

# Zastosowanie elementów hydraulicznych w projekcie tarczy korekcyjnej do układu redukcji niewyważenia w wentylatorach

Rafał Rumin, Jerzy Mikulik

## 1. Wstęp

Budynki przemysłowe spełniają coraz bardziej restrykcyjne wymagania w celu podniesienia ich jakości i konkurencyjności, aby dostosować się do wymagań przedsiębiorstw. Jedną z takich istotnych cech jest zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych budynku przy zachowaniu jego funkcjonalności, a nawet wprowadzenie dodatkowych modułów automatycznego sterowania, aby można było go nazwać budynkiem inteligentnym.

Systemy wykorzystywane w budynku inteligentnym charakteryzują się szerokim zakresem działania: od zarządzania systemami przeciwpożarowymi, alarmowymi i kontroli dostępu, poprzez sterowanie siecią teleinformatyczną, oświetleniem, ogrzewaniem, wentylacją i klimatyzacją. Pozwala to na stałe dążenie do redukcji kosztów utrzymania takiego budynku dzięki kontroli, monitorowaniu i ciągłej optymalizacji jego funkcji i struktury. Dążenie do redukcji kosztów ma szczególne znaczenie w realizowanych procesach produkcyjnych, jakie zachodzą wewnątrz inteligentnego budynku. Integracja istniejącej infrastruktury z tworzonym parkiem maszynowym pozwala na zdalne zarządzanie i zwiększenie wydajności produkcyjnej przy zachowaniu odpowiednich norm i narzuconych wymagań [1].

Dobrym przykładem takiego rozwiązania jest system wentylacyjno-odciągowy wykorzystywany np. w przemyśle chemicznym, energetycznym, drzewnym lub obróbki metalu (rys. 1). Procesy technologiczne związane z transportem lub obróbką materiałów często powodują powstawanie nadmiernego zapylenia powietrza. Powoduje to, że układy wentylatorów służące w urządzeniach odciągowych lub transportu pneumatycznego są narażone na awarie. Powstawanie uszkodzeń ma swoje źródło w niszcącym działaniu zawieszonych w powietrzu drobinek materiału. Cząstki te mogą przyklejać się do łopatek wentylatorów lub niszczyć zewnętrzne powłoki pracujących turbin poprzez przetarcie fragmentu ich powierzchni, co może doprowadzić nawet do powstania pęknięcia i zniszczenia maszyny wirnikowej.

Diagnostyka maszyn obrotowych jest na tyle rozwinięta, że pozwala na detekcję uszkodzenia łopaty, łożyska, a także pojawiające się niewyważenie [5, 8, 9]. W tym celu wykonuje się stały monitoring pracy wału i analizę drgań korpusu łożysk. Pojawiające się niewyważenie sygnalizowane jest przez sterownik, a informacja ostrzegawcza przekazywana jest operatorowi. Za pomocą odpowiednich algorytmów sterowania można obliczyć wypadkowe położenie masy niewyważającej w celu określenia położenia mas korekcyjnych na poszczególnych płaszczyznach. Wykonywane jest to za pomocą metody współczynników wpływu, co pozwala w sposób skuteczny, pomimo pewnych niedo-

**Streszczenie:** W inteligentnych budynkach przemysłowych wentylatory znajdują bardzo szerokie zastosowanie w układach wentylacyjnych oraz transporcie pneumatycznym. W przypadku pracy w środowisku o wysokim zapyleniu istnieje ryzyko pojawienia się uszkodzenia wentylatora. Na skutek nierównomiernego osadzenia się pyłów na łopatach wentylatora powstaje niewyważenie, które powoduje drgania wirnika. Dla dalszego bezpiecznego działania maszyny należy zatrzymać jej pracę w celu oczyszczenia łopatek. Tego typu konserwacja urządzenia pozwoli na redukcję jego drgań i uniknięcie jego uszkodzenia. Niestety jest to kosztowna i czasochłonna operacja, która z powodzeniem mogłaby być odsunięta w czasie aż do planowego serwisu urządzenia, pod warunkiem wykorzystania układu do automatycznego wyważania wentylatora. W artykule opisano układ do redukcji drgań maszyn wirujących poprzez ich automatyczne wyważenie. Przedstawiono projekt tarczy korekcyjnej, wewnątrz której znajdują się komory magazynujące płyn hydrauliczny, pełniący rolę masy korekcyjnej.

