

dr inż. Michał Musiał<sup>1)</sup>\*prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński<sup>2)</sup>dr inż. Jacek Groseł<sup>1)</sup>

# Modernizacja żelbetowego, ramowego fundamentu pod turbozespół

## *Modernization of reinforced concrete frame foundation for turbine set*

DOI: 10.15199/33.2015.09.28

(Studium przypadku)

**Streszczenie.** Artykuł dotyczy modernizacji konstrukcji fundamentu ramowego turbozespołu, wykonanego w latach sześćdziesiątych XX wieku. Modernizacja podyktowana była potrzebą wymiany turbozespołu na nowy, o innej geometrii, innym sposobie przekazywania obciążeń oraz zwiększonej mocy. W artykule omówiono główne problemy technologiczne i projektowe.

**Słowa kluczowe:** dynamika budowli, fundament, turbozespół, żelbet.

**Abstract.** The paper concerns the modernization of a frame foundation structure of a turbine set. The object was executed in the 1960s. The modernization was caused by the necessity of the turbine set replacement into the new one, with different geometry, different way of loads application and increased wattage. In the paper the main technological and design aspects were discussed.

**Keywords:** structural dynamics, foundation, turbine set, reinforced concrete.

Fundamenty ramowe są podstawowym rodzajem konstrukcji pod maszyny szybkoobrotowe. W omawianym przypadku jest to konstrukcja wsporcza turbozespołu, która składa się z płyty dolnej, słupów oraz płyty górnej. Płyta dolna jest masywna, ponieważ ma zapewnić wymaganą sztywność i nieodkształcalność całej konstrukcji oraz umożliwić pełne utwierdzenie słupów. Zwykle bezpośrednio na płycie dolnej montowany jest kondensator turbozespołu. Zasadnicza maszyna (turbina oraz generator) instalowana jest na płycie górnej. Ze względu na znaczną liczbę przewodów instalacyjnych oraz inne wymagania technologiczne, w płycie górnej wykonywane są otwory i wycięcia. Wówczas płyta ta przybiera kształt rusztu belkowego, który wraz ze słupami tworzy przestrzenny układ ramowy.

W omawianym przypadku w latach 60. XX wieku wykonano fundament ramowy jako konstrukcję wsporczą pod turbozespół o mocy 19 MW. Większość obciążeń przekazywana była na belki poprzeczne fundamentu, wzdłuż kadłuba turbozespołu. Belki poprzeczne (4 szt.) wraz z belkami podłużnymi (2 szt.) opierały się na słupach (8 szt.). W związku z modernizacją, polegającą na zamontowaniu nowego turbozespołu o zwiększonej mocy (20 MW), należało przeprowadzić analizy obliczeniowe i zaproponować rozwiązania konstrukcyjne dla zmienionych warunków pracy.

<sup>1)</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

<sup>2)</sup> „Expertus” Biuro Rzeczoznawstwa Budowlanego

\* Autor do korespondencji:

e-mail: michal.musial@pwr.edu.pl

### Stan techniczny istniejącej konstrukcji

W ramach badań istniejącej konstrukcji przewidziano m.in. określenie klasy betonu metodami niszczącymi, wizualną ocenę stanu technicznego, inwentaryzację zbrojenia. Próby ściskania przeprowadzone na odwiertach rdzeniowych pozwoliły określić klasę betonu płyty dolnej jako C20/25 oraz ramy jako C16/20. Ponadto stwierdzono zły stan techniczny konstrukcji ramy. Częstą wadą były ubytki betonu. W narożniku jednego ze słupów zauważono brak ciągłości pręta podłużnego (fotografia 1), natomiast przy podstawie innego słupa stwierdzono złą jakość betonu (fotografia 2). Płyta dolna była w zdecydowanie lepszym stanie technicznym. Wykonana odkrywka (fotografia 3) pozwoliła zinventaryzować zbrojenie. Zidentyfikowano pręty średnicy 24 mm w rozstawach 15 cm z gatunku stali 18G2-b.



