

DRGANIA OSIOWE FUNDAMENTÓW TURBOZESPOŁÓW DUŻEJ MOCY W ŚWIETLE BADAŃ

(Praca przeglądowa)

ANTONI WEGNER

Politechnika Poznańska

W pracy omówiono aktualny stan wiedzy dotyczącej drgań osiowych fundamentów pod turbozespoły. Przedstawiono dotychczasowe badania eksperymentalne zarówno na modelach jak i na eksploatowanych obiektach a także próby wyjaśnienia przyczyn drgań osiowych. Rozważano również sposoby ujęcia obliczeniowego osiowych sił wzbudzających w świetle prowadzonych badań.

1. Uwagi wstępne

Jednym z dotychczas nie rozwiązanych problemów fundamentów turbozespołów jest występowanie drgań osiowych, niejednokrotnie o dużych wartościach amplitud.

W literaturze technicznej zarówno krajowej jak i zagranicznej zajmującej się problematyką projektowania fundamentów pod maszyny, autorzy dostrzegają zazwyczaj następujące źródła wzbudzenia drgań:

- a) siły odśrodkowe, spowodowane niedokładnością wyważenia części ruchomych
- b) siły powstałe w wyniku działania momentu krótkiego zwarcia w generatorze
- c) nieosiowość agregatu i zgięcia wału maszyny.

Przedstawione wyżej siły wzbudzenia pozwalają na przybliżone określenie amplitud drgań fundamentu w kierunku pionowym i poziomo-poprzecznym (drgania prostopadłe do osi wirników). Nie umożliwiają natomiast wyznaczenia amplitud drgań osiowych.

Tymczasem występujące zarysowania słupów ram fundamentów pod turbozespoły coraz częściej układem swych rys wskazują na siły osiowe jako na ich źródła. Możliwość tę potwierdzają dotychczasowe badania dynamiczne. Stąd w niniejszej pracy przedstawiono aktualny stan wiedzy dotyczącej omawianych sił wraz z jego oceną.

2. Dotychczasowe badania dynamiczne fundamentów

W okresie międzywojennym autorzy nielicznych opublikowanych badań dynamicznych nie dostrzegali konieczności prowadzenia pomiarów amplitud drgań osiowych fundamentów. Uważano bowiem, że przy maszynach rotacyjnych z osią poziomą nie występują osio-

we siły wzbudzające. Stąd omawiane wyniki badań dotyczą tylko drgań pionowych i poprzecznych (J. Geiger [1], G. Mensch [2], T. C. Rathbone [3], H. Kayzer [4, 5], G. Ehlers [6], S. Vesselowsky [7]). Niemniej jednak w pracach [4, 6, 8] przedstawiono formy drgań górnych płyt fundamentów, które wskazują na występowanie amplitud drgań osiowych.

Dopiero prowadzone w latach 50-tych badania dynamiczne fundamentów pod turbozespoły potwierdziły występowanie drgań osiowych.

W. W. Makariczew w pracy [9] przedstawił wibrogram drgań własnych poprzecznej ramy fundamentu (dla trzech rozważanych kierunków), jednak bez dalszej analizy zjawiska (np. sił wewnętrznych w maszynie, nieosiowości agregatu itp).

W pracy [10] A. I. Abaszidze i M. A. Branowskij — przedstawiają wyniki badań 8 fundamentów oraz łożysk podporowych wałów turbozespołów o mocy od 4 do 50 MW. Badania przeprowadzono także w czasie rozruchu i odstawiania maszyny.

Na podstawie badań autorzy stwierdzają, że drgania łożysk w kierunku osi wału są bardzo często większe od drgań w kierunku poprzecznym i pionowym.

Dużym mankamentem tej ciekawej pracy jest forma graficznego ujęcia wyników badania drgań elementów konstrukcyjnych — podczas rozruchu turbozespołu. Przedstawiono bowiem na wykresie przykładowo przebieg drgań trzech różnych elementów z różnych fundamentów w trzech rozpatrywanych kierunkach (trzy linie zapisu). Wyklucza to jakąkolwiek analizę wyników badania drgań elementów w trzech kierunkach.

