

# Analiza skuteczności rozwiązań obniżających poziom drgań młynów węglowych w elektrowni – studium przypadku



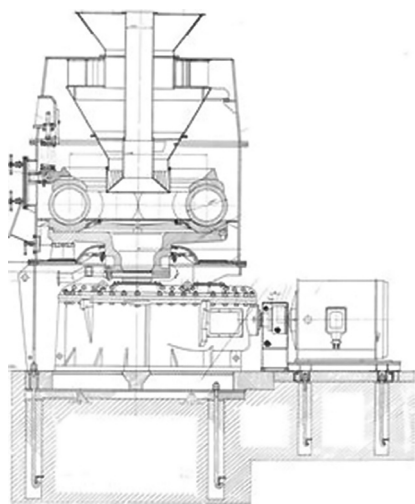
dr inż.  
**KRZYSZTOF KOZIOŁ**  
 Politechnika Krakowska,  
 Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów  
**ORCID: 0000-0002-5402-6252**



prof. dr hab. inż.  
**KRZYSZTOF STYPUŁA**  
 Politechnika Krakowska,  
 Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów  
**ORCID: 0000-0001-8679-526X**

Rozważając przypadek elektrowni, w której stwierdzono znaczący wzrost przemieszczeń fundamentów budynku głównego jednego z bloków energetycznych, przeanalizowano sposób rozwiązywania tego typu zagadnień. Problem dotyczył zarówno osiadań statycznych, jak i dynamicznych.

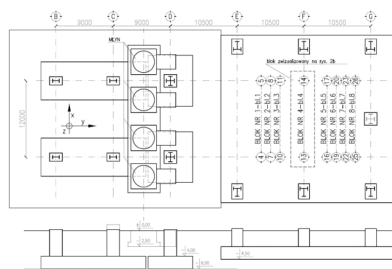
Jednym z problemów, z jakimi można spotkać się w elektrowniach, są nadmierne drgania wywołane pracą niektórych urządzeń. Ich wpływ na konstrukcję elementów obiektu, urządzenia czy na komfort pracy operatorów [1] niejednokrotnie może okazać się negatywny. Technologia pracy i konstrukcja urządzeń, które są przyczyną drgań, niejednokrotnie nastręczają trudności w ich modelowaniu. Pomocne w takich sytuacjach jest wykonanie pomiarów drgań. W opracowaniu przedstawiono problem redukcji drgań spowodowanych pracą młynów węglowych w różnych stadiach (kruszenie węgla – KW lub mieszanie węgla z biomasą – MKW) – rys. 1.



Rys. 1. Przekrój przez młyn węglowy

## Pomiary drgań

Wizja lokalna na terenie elektrowni pozwoliła ustalić miejsca lokalizacji punktów pomiarowych: fundament młynów (pomiar drgań stanowiących wymuszenie) [3, 4] oraz fundamenty głównych dźwigarów hali i punkty zlokalizowane na posadzce. Wyniki pomiarów dla młynów zlokalizowanych w osiach C-D/13-14 (rys. 2a) oznaczonych jako bl.4 pracujących w trybie z biomasą przedstawione na rys. 3a, 3b wykazały, że zarówno wielkości amplitud, jak i ich widmo częstotliwościowe, mogą być przyczyną lokalnych rezonansów w ośrodku gruntowym stanowiącym oparcie dla fundamentów hali i młynów węglowych. Taki stan prowadzi do zagęszczania gruntu oraz powiększania się zasięgu oddziaływań dynamicznych. Dodatkowym niekorzystnym czynnikiem wpływającym na zwiększenie zasięgu generowanych drgań była obecność wody w gruncie.



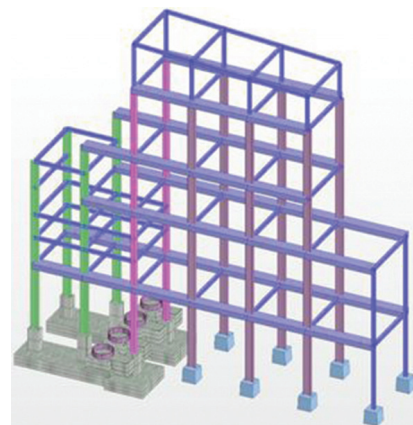
Rys. 2a. Plan rozmieszczenia młynów węglowych w obiekcie

Jak wykazała analiza zarejestrowanych przyspieszeń różnych młynów węglowych, ich amplituda jest silnie związana nie tylko ze stopniem wypełnienia młyna, ale również z samym młynem (ewentualnym jego zużyciem) – rys. 4.

