ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985
Seria: Energetyka z. 91 Nr kol. 856

Henryk JADAMUS

Zakład Cieplny
ZPBE "ENERGOPOMIAR" Gliwice

OCENA KONSTRUKCJI WENTYLATORÓW INSTALOWANYCH NA WIBROIZOLATORACH PRODUKCJI KRAJOWEJ NA PODSTAWIE BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH "ENERGOPOMIAR"

Streszczenie: W pracy przedstawiono typowe niedomagania wentylatorów przemysłowych instalowanych na elementach konstrukcyjnych budynku za pomocą wibroizolatorów produkcji krajowej. Podano przyczyny tych niedomagań, zalecenia konstrukcyjne wynikające z wykonanych pomiarów drgań oraz rezultaty przeprowadzonej modernizacji.

1. Wstęp

Drgania mechaniczne wentylatora, wywołane niewyrównoważeniem elementów układu wirującego oraz pulsacją ciśnienia czynnika roboczego wewnątrz korpusu, oddziałują niekorzystnie zarówno na części samego wentylatora jak i na fundamenty oraz sąsiednie maszyny i urządzenia /np. aparatura kontrolno-pomiarowa, konstrukcja budynku itp./. Parametry tych drgań zależą od siły pobudzającej oraz od masy i sztywności elementów wentylatora i podłoża.

W przypadku dużych wentylatorów kotłowych i kopalnianych, sztywno utwierdzonych na niezależnych masywnych fundamentach i połączonych elastycznie z przewodami sieci wentylacyjnej, działania mające na celu obniżenie drgań wzrastających zwykle podczas eksploatacji, podejmowane są z reguły w celu ochrony elementów samego wentylatora przed zniszczeniem lub dla zwiększenia ich trwałości. Zmniejszenie poziomu drgań na drodze wyrównoważenia wirnika w łożyskach własnych w miejscu zainstalowania wentylatora nie przedstawia tu większych trudności. Potrzebna jest tylko odpowiednia aparatura pomiarowa do pomiarów amplitudy przemieszczenia i kąta przesunięcia fazowego pomiędzy siłą wzbudzającą i przemieszczeniem.

Układy wentylacji przemysłowej i niektóre średniej wielkości wentylatory kotłowe wymagają często instalowania ich na elementach konstrukcyjnych budynków. W celu zmniejszenia lub uniemożliwienia przekazywania drgań tych wentylatorów na konstrukcję budynku stosuje się materiały i ustroje wibroizolacyjne, czyli podkładki z materiałów sprężystych, amortyzatory drgań wykonane z materiałów sprężystych lub sprężyn stalowych albo układy mieszane, np. sprężynowo-gumowe. Praktyka dowodzi, że stosowanie wyłącznie wibroizolacji w tych układach jest niewystarczające dla skutecznego zmniejszenia drgań. Równolegle ze stosowaniem wibroizolacji należy w tych wentylatorach położyć nacisk na metody obniżenia poziomu

drgań poprzez zmniejszenie sił wzbudzających uzyskiwane na drodze zmian konstrukcyjnych i technologicznych polegających na zmniejszaniu mimośrodu środka masy układu wirującego zapewnieniu większej sztywności wału, łożysk i podstaw łożyskowych oraz zwiększaniu jakości wykonania elementów, szczególnie układu wirującego, wału i łożysk.