Równolegle prowadzi badania R. Kohler [11] próbując wyjaśnić przyczyny zarysowania żelbetowego rygla ramy podłużnej fundamentu turbozespołu o mocy 10 MW.

W czasie badań rejestruje amplitudy drgań podłużnych fundamentów, potwierdzone badaniami modelowymi.

Drgania podłużne rejestruje R. Kohler również w czasie badania fundamentów niskostrojonych, zarówno stalowych jak i żelbetowych [12].

Także Z. Śniadkowski [13] stwierdza występowanie drgań osiowych fundamentu, zaznaczając, że wartości amplitud drgań na trzech rozważanych kierunkach wskazują na zaniżone mimośrodowość, przyjmowane do obliczeń projektowych.

W 1959 r. B. Kounovsky [14] przedstawia badania dynamiczne 8 różnych fundamentów, ukazując współzależność drgań w układach przestrzennych.

Na załączonych rysunkach można łatwo zauważyć jak bardzo zarejestrowane formy drgań fundamentów odbiegają od przedstawionych w literaturze technicznej na podstawie badań modelowych i analiz teoretycznych.

B. Kounovsky przedstawił także dla drgań rygla ramy podłużnej układ figur Lissajousa, potwierdzając tym samym wyniki badań T. C. Rathbone [8].

W czasie badań dynamicznych turbozespołu M. Novak [15] rejestruje duże drgania osiowe podpór łożyskowych generatora (panwi podporowych). Wyniki badań uzupełniono podaniem wartości amplitud drgań rygla ramy poprzecznej (drgania osiowe — z płaszczyzny ramy).

A. I. Abaszidze w pracy [16] przedstawia wyniki badań prowadzonych na fundamentach turbozespołów o mocy 4 ÷ 100 MW.

Analizując wyniki omawianych badań można łatwo stwierdzić, że wartości amplitud drgań osiowych fundamentów wzrastają wraz z mocą turbozespołu (w przypadku turbo-

zespołu o mocy 100 MW wartości amplitud drgań osiowych były w przybliżeniu równe wartościom amplitud drgań poprzecznych).

Ciekawe badania fundamentu turbozespołu o mocy 50 MW omawia J. Pałka [17]. Przedstawia m.in. wykres zależności amplitud drgań wybranego punktu fundamentu (dla trzech kierunków) od liczby obrotów maszyny. We wnioskach postuluje konieczność sprawdzania amplitud drgań osiowych fundamentów.

Na podobne współzależności drgań wskazuje również M. Novak [18], przy omawianiu badań fundamentów turbozespołów o mocy 25 i 35 MW.

W monografii [19] A. I. Abaszidze, S. A. Berenstein, F. W. Sapożnikow poszerzają wyniki swych badań sprzed kilku lat o eksperymentalne określenie drgań własnych (dla trzech kierunków) różnych elementów konstrukcyjnych fundamentów, a także porównują wartości otrzymane w czasie badań eksploatowanych fundamentów i odpowiednich modeli. Prócz tego przedstawiają wyniki badań prefabrykowanych fundamentów żelbetowych pod turbozespoły o mocy 150 MW.

Z porównania wartości amplitud drgań wynika, że w przypadku fundamentów prefabrykowanych — wartości amplitud drgań osiowych są największe, natomiast przy monolitycznych — najmniejsze.

Również A. Nesitka [20] w czasie badania fundamentu turbozespołu o mocy 3 MW stwierdził występowanie drgań osiowych. Zaznacza jednak, że są one znacznie mniejsze od wartości amplitud drgań poprzecznych.

Odmiennego zdania jest O. A. Sawinow [21], stwierdzając na podstawie badań D. D. Barkana, że ponad 50% fundamentów wykazuje wartości amplitud drgań osiowych równe bądź często większe od wartości amplitud drgań poprzecznych.