Fot. 1. Brak pręta w narożniku słupa

Photo 1. The lack of rebar in the column corner



Fot. 2. Zła jakość betonu przy podstawie słupa

Photo 2. Unsatisfactory state of the concrete by the column base



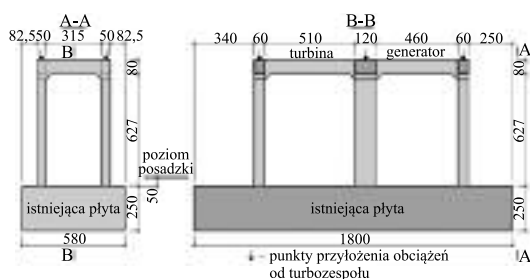
Fot. 3. Odkrywka pozwalająca zinventaryzować zbrojenie

Photo 3. Opening for reinforcement inventory

### Zaproponowane rozwiązanie

Inwestor, chcąc zredukować koszty modernizacji konstrukcji, początkowo planował montaż nowego turbozespołu na istniejącym fundamencie ramowym po niewielkich i niezbędnych naprawach oraz modernizacji. Niestety rozwiązanie to należało kategorię odrzucić. Głównym powodem był zły stan techniczny słupów. Ponadto, zgodnie z normą [1], minimalna wymagana klasa betonu fundamentów ramowych pod turbozespoły o mocy 20 MW wynosi B25 (C20/25). Na podstawie wyników badań niszczących można stwierdzić, że jedynie płyta dolna spełniała te wymagania. Co więcej, posadowienie nowego turbozespołu na istniejącej konstrukcji byłoby niekorzystne ze względów eksploatacyjnych. Konstrukcje tego typu powinny być projektowane indywidualnie. Każdorazowo należy bowiem zadbać o centryczne usytuowanie

mas oraz, w miarę możliwości, zapewnić osiowe przekazywanie obciążeń na słupy. W opisywanym przypadku byłoby to niemożliwe, choćby z tego powodu, że stary turbozespół przekazywał obciążenia w 13 punktach skoncentrowanych wokół osi podłużnej. Nowy natomiast podparty był w 6 punktach rozmieszczonych na obwodzie prostokąta o wymiarach 3,65 x 11,50 m. W związku z tym przygotowano optymalne rozwiązanie z punktu widzenia ekonomii oraz inżynierii konstrukcji. Zaproponowano usunięcie starej konstrukcji z wyjątkiem płyty dolnej. W przypadku stwierdzenia powierzchniowych uszkodzeń (głównie ubytków) górnej powierzchni płyty należało je usunąć, używając zapraw naprawczych. W istniejącej płycie przewidziano wklejenie prętów zbrojeniovych żywicami epoksydowymi. Konstrukcja ramy zostanie dowiązana do wystających prętów. Zalecono przy tym zachowanie szczególnych reżimów technologicznych (m.in. odpowiednie przygotowanie powierzchni z naniesieniem warstw szpnych w miejscach połączenia słup-płyta dolna). Całą konstrukcję fundamentu pokazano na rysunku 1. Geometria belek podłużnych i poprzecznych w poziomie górnym uwarunkowana była głównie względami technologicznymi (m.in. potrzebą montażu obudowy dźwiękochłonnej oraz instalacji).



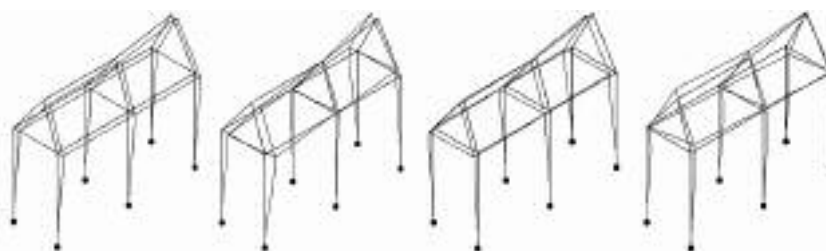
Rys. 1. Geometria konstrukcji (wymiarów w cm)  
Fig. 1. The geometry of the structure (dimensions in cm)