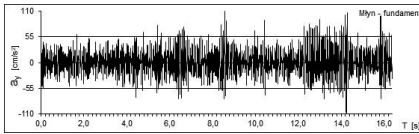
Stosunek ekstremalnych przyspieszeń fundamentów młynów węglowych, w przypadku gdy są obciążone biomasą, dla kierunku pionowego jest większy niż 2, zaś dla kierunku poziomego wynosi ponad 4. Jak wynikało z pomiarów, gorszą sytuacją jest praca młynów nieobciążonych.

## Analizy numeryczne

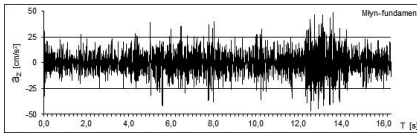
Na potrzeby analizy możliwych rozwiązań zbudowano model obliczeniowy [5] fragmentu obiektu – rys. 2b (jednego bloku młynów węglowych wraz z fragmentem otaczającej hali oznaczonego jako bl.4 na rys. 2a), który poddano weryfikacji numerycznej przez porówna-



Rys. 2b  
 Fragment modelu obliczeniowego – blok bl.4



Rys. 3a Przebieg czasowy przyspieszeń drgań fundamentu młyna – kierunek poziomy



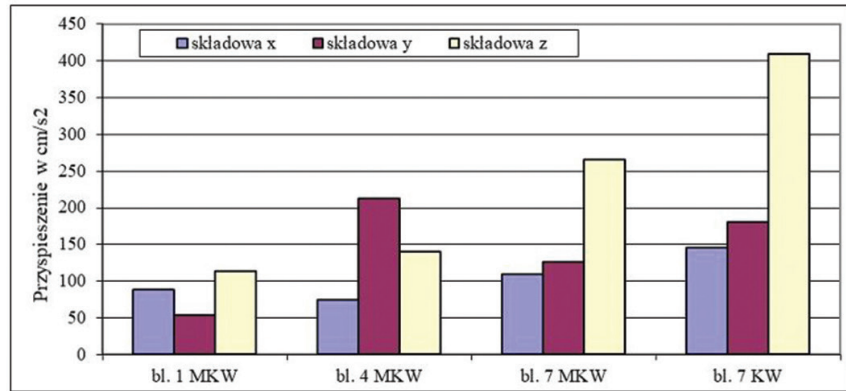
Rys. 3b Przebieg czasowy przyspieszeń drgań fundamentu młyna – kierunek pionowy

nie wyników obliczeń analitycznych (przy wykorzystaniu systemu MS Diana 9.4) z wartościami uzyskanymi bezpośrednio z pomiarów drgań. Walidację modelu MES ukończono, gdy rozbieżność pomiędzy charakterystykami dynamicznymi w stosunku do modelu rzeczywistego wyniosła 6%, zaś stosunek pomierzonych amplitud drgań posadzki i fundamentów słupów konstrukcji nośnej hali, w stosunku do ich numerycznych odpowiedników, był mniejszy niż 15% w wielkościach amplitud przyspieszeń liczonych jako wartości średniokwadratowe w pasmach tercjowych (1/3 oktaowych) z zakresu częstotliwości od 0,5 do 100 Hz.

Wykonano symulacje numeryczne [4] dla zaproponowanych wariantów rozwiązania problemu:

**Wariant I** – ułożenie pod fundamentem każdego młyna mat wibroizolacyjnych *calenberg ciries*, a na bokach fundamentu – *mat calenberg cibatur*, przy zachowaniu dotychczasowych gabarytów fundamentów młynów (rozwiązanie to wymaga rozbiórki młynów).

**Wariant II** – ułożenie pod fundamentem każdego młyna mat wibroizolacyjnych SEDRAPUR ELM 850 grubości 50 mm (2 x 25 mm), a na bokach fundamentu tych sa-



Rys. 4. Amplitudy przyspieszeń młynów

Tabela 1. Skuteczność proponowanego wariantu rozwiązania w stosunku do stanu dotychczasowego w przypadku drgań fundamentów słupów (wartości globalne w całym paśmie częstotliwości)

Składowa	Słupy w osi C			Słupy w osi D		
	WARIANT I	WARIANT II	WARIANT III	WARIANT I	WARIANT II	WARIANT III
x	86%	84%	86%	81%	89%	90%
y	76%	83%	83%	83%	90%	90%
z	52%	78%	79%	72%	86%	86%

mym mat o grubości 25 mm, przy zachowaniu dotychczasowych gabarytów fundamentów młynów (rozwiązanie to wymaga rozbiórki młynów).