Słowa kluczowe: wyważanie, dynamika wirników, redukcja drgań, niewyważenie.

## 🇬🇧 DESIGN OF CORRECTION DISC USING HYDRAULIC ELEMENTS FOR REDUCTION OF UNBALANCE IN VENTILATORS

**Abstract:** Industrial fans are widely used in air-conditioning and air transport in intelligent buildings. Working in an environment with a lot of dust will bring a high risk of damage to the fan. Not symmetric deposition of dust on the fan blades can create an imbalance of the rotor that causes vibration. It is necessary to stop its work and clean the blades often to keep safe operation of the machine. This type of maintenance work will reduce the vibration and prevent damage. Unfortunately, this is a costly and time-consuming operation. We can get similar results without those disadvantages when it will be used a system for automatically balancing of the fan. This paper describes a system for reduction of vibration for rotating machinery by its automatic balancing. It was presented design of correction disc, within which there are hydraulic chamber for fluid storage as a correction mass.

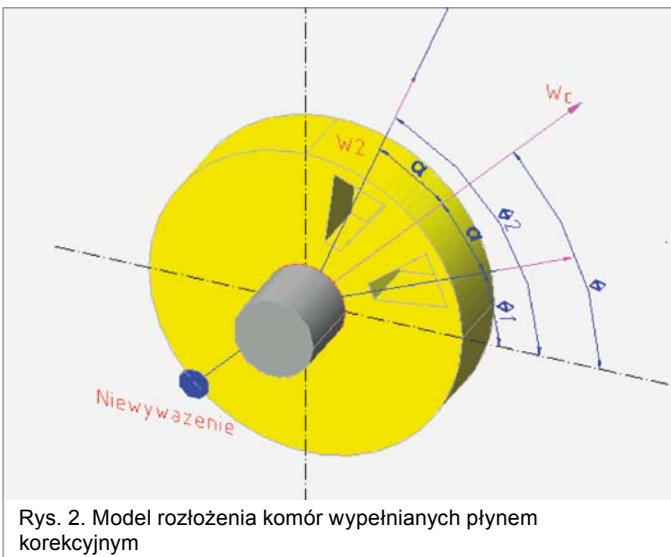
Keywords: rotor balancing, unbalance, rotor dynamics, rotating fluids, vibrations reduction.

kładności, określić stopień niewyważenia oraz potrzebne masy korekcyjne wraz z ich położeniem [2, 6].

Celem prowadzonych badań jest opracowanie metody automatycznego wyważania, pozwalającej na stałą pracę urządzenia



Rys. 1. Wiryk wentylatora do transportu pneumatycznego pyłu węglowego. Pojedynczy przestój serwisowy stanowi koszt około 1000 USD, co daje około 24 000 USD/rok [10]



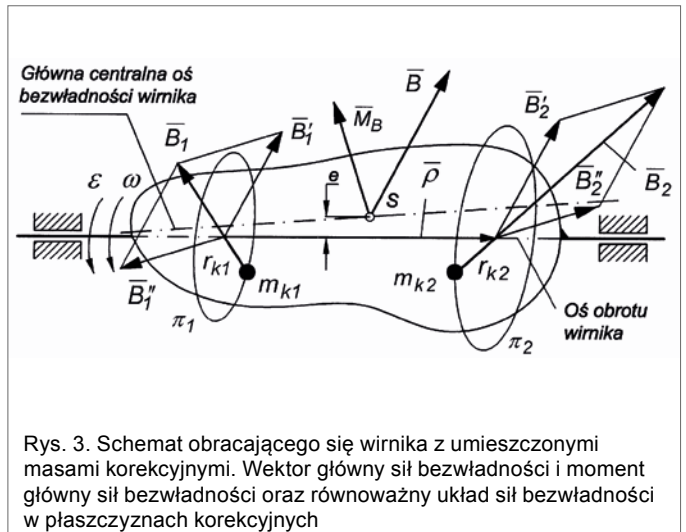
Rys. 2. Model rozłożenia komór wypełnianych płynem korekcyjnym

bez potrzeby częstych przestojów technologicznych (np. w celu oczyszczenia łopatek wentylatora). Układ taki znacznie redukuje ilość przestojów serwisowych w skali roku, a pojawiające się niewyważenie zostaje automatycznie ograniczone.