W ostatnim czasie w kilku nowych obiektach wystąpiły poważne trudności eksploatacyjne w pracy wentylatorów w układach wentylacyjnych. Na skutek nadmiernych drgań wentylatorów nasiliły się awarie łożysk tocznych tych maszyn a nawet stwierdzono po krótkotrwałej eksploatacji zarysowania stropów w budynku, w pomieszczeniach pod wentylatorami. Ponieważ doraźne działania inwestora i użytkownika obiektu nie przyniosły poprawy, "Energopomiar" wykonał szereg diagnostycznych pomiarów drgań wszystkich sprawnych do pracy wentylatorów na tych obiektach, a następnie pełnił nadzór montażowy przy wprowadzaniu zmian konstrukcyjnych i kontroli uzyskanych efektów. Ponieważ podobne problemy występują na wielu obiektach można zauważyć, że jakkolwiek wibroizolacja maszyn wirujących od strony teoretycznej jest dobrze rozpoznana i opisana w literaturze technicznej [1,2] to w praktyce popełniane są często podstawowe błędy projektowe i montażowe powodujące pogorszoną pracę wentylatorów.

2. Ogólne podstawy wibroizolacji wentylatorów

W zależności od celu jaki ma spełnić rozróżnia się wibroizolację przemieszczeniową oraz wibroizolację siłową. W wibroizolacji przemieszczeniowej chodzi o oddzielenie człowieka lub urządzenia wrażliwego na drgania od drgającego podłoża. Polega ona na takim podparciu fundamentu aby środek masy zespołu maszyna + fundament nie zmieniał w czasie pracy swojego położenia. W technice wentylatorowej częściej stosowana jest wibroizolacja siłowa, polegająca na zmniejszeniu oddziaływania sił dynamicznych wentylatora na podłoże. Skuteczność działania wibroizolacji siłowej może być oceniana wielkością stosunku siły działającej na podłoże do siły dynamicznej, wymuszającej drgania. Przyjmując pewne uproszczenia można układ drgający na wibroizolatorach zastąpić prostym modelem fizycznym, przedstawionym na rys. 1.
Równanie drgań tego układu można zapisać w postaci:

$$m \cdot \ddot{x} + 2 \cdot h \cdot \dot{x} + k \cdot x = P_d \cdot \sin \omega t$$

gdzie oznaczają:

m - masa układu,
x - przemieszczenie środka masy,
h - współczynnik tłumienia,
k - współczynnik sprężystości,
P_d - amplituda siły dynamicznej maszyny,
$\dot{x}$ - prędkość środka masy,
$\ddot{x}$ - przyspieszenie środka masy,
ω - częstość siły wymuszającej,

Siła działająca na podłoże jest równa sile sprężystej i sile przeniesionej przez tłumik, czyli:

$$P_p = k \cdot x + 2 \cdot h \cdot \dot{x}$$

W przypadku drgań harmonicznych rozwiązanie równania drgań ma postać:

$$x = a \cdot \sin /\omega t - \gamma/$$

wobec tego:

Siła $P_p = a\left[k \cdot \sin /\omega t - \gamma/ + 2 \cdot h \cos /\omega t - \gamma/\right]$

Po przekształceniach i wprowadzeniu pojęcia częstości drgań własnych układu, określonej jako

$$\omega_o = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

wzór powyższy przyjmuje postać:

$$P_p = \frac{P_d\sqrt{1 + 4\frac{h^2}{m^2} \cdot \frac{\omega^2}{\omega_o^2}}}{\sqrt{/1 - \frac{\omega^2}{\omega_o^2}/ + 4\frac{h^2}{m^2}\frac{\omega^2}{\omega_o^2}}}$$

Przebieg funkcji $\frac{P_p}{P_d}$ przedstawiony na rys. 2 wskazuje, że:

a/ siła działająca na podłoże jest mniejsza od siły wymuszającej drgania gdy $\frac{\omega}{\omega_o} > \sqrt{2}$,

b/ w obszarze bliskim rezonansu, tj. dla $\frac{\omega}{\omega_o} = 0{,}6 \div 1{,}4$ następuje zwielokrotnienie siły oddziaływania na fundament,

c/ w obszarze podrezonansowym, tj. gdy $\frac{\omega}{\omega_o} < 0{,}6$ oddziaływanie na fundament jest mniejsze, jednak nigdy nie osiąga wartości mniejszej od siły wzbudzającej,

d/ zmniejszenie siły oddziaływania na podłoże może nastąpić wyłącznie w obszarze pozarezonansowym począwszy od wartości $\frac{\omega}{\omega_o} \geqslant 1{,}4$. Zmniejszenie to może osiągać duże wartości, np. przy $\frac{\omega}{\omega_o} = 5$ i niewielkim tłumieniu drgań może wynosić nawet 96 %. W tym przypadku siła działająca na fundament wynosi tylko 4 % siły wzbudzającej drgania maszyny.

e/tłumienie drgań w układzie powoduje wzrost siły oddziaływania na podłoże.