**Wariant III** – dokonanie iniekcji gruntu poniżej poziomu posadowienia fundamentów słupów do głębokości 10 m (od -6,0 do -10 m), przy czym założono, że wynikiem iniekcji będzie uzyskanie podłoża o parametrach odpowiadających parametrom betonu B15. Dodatkowo w celu ograniczenia drgań posadzki założono jej odcięcie (na całej grubości posadzki wraz z jej podbudową, tj. na głębokość ok. 50 cm) obwodowo wokół fundamentów mly-

nów (grubość przecięcia 20 mm), wypełniając pustkę materiałem *edilon corkelast 2000*.

Zaproponowane warianty obliczeniowe zostały poddane obciążeniom odpowiadającym możliwym sytuacjom ich pracy (konstrukcja obciążona i nieobciążona). Rozważano też możliwe zużycia techniczne młynów, których efekty zarejestrowano podczas pomiarów *in situ* w postaci różnic w amplitudach przyspieszeń – rys. 4.

W szacowaniu odpowiedzi dynamicznej konstrukcji wykorzystano analizy tercjowe zarejestrowanych i obliczonych przebiegów czasowych przyspieszeń drgań [2, 3]. Przedsta-

Tabela 2. Ekstremalne wartości przyspieszeń

Punkt badawczy	KIERUNEK X				KIERUNEK Y				KIERUNEK Z			
	WYNIK POMIARÓW	WARIANT I	WARIANT II	WARIANT III	WYNIK POMIARÓW	WARIANT I	WARIANT II	WARIANT III	WYNIK POMIARÓW	WARIANT I	WARIANT II	WARIANT III
	cm/s <sup>2</sup>											
Posadzka	94,0	29,1	23,6	21,9	108,0	87,0	52,3	41,8	133,0	44,1	23,7	23,2
Słupy os D	115,0	21,9	13,1	11,4	113,0	19,6	11,5	11,2	54,0	15,0	7,8	7,3
Słupy os C	109,0	15,4	17,2	15,5	57,0	13,8	9,8	9,9	54,0	26,1	12,0	11,5
Młyny	145,0	195,0	205,7	92,2	212,0	246,2	243,9	92,0	410,0	495,1	448,5	93,3

Tabela 3. Ekstremalne wartości przemieszczeń fundamentów młynów węglowych

X					Y					Z				
stan aktualny	calenberg v100, h100	mata	iniekcja	iniekcja i mata	stan aktualny	calenberg v100, h100	mata	iniekcja	iniekcja i mata	stan aktualny	calenberg v100, h100	mata	iniekcja	iniekcja i mata
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
3,0	3,3	3,1	0,3	0,9	1,5	2,1	1,7	0,3	0,5	3,7	4,0	3,8	0,3	1,0

wione we wnioskach procentowe zmiany poszczególnych składowych przyspieszeń odnoszą się do maksymalnych wartości wybranych z każdego z pasm tercjowych sygnałów.

### Wnioski

W każdym z rozważanych wariantów naprawczych uzyskano zmniejszenie oddziaływań dynamicznych. Przykładowo dla słupów nośnych hali zmiany ekstremalnych wartości przyspieszeń zestawiono w tabeli nr 1.

Porównując rozważane warianty naprawy, okazuje się, że większą pewność uzyskania prognozowanych efektów daje zastosowanie mat wibroizolacyjnych pod fundamentami młynów (warianty I i II), przy czym lepszą skuteczność w zakresie obniżenia poziomu drgań słupów hali uzyskano, rozważając wariant I – por. tabela 1. W przypadku obu tych wariantów należy się jednak liczyć ze wzrostem amplitud drgań samych młynów – tabela 2.

W przypadku wariantu I amplitudy przyspieszeń drgań poziomych fundamentu młyna w kierunku x mogą wzrosnąć o ok. 34% i w kierunku y o ok. 16%, a amplitudy drgań pionowych o ok. 21% w stosunku do dotychczasowych wartości tych amplitud. Przy zastosowaniu wariantu II wzrost ten może natomiast dochodzić odpowiednio do 42%, 15% i 10%.

Obserwując zmiany przemieszczeń (tabela 3.) fundamentów młynów węglowych, można dojść do wniosku, iż najlepszym rozwiązaniem jest wykonanie zagęszczenia gruntu pod fundamentami (np. przez iniekcję). Dzięki temu amplitudy przemieszczeń drgań poziomych zmniejszą się dziesięciokrotnie, zaś pionowych czterokrotnie. Jednakże zastosowanie iniekcji w gruncie (wariant III) może być w praktyce problematyczne.

Należy liczyć się z faktem, że prognozowana w tym wariantcie skuteczność w zakresie ograniczenia drgań fundamentów hali może nie być w pełni osiągnięta z uwagi na trudności wykonawcze związane z możliwością niekontrolowanego rozchodzenia się iniektu w gruncie oraz z koniecznością ochrony przed iniekcją infrastruktury podziemnej (system drenażu, kanały technologiczne).