## 2. Założenia projektowe tarczy korekcyjnej

Istniejące urządzenia przemysłowe zastosowane w układach wentylacyjnych lub transporcie pneumatycznym charakteryzują się stosunkowo dużymi gabarytami wentylatorów. Pozwala to na zastosowanie w tych urządzeniach dodatkowej tarczy korekcyjnej, umieszczonej na końcu wału. Tarcza korekcyjna zbudowana jest z układu hydraulicznego wykorzystującego mikroawary i hydroakumulatory ułożone na trzech specjalnie przygotowanych kanałach korekcyjnych. Hydroakumulatory pełnią rolę komór magazynujących ciecz (masę korekcyjną), natomiast zawory służą do sterowania wpływem oraz wypływem płynu z danej komory. Jej działanie skupia się na procesie automatycznego wyważania przez redukcję wpływu masy niewyważającej [7].

Odbywa się to poprzez uzupełnienie wybranych komór korekcyjnych (rys. 2), a w tym przypadku hydroakumulatorów, taką



Rys. 3. Schemat obracającego się wirnika z umieszczonymi masami korekcyjnymi. Wektor główny sił bezwładności i moment główny sił bezwładności oraz równoważny układ sił bezwładności w płaszczyznach korekcyjnych

objętością cieczy, której łączna masa wygeneruje siłę odśrodkową, np.  $W_1$ ,  $W_2$ . Wypadkowa siła jest wynikiem złożenia tych dwóch, a jej kierunek i zwrot ma być przeciwnie skierowany niż siła niewyważenia pochodząca od masy niewyważającej.

## 3. Niewyważenie w ujęciu teoretycznym

Wyważenie jest to proces, który odbywa się poprzez zmianę masy umieszczonej na tarczy wirnika we właściwej płaszczyźnie korekcyjnej. Jest realizowane w taki sposób, aby środek ciężkości całego wirnika znajdował się w głównej centralnej osi bezwładności, a ta ma pokrywać się z osią obrotu. Większość urządzeń wirnikowych jest wyważana statycznie oraz dynamicznie zarówno na etapie produkcji (w specjalnych wyważarkach), jak i w łożyskach własnych (po zamontowaniu wału w docelowym układzie) [3].

Wyważenie statyczne zachodzi wtedy, gdy wektor główny sił bezwładności jest równy zero, tj. [4]:

$$Mx_S = \sum_{i=1}^n m_i x_i x_i = 0, \quad My_S = \sum_{i=1}^n m_i y_i y_i = 0 \quad (1)$$

Wyważenie dynamiczne wymaga spełnienia powyższego warunku oraz dodatkowo spełnionego założenia, że oś obrotu jest główną osią bezwładności:

$$D_{xz} = \sum_{i=1}^n m_i x_i z_i = 0 \quad \text{oraz} \quad D_{yz} = \sum_{i=1}^n m_i y_i z_i = 0 \quad (2)$$

Należy mieć na uwadze pozostałe niewyważenie resztkowe, które mogłyby spowodować powstanie dalszych drgań układu dla wyższych prędkości obrotowych, niż jest to przewidziane przez konstruktorów wirnika.

Rysunek 3 przedstawia obracający się wokół własnej osi element, symbolizujący niesymetryczny wirnik, wraz z punktowo skupionymi masami  $m_{k1}$ ,  $m_{k2}$ . Warto zaznaczyć, że w przemyśle mogą mieć zastosowanie wirniki o poziomej jak i pionowej osi obrotu, natomiast przedstawiona analiza będzie dotyczyła jednego z przypadków.