Swobodnie drgająca sztywna bryła oparta na wibroizolatorach w ogólnym przypadku poddania działaniu zmiennych sił i momentów we wszystkich trzech kierunkach posiada sześć stopni swobody, wskutek czego możliwe jest występowanie sześciu form drgań o sześciu różnych częstościach własnych. Forma tych drgań zależy od stopnia symetrii układu wibroizolatorów względem środka masy bryły. Całkowita symetria układu powoduje, że występują wyłącznie proste formy drgań, co znacznie upraszcza obliczenia

dynamiczne wibroizolatorów a tym samym zwiększa pewność ich działania. W przypadku wentylatorów promieniowych napędzanych silnikiem poprzez przekładnię paskowo-klinową uzyskanie całkowitej symetrii jest niemożliwe. Niezależnie od symetrii w płaszczyźnie poziomej zawsze należy dążyć do przybliżenia płaszczyzny poziomej, przechodzącej przez środki symetrii wibroizolatorów, do środka masy układu. Metody obliczeń częstości drgań własnych układów o różnych przypadkach symetrii oraz dobór wibroizolatorów przedstawione są wyczerpująco w literaturze technicznej, np. w pracach [1], [2].

Jako podstawowe zasady doboru wibroizolatorów do wentylatorów instalowanych na elementach konstrukcyjnych budynków można wymienić następujące zalecenia:

a/ aby uzyskać duże zmniejszenie siły dynamicznej działającej na podłoże lub chronione elementy konstrukcyjne budynku należy stosować wibroizolatory obniżające częstość drgań własnych układu do wartości 4-5 krotnie niższej od częstości roboczej wentylatora,

b/ dla uniknięcia drgań złożonych należy stosować symetrię w rozkładzie wibroizolatorów,

c/ mniejsza liczba wibroizolatorów ułatwia uzyskanie równomierności obciążenia we wszystkich punktach podparcia,

d/ dla zmniejszenia amplitud drgań należy stosować płyty lub ramy fundamentowe o masie 4-5 krotnie większej od masy wirnika z wałem wentylatora,

e/ obliczeniowa częstość drgań własnych wału wentylatora powinna być 2-krotnie większa od roboczej częstości siły wymuszającej,

f/ dla uniknięcia rezonansu przejściowego w pobliżu częstości roboczej należy stosować sztywne płyty lub podstawy łożyskowe wentylatora.

3. Zakres i wyniki wykonanych pomiarów drgań wentylatorów

Z literatury [3] wiadomo, że nieodpowiednio zaprojektowana lub wadliwie wykonana wibroizolacja może być powodem pogorszonej pracy wentylatora. Dlatego też przed rozpoczęciem eksploatacji konieczna jest kontrola zgodności wykonania i montażu wszystkich elementów instalacji z obliczeniami i dokumentacją techniczną, która powinna zawierać wszystkie parametry podlegające kontroli. Przy ocenie działania wibroizolacji konieczna jest również znajomość wyników prób fabrycznych zarówno wentylatora jak i zastosowanych wibroizolatorów. Ocena skuteczności działania wibroizolacji powinna się sprowadzać do porównania wyników pomiarów z założeniami projektowymi. Najczęściej projekty instalacji wentylacyjnych, przekazywane inwestorowi do realizacji, nie zawierają obliczeń a w dokumentacji technicznej nie jest określony zakres prób i wymagań w odniesieniu do wibroizolacji. Próby fabryczne wentylatorów przeprowadzane są na stanowiskach doświadczalnych w warunkach znacznie odbiegających od warunków pracy. Podkładki elastyczne i ustroje wibroizolacyjne dostarczane są na budowę z reguły bez atestów określa-

