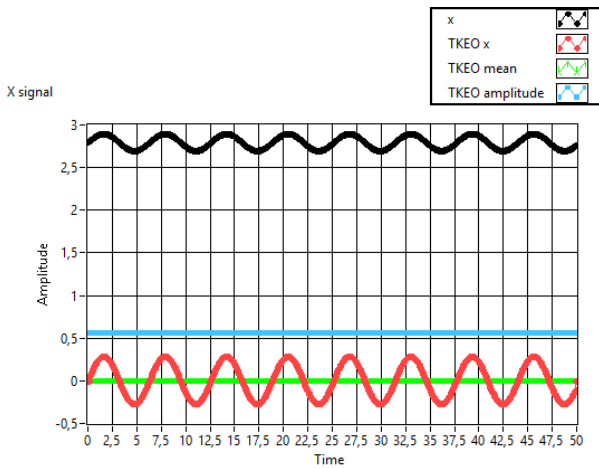
TKEO przyjmuje też postać dla sygnału dyskretnego:

$$\Psi[x[n]] = x_{[n]}^2 - x_{[n-1]}x_{[n+1]}$$

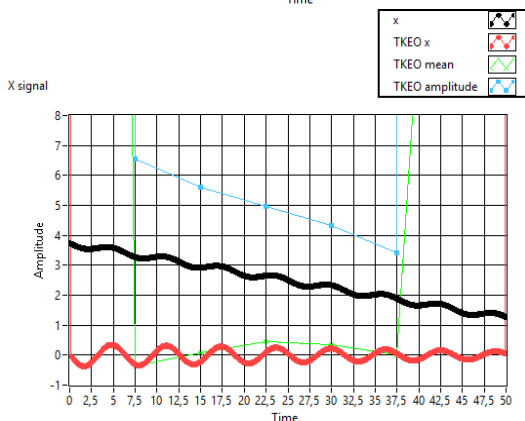
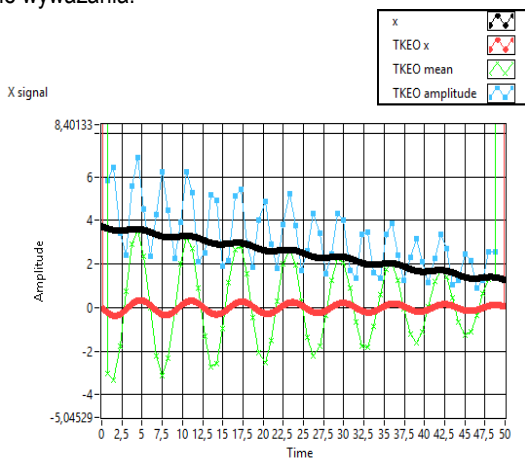
Pozwala to na niemal natychmiastowe działanie Operatora, z wykorzystaniem jedynie trzech próbek do wyliczenia jego wartości. Pozwala to również na bardzo łatwe wdrożenie Operatora do istniejącego już systemu diagnostycznego. Ważnym ograniczeniem stosowania Operatora Energetycznego Teagera-Kaisera jest jego czułość na szum pomiarowy.

3 Analiza wstępna

Stanowisko laboratoryjne pozwala na zmniejszenie drgań w skutek wyważania wału podczas pracy. Przeprowadzono wstępną analizę przydatności TKEO w procesie wyważania wału. Spodziewana wartość drgań wynosiła od 2,7 mm/s do 1,5mm/s. W celu analizy zachowania się TKEO dla takich wartości posłużono się symulacją. Rysunek 1 przedstawia symulację drgań przed i p procesie wyważania. Wartość symulowanego sygnału posiada charakter sinusoidalny. Również wartość TKEO wykazuje taki charakter. Po procesie wyważania wartość amplitudy TKEO maleje. Wartość średnia TKEO zarówno przed jak i po procesie wyważania jest stała i wynosi 0.



Rys. 9 Symulacja drgań i wyliczonej wartości TKEO przed i po procesie wyważania.