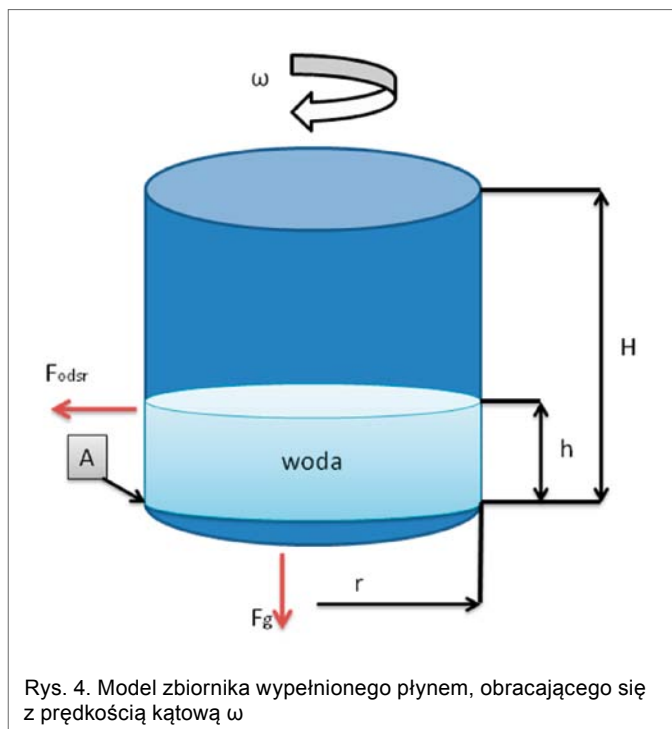
W wyniku redukcji sił i momentów otrzymujemy wektor główny sił bezwładności  $\bar{B}$  oraz moment główny sił bezwładności  $\bar{M}_B$  przyłożone w środku masy wirnika  $S$ .

$$\bar{B} = \sum_{i=1}^n \bar{B}_i \quad (3)$$

$$\bar{M}_B = \sum_{i=1}^n \bar{\rho}_i \times \bar{B}_i$$

Aby wirnik wyrównoważyć dynamicznie, należy w płaszczyznach  $\pi_1$  i  $\pi_2$ , zwanych płaszczyznami korekcyjnymi (lub płaszczyznami wyważania), umieścić masy korekcyjne  $m_{k1}$  i  $m_{k2}$  na promieniach korekcyjnych  $r_{k1}$  i  $r_{k2}$  obróconych o kąt  $180^\circ$  w stosunku do sił bezwładności  $\bar{B}_1$  i  $\bar{B}_2$ . Przy obrocie wału z prędkością kątową  $\bar{\omega}$  masy korekcyjne wywołują siły bezwładności równoważące siły  $\bar{B}_1$  i  $\bar{B}_2$ , tak, że muszą być spełnione równania:

$$B_1 = m_{k1} r_{k1} \omega^2 \quad B_2 = m_{k2} r_{k2} \omega^2 \quad (4)$$



Rys. 4. Model zbiornika wypełnionego płynem, obracającego się z prędkością kątową  $\omega$

#### 4. Zjawiska oddziałujące na płyn hydrauliczny znajdujący się wewnątrz tarczy korekcyjnej

Warunki panujące wewnątrz tarczy podczas działania układu wyważania są uzależnione od prędkości obrotowej wału. Zgodnie z uproszczonym modelem matematycznym można przedstawić to za pomocą jednego zbiornika o kształcie walca, który jest wypełniony wodą do wysokości  $h$ . Promień walca określono za pomocą  $r$ , a jego całkowitą wysokość jako  $H$ . Zbiornik obraca się wokół własnej osi z prędkością  $\omega$ . Dla poniższych obliczeń założono prędkość  $\omega = 0,3$  [rad/s], lecz w układzie rzeczywistym może być to wartość z przedziału od 0 do 315 [rad/s]. Dla dalszego uproszczenia model ten będzie odpowiadać wentylatorowi o pionowej osi obrotu, a siła odśrodkowa pochodząca od wirującej masy jest ustawiona prostopadłe do kierunku działania siły grawitacji. Obliczenia dotyczą określenia m.in. siły odśrodkowej oraz ciśnienia, jakie panuje w punkcie  $A$  oznaczonym na rys. 4.

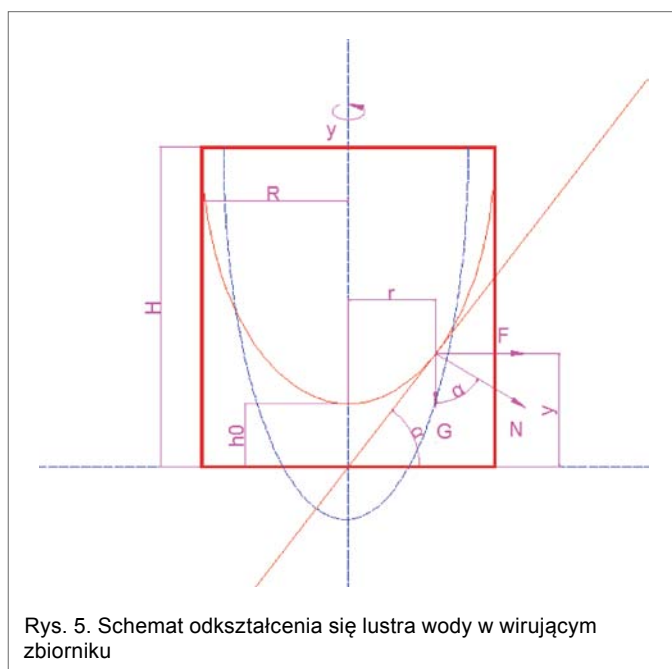
Założenia do obliczeń analitycznych:

- Wysokość zbiornika:  $H = z_4 = 1$  [m]
- Wysokość słupa wody:  $h = h_0 = 0,3$  [m]
- Wysokość słupa gazu nad wodą:  $z_3 = 0,7$  [m]
- Promień:  $r = R = 1$  [m]
- Prędkość obrotowa:  $\omega = 0,3$  [rad/s]
- Prędkość liniowa:  $v = 0,3$  [m/s]
- Przyspieszenie ziemskie:  $F_g = G = 9,81$  [m/s<sup>2</sup>]
- Gęstość:  $\rho = 1000$  [kg/m<sup>3</sup>]

Na kolejnym rysunku (rys. 5) przedstawiono pojawiające się zjawisko odkształcenia się zwierciadła wody pod wpływem działania siły odśrodkowej na obracający się zbiornik wypełniony wodą. Siła grawitacji została oznaczona jako  $G$ , natomiast siła odśrodkowa jako  $F$ . Wypadkowa siła działająca na pojedynczą cząstkę wody oznaczona jest literą  $N$ .

Wyliczone dla tego przykładu ciśnienie statyczne wyniesie:

$$P_A = -\rho g(z_3 - z_4) = 2941 \text{ [Pa]}$$



Rys. 5. Schemat odkształcenia się lustra wody w wirującym zbiorniku

Natomiast ciśnienie dynamiczne w punkcie  $A$ :

$$P_A = \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 = 45 \text{ [Pa]}$$

Suma ciśnienia statycznego i dynamicznego będzie wynosić:

$$P_A = 2986 \text{ [Pa]}$$

W celu dalszego rozbudowywania modelu matematycznego zdecydowano się na przeprowadzenie symulacji przy użyciu oprogramowania Ansys Fluent. Pozwoliło to na weryfikację modelu analitycznego, a następnie modyfikację kształtu zbior-

nika z płynem w taki sposób, aby odzwierciedlał on swoim kształtem kanały korekcyjne umieszczone na tarczy korekcyjnej. Symulacje wykonano przy użyciu modelu VOF, rozwiązując układ osiowo-symetryczny, zadając początkowe ciśnienie statyczne oraz prędkość obrotową zgodnie z zadaniem analitycznym. Uzyskana w trakcie symulacji maksymalna wartość ciśnienia całkowitego odczytana w punkcie A w przybliżeniu wynosiła:

$$P_A = 2990 \text{ [Pa]}$$

Widać tutaj zgodność tego prostego modelu symulacyjnego z obliczeniami analitycznymi, co pozwala nam docelowo analizować rozkład ciśnień wewnątrz bardziej skomplikowanego kształtu kanałów korekcyjnych wypełnionych płynem.