jących ich parametry. W tej sytuacji przy rozruchu instalacji można kierować się wyłącznie ogólnymi wytycznymi i normami z zakresu drgań mechanicznych. Podstawowymi parametrami w wibroizolacji są amplituda przemieszczenia czasem amplituda prędkości i częstotliwość drgań [3]. Siły dynamiczne chociaż bardzo istotne nie są określane ze względu na trudności pomiarowe.

Przedmiotem pomiarów wykonanych dla oceny skuteczności wibroizolacji były wentylatory promieniowe jedno- i dwustrumieniowe typu FK i WWOax o średnicy ssania od 500 do 1000 mm z napędem paskowo-klinowym o prędkości obrotowej wirnika w granicach od 850 min^{-1} do około 1400 min^{-1} w typowym, seryjnym wykonaniu. Każdy z badanych wentylatorów spoczywał na lekkiej płycie betonowej lub ramie ustawionej na stropie budynku za pomocą wibroizolatorów sprężynowych lub gumowych. Przed rozpoczęciem pomiarów drgań przeprowadzono jedynie kontrolę jakości montażu wentylatorów, zwracając szczególną uwagę na pewność połączeń śrubowych w układzie wirującym, ułożyskowaniu i ramie fundamentowej. Ze względu na brak dostępu do wibroizolatorów przyjęto oświadczenie inwestora o poprawności ich montażu.

Pomiary drgań [4] obejmowały:

- wyznaczenie amplitud przemieszczenia w charakterystycznych punktach wentylatora i układu fundamentu,
- pomiar częstotliwości drgań składowych,
- próba zmniejszenia drgań poprzez wyrównoważanie wirnika w łożyskach własnych w miejscu zainstalowania wentylatora,
- wyznaczenie częstości drgań własnych układu za pomocą pobudzania układu do drgań wzbudnikiem zasilanym generatorem częstotliwości.

Przeprowadzone pomiary wykazały, że :

- drgania wentylatorów mają charakter pulsacyjny /dudnienie/ o amplitudzie przemieszczenia zmieniającej się w czasie w szerokich granicach, bo np. od 20 μm do 100 μm,
- szczytowe wartości amplitud przemieszczenia w płaszczyźnie prostopadłej do osi wału przekraczają wartości dopuszczalne a drgania osiowe są dwu, a nawet trzykrotnie wyższe od drgań poprzecznych,
- występują zmiany kąta fazowego pomiędzy siłą wymuszającą drgania i przemieszczeniem,
- podstawy łożyskowe posiadają niewielką zdolność tłumienia drgań,
- pomimo zastosowanych amortyzatorów drgania wentylatorów przenoszą się na strop. Maksymalna amplituda przemieszczenia w kierunku pionowym, mierzona w pobliżu wibroizolatorów wynosiła około 6 μm do 10 μm,
- oprócz drgań fundamentów występowały silne drgania korpusu i przewodów powietrznych, nie pochodzące od niewyrównoważenia mas wirnika.

Uzyskane wyniki wskazywały na nieprzydatność w tych warunkach stroboskopowej metody wyrównoważania wirnika.