Wyniki badań żelbetowych fundamentów prefabrykowanych pod turbozespoły o różnej mocy przedstawiają A. I. Abaszidze i A. T. Kazandżjan [22]. Badają także drgania podpór wałów turbozespołów i na ich podstawie wyprowadzają liniową zależność m.in. pomiędzy podłużnymi drganiami fundamentu i łożysk podporowych.

Również G. G. Arganowski [23] przedstawia wyniki badań amplitud drgań osiowych żelbetowych fundamentów prefabrykowanych o mocy 50, 100, 150 i 200 MW, porównując je z wartościami zarejestrowanymi na fundamentach monolityczno-prefabrykowanych.

A. I. Abaszidze, F. W. Sapożnikow, A. T. Kazandżjan [24] uzupełniają swoje badania, przytaczając wyniki zarejestrowane na żelbetowych fundamentach prefabrykowanych o mocy 200 MW (wartości amplitud mierzono dla trzech kierunków drgań).

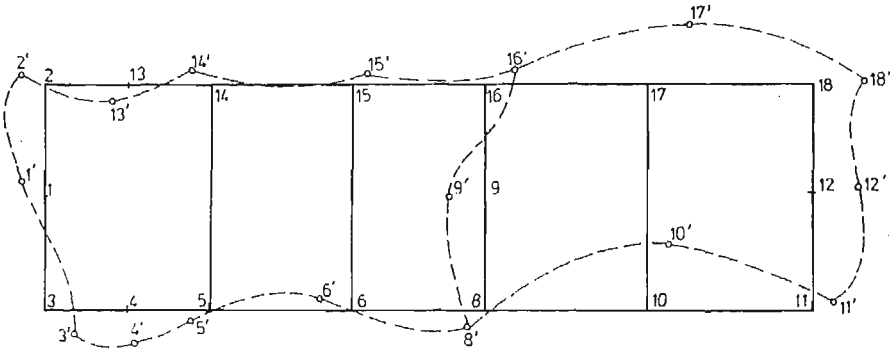
W latach 1971 - 1978 na zlecenie jednostek państwowych Zespół Inst. Technologii i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Poznańskiej przeprowadza szerokie badania dynamiczne żelbetowych fundamentów monolitycznych pod turbozespoły o mocy 200 MW [25,26]*)

Analizą objęto m.in. zależność wartości amplitud drgań od zarysowania fundamentu, a także jego wpływ na zmianę charakterystyki dynamicznej konstrukcji [27]. Badano wpływ elektropetryfikacji podłoża na wartość amplitud drgań fundamentu [28] oraz udział składowych amplitud drgań od maszyn sąsiadujących w końcowej wartości amplitud [29].

*^o We wszystkich badaniach dynamicznych uczestniczył prócz autora inż. d/s aparatury G. Wasielewski oraz towarzyszący mu technicy.

3. Próby wyjaśnienia przyczyn drgań osiowych

Dostrzeżone jeszcze w latach 30-tych drgania podłużne fundamentu próbowano wyjaśnić występującymi formami odkształceń płyty górnej konstrukcji (rys. 1). Wykluczono natomiast działanie jakichkolwiek sił podłużnych [30].



Rys. 1. Przykładowa forma odkształcenia dynamicznego płyty górnej fundamentu turbozespołu wg [24] (widok z góry)

Na wielkość sił wzbudzających, a tym samym na wielkość deformacji płyty górnej ma wg E. Rauscha [31] wpływ — poza mimośrodem początkowym, także rozregulowanie turbiny (jako wynik — wypadania łopatek z głównego koła, odkładanie się soli kotłowych na łopatkach, skrzywienie wału).

H. Weber w swej pracy [32] wskazuje na znaczenie doboru właściwego modelu ramy podłużnej fundamentu przy wyznaczaniu drgań własnych i stref rezonansu.

Na przykładach ramowych fundamentów turbozespołów o mocy 100 MW (stalowego i żelbetowego) przedstawia różnice w częstotliwościach drgań, wyznaczonych dla różnych modeli obliczeniowych.