## 5. Budowa tarczy korekcyjnej

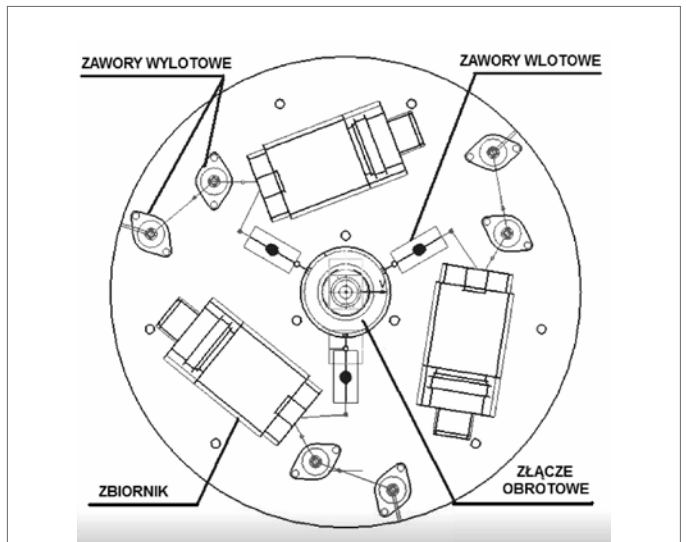
Projekt tarczy korekcyjnej zakłada możliwość jej użycia w istniejących już konstrukcjach wentylatorów bez konieczności dokonywania zbyt dużych zmian w pracujących urządzeniach przemysłowych. Ograniczenie to jest istotne z punktu widzenia wdrożenia tego rozwiązania do przemysłu, gdyż każda modyfikacja istniejącego parku maszynowego wiąże się ze znacznymi kosztami. W celu dostosowania do indywidualnych wymagań istnieje możliwość modyfikacji gabarytów, a także sposobu montażu tarczy korekcyjnej do wentylatora. Może być ona umieszczona bezpośrednio na wale lub przykręcona za pomocą specjalnych uchwytych do elementów wentylatora, a nawet do jego łopat.

Kolejnym ograniczeniem jest rodzaj płynu wykorzystany jako masa korekcyjna. Wiąże się z tym warunki pracy maszyny, w jakich układ musi realizować swoje zadania. Dla pracy w wysokich lub niskich temperaturach zamiast wody będą wykorzystane oleje mineralne lub mieszanki alkoholi (np. glikol). Powoduje to modyfikacje poszczególnych elementów hydraulicznych w taki sposób, aby były one odporne na korozję oraz inne czynniki mogące doprowadzić do ich uszkodzenia.

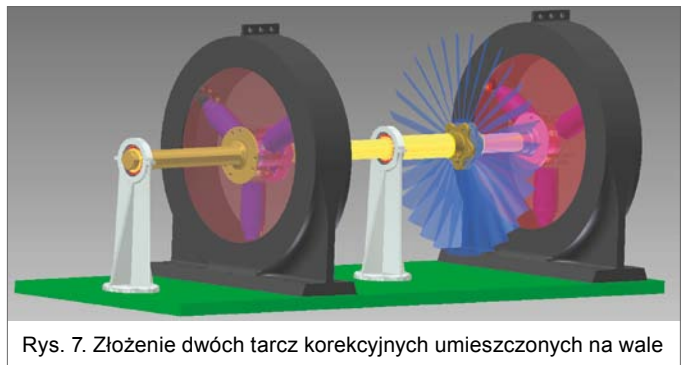
Z punktu widzenia konstrukcji również istotny jest taki dobór wielkości i masy poszczególnych elementów, aby nie stanowiły one znacznego obciążenia dla wału wirnika. Dodatkowo właściwy dobór hydroakumulatora pozwala na określenie maksymalnego niewyważenia, jakie układ jest w stanie zniwelować. Pojemność dobranego hydroakumulatora przekłada się na zgromadzoną w nim objętość płynu, który pełni rolę masy korekcyjnej.

Projekt tarczy korekcyjnej przedstawiony jest na następnym rysunku (rys. 6).

Tarcza zbudowana jest z trzech kanałów korekcyjnych, w których znajdują się hydroakumulatory oraz zawory. Kanały korekcyjne są połączone ze złączem obrotowym, które ma za zadanie transportować płyn z zewnętrznej stacji hydraulicznej do poszczególnych hydroakumulatorów. Otwarcie zaworu wlotowego powoduje wypełnienie akumulatora hydraulicznego płynem do wskazanego poziomu, natomiast nadmiar zgromadzonego płynu jest wyrzucany poza tarczę poprzez zawór wylotowy. Wypuszczony w ten sposób płyn jest zatrzymywany przez zewnętrzną pokrywę, która za pomocą przewodów hydraulicznych przekierowuje płyn do zbiornika. Przy wykorzystaniu dodatkowych połączeń hydraulicznych można łączyć



Rys. 6. Schemat przykładowego rozłożenia elementów hydraulicznych na tarczy korekcyjnej



Rys. 7. Złożenie dwóch tarcz korekcyjnych umieszczonych na wale

ze sobą kilka tarcz korekcyjnych, co może pozwolić na wyważanie w wielu płaszczyznach.

Przykład takiego układu przedstawiony jest na kolejnym rysunku (rys. 7).