Analiza częstotliwościowa amplitud przemieszczenia drgań wału wentylatora wykazała, że dominującymi składowymi, mającymi wpływ na drgania

sumaryczne były drgania o częstotliwościach 7,1 Hz; 14,4 Hz; 21,8 Hz ; 28,8 Hz oraz 43,6 Hz. Częstotliwość siły wymuszającej pochodzącej od niewyrównoważenia wirnika wynosiła 14,6 Hz, a od silnika napędowego 24,1 Hz. Analiza częstotliwościowa amplitud prędkości drgań obudów łożysk wykazała natomiast, że dominujące składowe mające istotny wpływ na wypadkową prędkość drgań posiadają częstotliwość powyżej 100 Hz. Składowych tych nie zaobserwowano ani w widmie drgań wału, ani w widmie drgań płyty fundamentowej. Wystąpiły one natomiast w charakterystyce drgań własnych podstawy łożyskowej. Szczytowe wartości amplitud prędkości drgań obudów łożysk wynosiły 30 mm/s dla drgań poprzecznych oraz ponad 46 mm/s dla drgań w kierunku osi wentylatora, czyli przewyższały aż pięciokrotnie wartości dopuszczalne. Wysokie wartości amplitudy prędkości drgań tłumaczą dużą awaryjność łożysk tocznych tych wentylatorów.

4. Zakres proponowanych i wprowadzonych zmian oraz uzyskane wyniki

Wykonane pomiary drgań wykazały, że nieprawidłowa praca wentylatorów jest wynikiem nieodpowiedniej, dla przyjętego sposobu posadowienia, konstrukcji elementów wentylatora oraz niedomagań układu wibroizolacji. Duże wartości szczytowych amplitud prędkości drgań o częstotliwości zgodnej z jedną ze składowych częstotliwości drgań własnych podstawy łożyskowej wskazują na występowanie rezonansu mechanicznego podstawy. Zjawisko dudnienia, polegające na sumowaniu dwóch drgań harmonicznych o zbliżonych częstotliwościach może być wywołane niewłaściwym doborem lub nieodpowiednią regulacją poszczególnych wibroizolatorów. Dudnienie występowało wyraźnie we wszystkich układach z wibroizolatorami gumowymi, co mogłoby świadczyć o małej różnicy częstości drgań własnych wibroizolatorów tego typu i częstości siły wymuszającej. Drgania osiowe o bardzo wysokiej amplitudzie przemieszczenia i prędkości są wywołane niedomaganiami układu wibroizolacji. Może to być nie uwzględnienie w obliczeniach działania w wentylatorze okresowo zmiennej siły osiowej, zbyt duża odległość środka masy układu od płaszczyzny poziomej, przechodzącej przez środki symetrii wibroizolatorów lub nierówne obciążenie poszczególnych wibroizolatorów.

W zależności od układu belek nośnych budynku pod wentylatorami występowały w badanym obiekcie układy z pięcioma lub sześcioma punktami podparcia płyty fundamentowej wentylatora. Rozmieszczenie tych punktów względem wentylatora i silnika napędowego pokazano na rys.3.
Dla poprawienia pracy wentylatorów zaproponowano zmiany konstrukcyjne zarówno wentylatorów jak i wibroizolatorów. Zmiany wentylatorów obejmowały:

- wzmocnienie podstaw łożyskowych,
- wzmocnienie korpusu łożysk /wykonanie jednego wspólnego korpusu dla obydwu łożysk,
- oddzielenie podstawy łożyskowej od obudowy wentylatora.

W zakresie układu wibroizolatorów zaproponowano następujące zmiany:
- zastąpienie wibroizolatorów gumowych sprężynowymi,
- uproszczenie konstrukcji wibroizolatorów sprężynowych przez usunięcie osłony zewnętrznej sprężyn,
- zmniejszenie liczby miejsc podparcia fundamentu z 6 na 4.

Przed wprowadzeniem pracochłonnych zmian konstrukcyjnych wentylatora w pierwszym etapie modernizacji wykonano następujące prace:
- rekonstrukcja wibroizolatorów sprężynowych,
- kontrola rozkładu obciążeń na poszczególne punkty podparcia fundamentu poprzez pomiar ugięcia sprężyny,
- wypoziomowanie fundamentu,
- kontrola i wymiana łożysk wentylatora,
- kontrola naciągu pasków przekładni paskowo-klinowej.