Na podobne problemy zwraca uwagę E. Krämer [33] omawiając m.in. wpływ niedokładnego połączenia elementów wału na wzrost sił odśrodkowych (problem rozosiowania wału).

Istotne miejsce w analizie zjawiska zajmuje określenie wpływu ugięcia statycznego i dynamicznego wału wirnika na wielkość sił odśrodkowych. Problem ten zasygnalizowany przez I. Kisiela [34] został szeroko omówiony z punktu widzenia praktycznego w pracach J. Kożesnika [35], Lipsmanów [36] i R. Łączkowskiego [37].

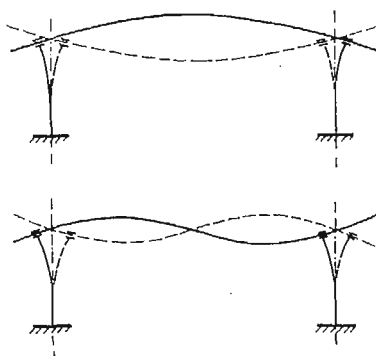
W pracach [36, 37] zwrócono również uwagę na wpływ rozosiowania wału na zwiększone oddziaływania dynamiczne turbozespołu.

Mała sztywność podpór łożyskowych może być wg R. Łączkowskiego [38] przyczyną powstawania silnych drgań podłużnych. Zaznaczono jednak, że problem ten dotyczy szczególnie generatorów dużej mocy.

Omówienie mechanizmu oddziaływania jak również związku z siłami bezwładności niewyważonych mas wirnika — znajdujemy w monografii R. Łączkowskiego [37]. Autor m.in. stwierdza, że amplitudy drgań osiowych podpór łożyskowych „...są proporcjonalne do dynamicznej strzałki linii ugięcia wirnika” (rys. 2). Prócz tego R. Łączkowski dostrzega

jako źródło sił podłużnych „...składowe osiowe dynamicznego naporu czynnika na łopatki wirnikowe oraz różnicę statycznego ciśnienia czynnika po obu stronach tarcz wirnikowych” [37].

Sposób wyznaczenia omówionych składowych przedstawia E. Tuliczka [39], podkreślając, że otrzymane wartości mogą być znaczne. Jednocześnie Autor wyjaśnia, że jakkolwiek



Rys. 2. Zależność kątowa przemieszczenia czopów łożysk podporowych od dynamicznego ugięcia wału turbozespołu: a) przy pierwszej prędkości krytycznej drgań obrotowych; b) przy drugiej prędkości krytycznej drgań obrotowych wg [37]

dąży się do wewnętrznego wyrównoważenia sił podłużnych (osiowych) w obszarze korpusu, to jednak takie rozwiązanie komplikuje układ konstrukcyjny. Stąd typowym rozwiązaniem dla przeniesienia sił podłużnych jest zastosowanie łożyska oporowego Mitchella. Wyznaczona w pracy [39] nośność łożyska wzdłużnego jest znaczna.

W pracy [38] R. Łączkowski stwierdza, że źródłem wzbudzenia znacznych drgań podłużnych jest również wirujące pole magnetyczne generatora. Częstotliwość drgań wywołanych omawianymi siłami jest równa 100 Hz.

Rozpatrując problem osiowych drgań wymuszonych fundamentu nie sposób pominąć wzdłużnych drgań własnych wału wirników i związanych z tym stref rezonansowych. Rozwiązanie tych zagadnień przedstawiono w sposób przydatny dla celów praktycznych w pracach R. Łączkowskiego [40, 41].

W ostatnich latach podjęto próby oceny zależności drgań łożysk i wirników wału od sztywności fundamentu. Zależność tę rozpatrywano przy uwzględnieniu różnych wpływów dodatkowych (warstewki olejowej łożyska, jej położenia, sztywności koźłów podporowych łożysk itp.) w pracach Z. Walczyka [42], J. Glienicke [43], E. Krämera [44].