## 6. Wnioski

Rozwój inteligentnych budynków stawia sobie za cel zwiększenie bezpieczeństwa, wydajności i ich funkcjonalności na potrzeby danego przemysłu. W ten nurt wpisuje się zastosowanie zaawansowanych systemów wentylacyjno-odciągowych, które dzięki automatycznemu sterowaniu mogą znacznie usprawnić istniejący park maszynowy wykorzystujący wentylatory. Istniejące problemy eksploatacyjne wentylatorów wykorzystywanych zarówno do wentylacji jak i transporcie pneumatycznym, skłaniają do wdrażania zaawansowanych rozwiązań ograniczających ryzyko pojawiających się uszkodzeń. Pomimo, że badania nad dynamiką wirników trwają już od wielu lat, to nadal można je usprawniać. Poszukiwanie innowacyjnych materiałów, czy też wysokowydajnych elementów hydraulicznych, przy jednoczesnym zmniejszeniu ich gabarytów i masy powoduje, że w maszynach wirnikowych pojawia się możliwość zastosowania dodatkowych komponentów służących do detekcji i korekcyjności masy niewyważającej. Użycie w powyższych urządzeniach systemu wyważającego, może zredukować ilości

przerw technologicznych związanych z ich serwisowaniem, a to przynosi konkretne korzyści dla przedsiębiorstwa (ciągłość produkcji, zmniejszenie liczby awarii, oszczędności wynikające ze zwiększenia żywotności poszczególnych maszyn).

Ponadto opracowywane rozwiązanie może mieć także wiele innych zastosowań poza sferą tzw. inteligentnego budownictwa, m.in.: w obrotowych maszynach do obróbki i ściernicach. Występujący w tarczach ściernych materiał ma charakter niejednorodny. Wirowanie takiego narzędzia skutkuje dodatkowymi drganiami spowodowanymi przez siły odśrodkowe wynikające z niewyważenia. Wykorzystanie układu do automatycznego wyważania spowoduje zwiększenie jakości realizowanego procesu technologicznego.

Przedstawione badania koncentrują się na opracowaniu metody automatycznego wyważania umożliwiającej stabilne działanie urządzeń, które stale są narażone na czynniki wywołujące zmienne niewyważenie. Otrzymane wyniki z obliczeń analitycznych i symulacji potwierdzają możliwości opracowania tego urządzenia i przeprowadzenia docelowo testów eksperymentalnych.

### Literatura

- [1] MIKULIK J.: *Wybrane zagadnienia zapewnienia bezpieczeństwa i komfortu w budynkach*, AGH, Kraków 2008.
- [2] FRANK P.M.: *Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledgebased redundancy – a survey and some new results*, „Automatica” 26/1990.
- [3] WALCZYK Z., KICIŃSKI J.: *Dynamika turbozespołów energetycznych: wybrane zagadnienia drgań prostych i sprzężonych*, Wyd. PG, Gdańsk 2001.
- [4] FELIS J., JAWOROWSKI H., CIEŚLIK J.: *Teoria maszyn i mechanizmów. Cz.1: Analiza mechanizmów*, Wyd. Katedry Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH, Kraków 2008.
- [5] SHIYU ZHOU, JIANJUN SHI: *Active Balancing and Vibration Control of Rotating Machinery: A Survey*, The Shock and Vibration Digest / September 2001.
- [6] UHL T., MAŃKA M.: *Mechatronic design of fault detection isolation and restoration systems for rotating machineries*, „Mechanism and Machine Theory” 44/2009.
- [7] RUMIN R., CIEŚLIK J.: *System for automatic rotor balancing using a continuous change of the correction mass distribution*, „Vibrations in Physical Systems” 24/2010.
- [8] NELSON F.C.: *A Brief History of Early Rotor Dynamics*, Tufts University, Medford, Massachusetts; Sound Vib 37, The H.W. Wilson Company, 2003.
- [9] UHL T., BARSZCZ T., BEDNARZ J.: *Model Based SHM – Rotating Machinery Application*, „Key Engineering Materials” 293–294/2005.
- [10] Źródło (strony internetowe): [www.lord.com](http://www.lord.com), oraz [http://www.holanengineering.com/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/Lord\\_Fan\\_Balancer\\_Presentation.pdf](http://www.holanengineering.com/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/Lord_Fan_Balancer_Presentation.pdf), 2011.

Rafał Rumin, Jerzy Mikulik – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

artykuł recenzowany