### Analizy obliczeniowe

Analizy obliczeniowe [2-4] przeprowadzono dla obciążeń podanych przez dostawcę maszyny. Były to obciążenia stałe, obciążenia spowodowane prawidłową pracą maszyny, momentem zwarcia, pracą maszyny w warunkach awaryjnych. Ponadto uwzględniono obciążenia związane z ciężarem własnym konstrukcji, obudowy dźwiękochłonnej, instalacji, a także temperaturą i skurczem betonu. Częstotliwość wzbudzenia od generatora i turbiny wynosiła odpowiednio 25 Hz (1500 obr/min) i 100 Hz (6000 obr/min). Stwierdzono, że pod fundamentem są grunty niespoiste w stanie zagęszczonym. Na stopień zagęszczenia po-

zytywny wpływ miał pracujący przez kilkadziesiąt lat poprzedni turbozespół. Ze względu na wysoką częstotliwość pracy maszyny oraz dobre warunki posadowienia pominięto wpływ sprężystości podłoża [4]. Schematem konstrukcji była przestrzenna rama z utwierdzonymi przy podstawach słupami. W obliczaniu podstawowych parametrów dynamicznych konstrukcji (częstotliwości własnych i odpowiadających im form) posłużono się modelem prętowym z uwzględnieniem zasady zeszywnienia w węzłach [5]. Decydujące, ze względu na dalszy tok projektowania, formy własne pokazano na rysunku 2. Zestawienie częstotliwości własnych zamieszczono w tabeli. Dodatkowo, wyniki obliczeń numerycznych zweryfikowano metodą uproszczoną [2].

Na podstawie częstotliwości własnych oraz logarytmicznego dekrementu tłumie-



Rys. 2. Cztery pierwsze formy własne  
Fig. 2. First to fourth eigenforms

nia (0,4) obliczono współczynniki dynamiczne. W przypadku sił pionowych współczynnik ten wyniósł 2,2. W przypadku oddziaływań poziomych zachodził rezonans przejściowy. W związku z tym współczynnik dynamiczny wyniósł 7,5. W takim przypadku nie uwzględnia się jednak całości obciążenia, a jedynie jego część (zależną od kwadratu stosunku odpowiedniej częstotliwości własnej do częstotliwości wzbudzenia). Po uwzględnieniu współczynnika dynamicznego 7,5 oraz redukcji obciążenia końcowy mnożnik wyniósł 0,24. Dodatkowo

### Zestawienie wyników obliczeń Specification of the calculations results

Opis formy własnej	Częstotliwości [Hz]		
	MES	Metoda uproszczona rama skrajna	rama wewn.
Pozioma (drżania przesuwnie poprzeczne)	2,75		
Pozioma (drżania skrętne)	3,64	3,5	2,7
Pozioma (drżania przesuwnie podłużne)	3,49		
Pionowa	33,66	38	37

wo w przypadku obciążeń w normalnych warunkach pracy zastosowano mnożnik zmęczeniowy 2,0. Dynamiczne przemieszczenia naroży ram fundamentu określono metodą całkowania numerycznego równań ruchu. W maksymalnym przypadku wyniosło ono 0,24 μm, czyli znacznie mniej niż wartość dopuszczalna wynosząca 10 μm.

### Podsumowanie

Ze względu na wady materiałowe starego fundamentu ramowego wykonanego w latach sześćdziesiątych, przed zamontowaniem nowego turbozespołu, zastosowano rozwiązanie polegające na wzniesieniu nowej ramy na istniejącej płycie. Dodatkową jego zaletą było dopasowanie jej geometrii do nowego turbozespołu, co umożliwiło korzystniejsze przyłożenie obciążeń do konstrukcji.

Wyniki obliczeń numerycznych zweryfikowano metodą uproszczoną. Okazało się, że obie metody dały zbliżone wartości. Różnice w zasadzie nie przekraczały 15%. Uważamy, że sprawdzenie metodami przybliżonymi powinno być nieodzownym elementem weryfikującym obliczenia numeryczne, bez względu na skomplikowanie analizowanego zagadnienia oraz typ konstrukcji. Nie do przecenienia pozostają uproszczone modele wynikające m.in. z dotychczasowych doświadczeń, pomimo że w dobie dynamicznego rozwoju numerycznych systemów obliczeniowych często uznawane są za anachroniczne.

Wszystkie fotografie – Autorzy

### Literatura

- [1] PN-80/B-03040:1980. Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny – Obliczenia i projektowanie.
- [2] Kisiel I., Dynamika fundamentów pod maszyny, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1957.
- [3] Langer J., Dynamika Budowli, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1980.
- [4] Lipiński J., Fundamenty pod maszyny, Arkady, Warszawa, 1985.
- [5] Starosolski W., Konstrukcje żelbetowe według PN-B-03264:2002 i Eurokodu 2, Tom III, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2009.

Przyjęto do druku: 08.08.2015 r.