Szerokie możliwości analizy wpływu różnych czynników na drgania wału przedstawiono w pracy A. Muszyńskiej [45]. Należy domniemywać, że przy pewnej modyfikacji przedstawionych w pracy równań, będzie można również uwzględnić wpływ fundamentu na drgania łożysk.

4. Obliczeniowe ujęcie sił osiowych

W pierwszych zaleceniach projektowych [30] nie przewidywano konieczności uwzględnienia drgań osiowych w obliczeniach fundamentów turbozespołów. Dopiero w opracowa-

niu E. Rauscha [46] mamy pierwsze wzmianki na temat obliczeń układu podłużnego fundamentu (przy uwzględnieniu płyty górnej). Zalecono bowiem, by nie obciążone elementy konstrukcyjne fundamentu, współdrżące z ramami poprzecznymi obliczać przy uwzględnieniu 50% zwwyżki ich ciężaru własnego.

Sposób obliczania drgań pionowych i poprzecznych rygli ram podłużnych przedstawiono w monografii E. Rauscha [31].

Obliczenia dynamiczne sprowadzono do wyznaczenia drgań własnych pionowych i ewentualnie poprzecznych belki ciągłej (rygla ramy podłużnej) na podporach sztywnych lub sprężystych.

Możliwość wystąpienia sił wzbudzących w kierunku osiowym fundamentu dostrzeżono dopiero w normie niemieckiej [47]. Zalecono jednocześnie by w obliczeniach projektowych uwzględniono strefy rezonansowe ram podłużnych. Współdrżające, nie obciążone elementy konstrukcyjne fundamentu liczy się w sposób przedstawiony w opracowaniu [46].

Znowelizowana norma [48] nie wnosi do obliczeń żadnych zmian, potwierdza jednak możliwość występowania drgań osiowych fundamentu wywołanych siłami wzbudzającymi.

W pracy R. Jänischa [49] przedstawiono metodę obliczania drgań giętnych, drgań pionowych i poziomych (poprzecznych) rygla ramy podłużnej — jako belki ciągłej. Drgania osiowe pominięto z uwagi (jak zaznaczono) na ich małe znaczenie praktyczne (wyznaczone amplitudy drgań były b. małe).

M. F. Makaroczkin, Ju. A. Sobolewski [50] zalecają przy obliczaniu fundamentów turbosespołów bez wykonstruowanej ramy podłużnej — przyjmować osiowe siły wzbudzające równe połowie wartości odpowiednich obciążeń dynamicznych poprzeczno-poziomych. Jednocześnie uważają, że przy fundamentach ramowych, mających ramy podłużne, można nie uwzględniać w obliczeniach działania sił podłużnych (osiowych).

Wyznaczenie osiowych sił wzbudzących na podstawie prowadzonych badań przedstawiono w pracy P. A. Gutidze [51] (cyt. wg [19]). Dla fundamentów turbosespołów o 3000 obr/min otrzymano wartość osiowej siły wzbudzającej równą połowie wartości pionowej siły wzbudzającej.

Cz. Kłós i J. Lipiński [52] proponują natomiast na podstawie prowadzonych obserwacji drgań osiowych fundamentów (zaobserwowane drgania osiowe były znacznie mniejsze od drgań poprzecznych) przyjęcie sił osiowych równych „... połowie obciążeń dynamicznych poziomych, prostopadłych do osi turbosespołu”. Jednakże w przytoczonych przykładach obliczeń drgań ram podłużnych nie uwzględniono osiowych sił wzbudzących, ograniczając się tylko do ujęcia wpływu momentu zwarcia i drgających w węzłach mas, wzbudzonych drganiami rygli ram poprzecznych. Jako schemat obliczeniowy ramy podłużnej przyjęto podzielony rygiel na poszczególne przęsła, utwierdzone na podporach (w węzłach).