W wyniku ww. działań uzyskano spadek drgań oraz stan dynamiczny wentylatorów umożliwiający dalsze obniżenie drgań na drodze wyrównoważania wirnika w łożyskach własnych. Po dokonaniu korekty rozkładu mas wirnika masą korekcyjną stanowiącą zaledwie 0,01 % masy wirnika amplitudy drgań łożysk wentylatorów spadły do wartości mniejszych od dopuszczalnych zaś drgania stropu były 10-krotnie niższe od drgań przed modernizacją i wynosiły w miejscach podparcia fundamentu 0,5 - 1,0 μm, co jest wartością gwarantującą bezpieczeństwo elementów konstrukcyjnych budynku.

5. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski:

a/ Wentylator posadowiony na wibroizolatorach powinien posiadać wał i podstawy łożysk o większej sztywności niż wentylator typowy. Obliczeniowy zapas obrotów roboczych wału do rezonansu powinien być większy od 2; nie powinien to być wentylator typowy, ogólnego przeznaczenia.

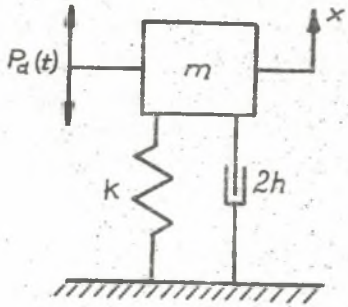
b/ Wentylator powinien być zamocowany do płyty fundamentowej o znacznej masie.

c/ Wibroizolatory powinny być rozmieszczone symetrycznie. Mniejsza liczba wibroizolatorów gwarantuje większą równomierność ich obciążenia.

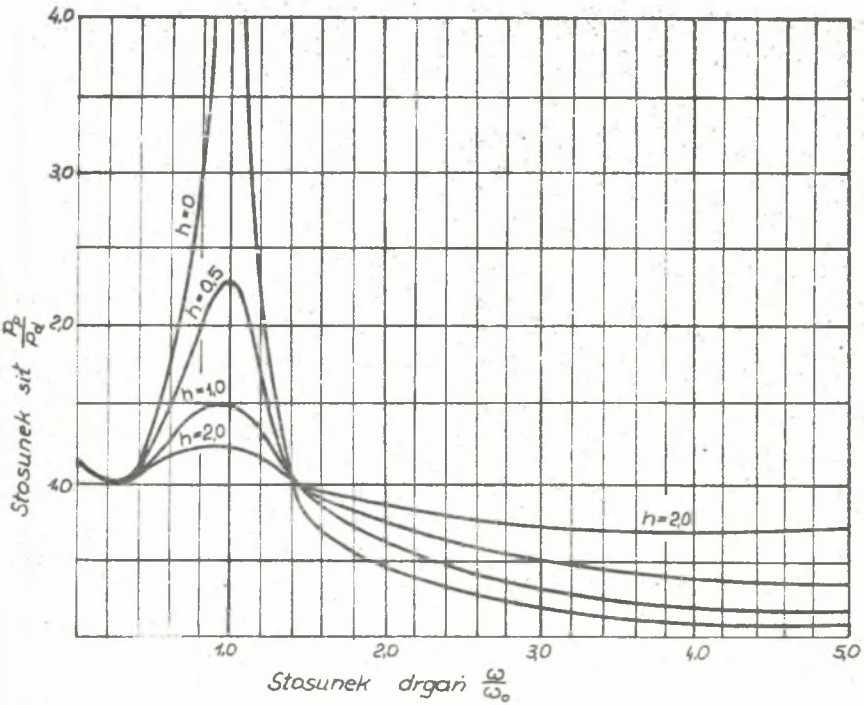
d/ Dla niskich prędkości obrotowych należy stosować wyłącznie wibroizolatory sprężynowe ze względu na ich niską częstość drgań własnych.

e/ W połączeniach wibroizolatora z podłożem oraz płytą lub ramą fundamentową wentylatora nie może wystąpić luz.