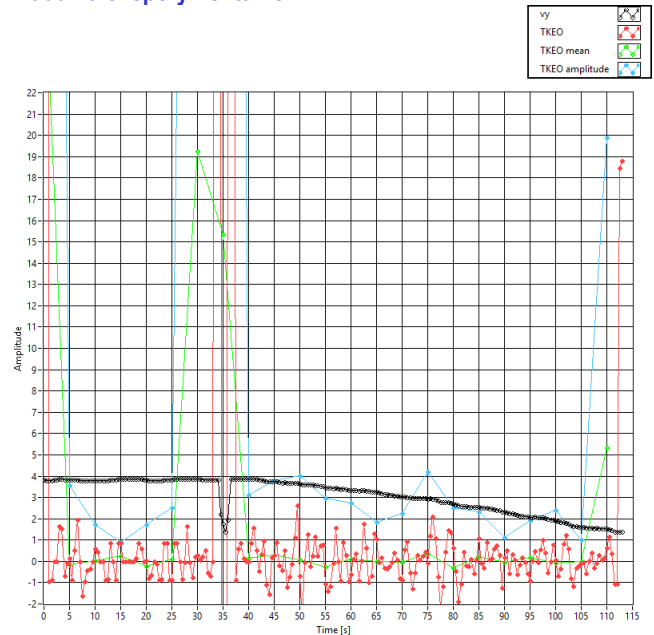


Rys. 10 Symulacja drgań i wyliczonej wartości TKEO podczas procesu wyważania.

Rysunek 9 przedstawia zachowanie się TKEO podczas procesu wyważania. Wartość TKEO spada wraz z postępem procesu. Należy zauważyć, że wartość ta jest większa zarówno od wartości TKEO przed i po procesie wyważania zaprezentowanym na rysunku 9. Należy się spodziewać że zmiana wartości drgań towarzysząca procesowi wyważania będzie powodowała wzrost wartości TKEO.

Rysunek 10 Przedstawia wartości średniej i wartość amplitudy (TKEO mean i TKEO amplitude) wyznaczane na dwa sposoby. Pierwszy z nich polega na wyznaczaniu tych wartości za pomocą uśredniania poniżej okresu sygnału symulowanego natomiast drugi powyżej okresu symulowanego. W przypadku uśredniania wartości TKEO dokładnie raz na okres w dla tak symulowanego sygnału uzyskano by linię prostą.

4 Badania eksperymentalne



Rys. 11 Zarejestrowany sygnał podczas eksperymentu wyważania wału oraz wyznaczone wartości TKEO.

Rysunek 11 Przedstawia sygnał drganiowy podczas wykonania wyważania wału wirnika. Amplituda drgań (v_y) spada z 4 do 2,2 mm/s. Zaprezentowane wartości TKEO odpowiadają kolejno wartości liczonej bezpośrednio z sygnału drganiowego, wartości średniej TKEO i amplitudy TKEO. Jak ustalono w badaniach wstępnych spodziewano się wzrostu amplitudy drgań podczas procesu wyważania. Po 3,5 sekundach zaczyna się proces wyważania. Nagły pik w wartości sygnału prędkości przemieszczenia jest związany z zakłóceniem elektromagnetycznym wywołanym przez otwarcie zaworów regulacyjnych. Powoduje to niespodziewane skoki w 35 sekundzie sygnału i wyznaczanych wartości TKEO. Wysokie wartości TKEO na początku i końcu analizy są związane z metodą liczenia TKEO. Powoduje ona, duże wartości w pierwszych i ostatnich 3 iteracjach funkcji wyliczającej TKEO.

Wnioski, planowane badania

Przeprowadzone badania symulacyjne i na obiekcie rzeczywistym wykazują możliwość stosowania TKEO w celu oceny procesu wyważania wału. Wzrost wartości podczas zmiany (zarówno wzrostu jak i spadku) drgań pozwala wykorzystać metodę do sygnalizacji zmiany warunków pracy urządzenia

Bibliografia:

- Blaut J., Korbil T., Batko W. 2016. Application of the Teager-Kaiser energy operator to detect instability of a plain bearing. *Diagnostyka* 17
- Rumin R., Cieřlik J., Mańka M., Szlachetka A., Maliszewski M. 2012. Układ do redukcji drgań urządzeń wirujących. Zgłoszenie patentowe.
- Rumin R., Cieřlik J. 2010. Układ do automatycznego wyważania wirników przy pomocy ciągłej zmiany rozkładu masy korekcyjnej. *Drgania w Układach Fizycznych* vol. 24: 337–342
- Maragos P., Kaiser J.F., Quatieri T. F.. 1993. Energy separation in signal modulations with application to speech analysis. *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol.41, No.10,1993,pp.3024 – 3051
- Vakman D.. 1996. On the analytic signal, the TeagerKaiser energy algorithm, and other methods for defining amplitude and frequency. *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol.44, No.4, ,pp.791– 797
- F. C. Nelson, A Brief History of Early Rotor Dynamics, *J. of Sound and Vib.*, 37 no 6, (2003).
- S. Zhou and J. Shi , Active Balancing and Vibration Control of Rotating Machinery: A Survey, *The Shock and Vibration Digest* (2001).
- R. Rumin and J. Cieřlik, System for Automatic Rotor Balancing Using a Continuous Change of the Correction Mass Distribution, *Vibrations in Physical Systems*, vol. 24, (2010), 337-342.
- S. V. Pantankar and D. B. Spalding, A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in the three-dimensional parabolic flows, *International Journal of Heat Mass Transfer*, 15, (1972), 1787-1806.
- T. C. Papanastasiou, G. C. Georgiou, A. N. Alexandrou, *Viscous Fluid Flow: Chapter 6 - Unidirectional Flows*, CRC Press, (2000).
- J.P. Vanyo, *Rotating Fluids in Engineering and Science*, Dover Publications, (1993).
- R. Gryboř, *Podstawy mechaniki plynów. Cz. 1, Kinematyka, dynamika cieczy i gazów, hydrostatyka, Cz. 2, Turbulencja, metody numeryczne, zastosowania techniczne*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, (1998).
- R. Puzyrewski, J. Sawicki, *Podstawy mechaniki plynów i hydrauliki*, Wydaw. Naukowe PWN, (2000).
- Gretchen B. Murri, Jeffery R. Schaffb, *Fatigue Life Methodology For Tapered Hybrid Composite Flexbeams*.
- Maissan, T.M., The Effects of the Black Blades on Surface Temperatures for Wind Turbines, in W.A.T. J., Editor 2001, Université du Québec à Rimouski: Canada.
- Alsabagh, Abdel, et al. "A Review of the Effects of Ice Accretion on the Structural Behavior of Wind Turbines." *Wind Engineering* 37.1 (2013): 59-70.
- Teager , H. i Teager, S. 1983. *A Phenomenological Model for Vowel Production in the Vocal Tract*. San Diego: College-Hill Press.
- Henríquez, P., White, P., Alonso, J., Ferrer, C. i Travieso, C. 2011. Application of Teager-Kaiser Energy Operator to the Analysis of Degradation of a Helicopter Input Pinion Bearing. *The International Conference Surveillance 6*.
- Antoniadou, I., Manson, G., Staszewski, W., Barszcz, T. i Wordena, K. 2015, A time–frequency analysis approach for condition monitoring of a wind turbine gearbox under varying load conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, strony 188–216.
- Rumin R., Cieřlik J. 2011, Vibration Control of Rotating Machinery. Conference Active Noise and Vibration Control Methods, Krakow-Wojanow, Poland.

Application of TKEO in the process of automatic balancing of the rotor

The article presents an example of application of the Teager-Kaiser Energy Operator in automatic rotor balancing. The Teagear Kaiser Energy Operator is a signal analysis method, which allows for some mechanical objects to estimate energy changes in Newtonian terms by means of a displacement signal.

Rotors are a structural element that rotates around an axis. Traditional balancing of the rotors is based on the introduction of correction masses, the aim of which is to reduce vibrations and noise during machine operation. Traditional balancing of the rotors is also possible. It can be realized by a system of correction masses with variable distance from the axis of rotation. The change of the correction mass distance from the axis of rotation influences the change of inertia of the object and thus reduces the unbalance. Depending on the design of the device, the modernization may assume extension or replacement of individual elements. Improvement of the operation of the device requires selection of elements depending on the overall interference in the operation of the machine and the impact on the operation of the entire device. The presented original method of automatic unbalance control with the use of the Energy Operator with the selection of parameters has been performed on a real laboratory stand.

Key words: TKEO, Teagear-Kaiser, Operator Energetyczny Teagear-Kaisera, active vibration control, rotating machinery, balancing rotor, controller, rotor dynamics.

Autorzy:

Mgr inż. **Jędrzej Blaut** - Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Aleja Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Dr inż. **Rafał Rumin** – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Zarządzania, Aleja Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, rumin@zarz.agh.edu.pl; autor korespondencyjny

Dr hab. inż. **Jacek Cieřlik**, prof. AGH - Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Aleja Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Dr inż. **Paweł Hyla** – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Aleja Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Prof. dr hab. inż. **Janusz Szpytko** - Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Aleja Mickiewicza 30, 30-059 Kraków