Zmniejszenie sztywności podparcia fundamentów młynów zwiększa przemieszczenia samych fundamentów i w efekcie dyssypacji energii w materiale (tutaj w macie) ogranicza

w ich pobliżu propagację drgań. Jednakże może przyczynić się to do przekroczenia dopuszczalnych parametrów pracy i do przyspieszonego zużycia młynów czy połączonych z nimi urządzeń.

### Literatura:

- [1] Dyrektywa Rady 92/57/EWG z dnia 24 czerwca 1992 r. w sprawie wdrożenia minimalnych wymagań bezpieczeństwa i ochrony zdrowia na tymczasowych lub ruchomych budowach.
- [2] PN-B-02171:2017-06. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.
- [3] PN-B-02170:2016-12. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłogę na budynki.
- [4] Kozioł K., Measurements of vibrations and computer simulations in the design of vibroinsulation of railroads IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019, doi: 10.1088/1757-899X/603/4/042073 – ISSN 1757-899X.
- [5] Kozioł K. Pomiary in situ jako sposób na prognozę obciążenia dynamicznego budynków JCEEA – 2017, doi: 10.7862/rb.2017.62 – ISSN 2300-8903.

DOI: 10.5604/01.3001.0013.8788

### PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Kozioł Krzysztof, Stypuła Krzysztof, 2020, Analiza skuteczności rozwiązań obniżających poziom drgań młynów węglowych w elektrowni – studium przypadku, „Builder” 04 (273). DOI: 10.5604/01.3001.0013.8788

**Streszczenie:** W referacie, rozważając przypadek elektrowni, w której stwierdzono znaczący wzrost przemieszczeń fundamentów budynku głównego jednego z bloków energetycznych, przedstawiono przykładowy sposób rozwiązywania tego typu zagadnień. Problem dotyczył zarówno osiadań statycznych, jak i dynamicznych. Ze względu na fakt, iż praca urządzeń (młyna węglowego) powoduje ruch trudny do ustalenia metodami analitycznymi, należało wstępnie wykonać pomiary drgań. Dzięki temu uzyskano czasowe przebiegi przyspieszeń drgań fundamentów oraz wybranych punktów konstrukcji. Model obliczeniowy (MES) został poddany zarejestrowanemu na fundamencie wymuszeniu, zaś przebiegi czasowe przyspieszeń drgań uzyskane w warunkach rzeczywistych posłużyły do walidacji jego parametrów (stałych materiałowych konstrukcji oraz gruntu i sztywności połączeń). Po uzyskaniu zadowalającej różnicy pomiędzy przyspieszeniami (model MES – rzeczywista konstrukcja) zasymulowano trzy warianty naprawcze. W dwóch z nich drogę propagacji przecięto barierą antywibracyjną, zaś w jednym zwiększono sztywność gruntu pod fundamentami. Każde z rozważanych

rozwiązań powodowało obniżenie drgań konstrukcji młynów węglowych. Jednak w przypadku „otulenia” fundamentów matą antywibracyjną uzyskano znaczne wzrosty przyspieszeń drgań młynów. Zwrócono też uwagę, iż zwiększenie sztywności gruntu pod fundamentami pomimo ograniczenia poziomu amplitud drgań w całym obiekcie może ze względów technologicznych okazać się kłopotliwe.

**Słowa kluczowe:** dynamika konstrukcji, pomiary drgań

**Abstract:** The paper presents case of selected power plant, where substantial increase of displacements of the foundations of the main power unit were observed and an exemplary method of solving such type of problem. The problem concerned both static settlements as well as vibrations. Since the operation of the equipment (coal mill) causes movement difficult to be determined using analytical methods, initially vibration measurements had to be made. As a result, time courses of foundations as well as selected points onto investigated structure accelerations were obtained. The computational model (FEM) was loaded with excitation registered on the foundation, while acceleration time courses obtained in real conditions were used to validate its parameters (material constants of structure and soil) and joints rigidity. After obtaining a satisfactory difference between accelerations (FEM model – real construction), three repair variants were simulated. In two of them the propagation path was separated with an anti-vibration barrier, while in one the stiffness of the soil below foundation was increased. Each of the mentioned solutions reduced the vibration level of the structure in the vicinity of coal mills. Nevertheless, in the case of "covering" foundations with anti-vibration mat, significant increases in vibration acceleration of mills were observed. It was also pointed out that increasing the soil stiffness below foundations, despite limiting the level of vibration amplitudes in the entire facility, may prove to be troublesome for technological reasons.

**Keywords:** structure dynamics, vibration measurements