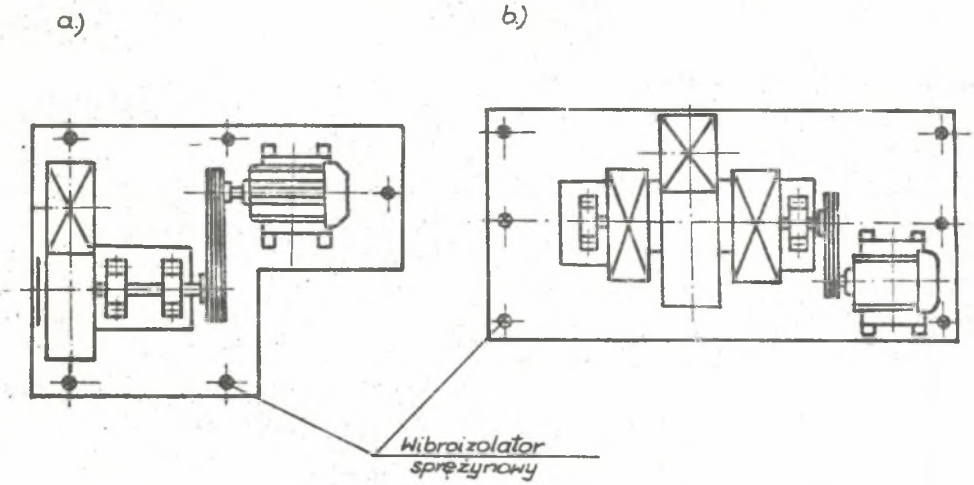
f/ Elementy wibroizolatora nie mogą stykać się ze sobą w żadnym położeniu /przenoszenie drgań mechanicznych przez materiał/.



Rys. 1. Model fizyczny drgającego wentylatora



Rys. 2. Przebieg funkcji $\frac{P_p}{P_d} = f(\frac{\omega}{\omega_0})$



Rys. 3. Rozmieszczenie punktów podparcia fundamentu
a) niesymetryczne, b) symetryczne

Literatura

[1] Goliński J. Wibroizolacja maszyn i urządzeń. WNT, Warszawa 1979 r.

[2] Lipiński J. Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny. Arkady, Warszawa 1969 r.

[3] Sadowski J. Akustyka w urbanistyce architekturze i budownictwie. Arkady, Warszawa 1971 r.

[4] Jadamus H., Malara W. Sprawozdanie z pomiarów drgań wentylatorów instalacji wentylacyjnej i klimatyzacyjnej ZPBE "Energopomiar", Gliwice 1981 r.

[5] Jadamus H. Ekspertyza dot. wentylatorów wyciągowych w wydziale Karbidowni Z.A. w Chorzowie. ZPBE "Energopomiar", Gliwice 1984 r.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Gerard Kosman

Wpłynęło do redakcji maj 1985 r.

ОЦЕНКА КОНСТРУКЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ ОБОРУДОВАНЫХ НА ВИБРОИЗОЛЯТОРАХ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Р е з ю м е

В работе представлено главные недочёты промышленных вентиляторов оборудованных на виброизоляторах странного производства, заявлено предложения конструктивных перемен так вентиляторов как и систему виброизоляции вытекающих из исполненых исследовании, а также результаты получения по еих реализации.

THE OPINION INDUSTRIAL VENTILATORS CONSTRUCTION WHICH ARE INSTALL ON THE VIBROINSULATORS ON PRINCIPLE "ENERGOPOMIAR" TESTS

S u m m a r y

In the work it was described defects industrial ventilators which are install on country vibroinsulators. It was given recommendatione constructions changes ventilators and vibroisolation system resulting from measurements and results obtained after their introduction.