Prócz tego w pracy [52] przedstawiono ciekawe zestawienie porównawcze wartości poziomych amplitud drgań poprzecznych ram fundamentu pod turbosespół o mocy 25 MW. Amplitudy drgań obliczono rozpatrując ramy jako oddzielne konstrukcje i jako składowe elementy sztywnej płyty górnej. Rozbieżności pomiędzy wynikami sięgają ponad 50%.

W monografii E. Rauscha [53] dostrzeżono podobne ujęcie obciążenia przy obliczaniu ram podłużnych jak w pracy [31], jakkolwiek autor zaleca w pierwszej kolejności wyznaczenie drgań płyty górnej fundamentu jako sztywnej tarczy. Prócz tego zwraca uwagę na celowość sprawdzania drgań sprzężonego układu płyty górnej i dolnej fundamentu; często-

tliwość zaś obliczanych drgań własnych winna być różna o min. 20% od częstotliwości drgań eksploatacyjnych.

Obliczenia statyczne przeprowadzono jednocześnie dla całej ramy podłużnej, dynamiczne natomiast tylko dla rygla podłużnego.

Pierwsze ujęcie obliczeń wpływu dynamicznego dla całej ramy podłużnej przedstawiono w pracy A. I. Abaszidze [16].

Drgania własne całego układu (do IV rzędu) wyznaczono przy założeniu sprężystości rygli podłużnych i przegubowo połączenia ich w węzłach z ryglami ram poprzecznych. W węzłach tych skupiono masy złożone z połowy wartości przypadającej na poszczególne rygle ram poprzecznych i z części rygli ramy podłużnej. Następnie za pomocą rozłożenia w szereg wg form drgań własnych i przy uwzględnieniu poprzecznych sił wzbudzających (jak proponowano w pracy [52]) określono amplitudy drgań podłużnych.

Przedstawioną wyżej metodę obliczeń drgań ram podłużnych omówiono szerzej w monografii A. I. Abaszidze, S. A. Berensteina i F. W. Sapożnikowa [19].

Przyjęcie poziomej siły wzbudzającej do obliczenia drgań fundamentów w kierunku podłużnym zalecono również w przepisach amerykańskich [54] (cyt. wg [63]). W myśl tych przepisów wielkość sił osiowych winna być określona przez wytwórcę maszyn.

W schemacie obliczeniowym układu konstrukcyjnego fundamentu, siły podłużne (osiowe) obciążają obie skrajne ramy poprzeczne (siły przyłożone w środku rozpiętości rygla, prostopadle do jego osi).

Bardzo ciekawą analizę wartości amplitud drgań poprzecznych przeprowadzono w pracy E. Krynickiego i W. Włodarczyka [55]. Obliczono mianowicie częstotliwości drgań własnych i amplitudy drgań ram poprzecznych dla fundamentu pod turbozespół o mocy 125 MW przy zastosowaniu metody E. Rauscha [53], W. W. Makariczewa [9] i I. Kisiela [34], a także z uwzględnieniem sił poprzecznych lub bez nich — przy użyciu wzorów transformacyjnych metody przemieszczeń.

Różnice pomiędzy obliczonymi częstotliwościami drgań własnych nie przekraczają 20%, natomiast wartości amplitud drgań różnią się do 80%.

Prócz tego przedstawiono wyniki obliczeń ram poprzecznych fundamentu turbozespołu o mocy 200 MW, rozpatrywanych jako samodzielne konstrukcje i jako pracujące w układzie sztywnej płyty górnej.

W pracy G. Kleina [56] opartej na metodzie E. Rauscha przedstawiono wyznaczenie częstotliwości drgań własnych ram podłużnych oraz pionowych i poprzecznych (z płaszczyzny ramy) drgań wzbudzonych rygla (jako belki ciągłej). Zwrócono też uwagę na konieczność zachowania min. 20% różnicy pomiędzy częstotliwościami drgań własnych i wzbudzonych.

Na niedostatki dotychczasowych metod obliczeń rygli ram podłużnych zwrócono uwagę w pracy G. Kleina [57]. Podkreślono m.in. brak uwzględnienia w obliczeniach projektowych sztywności współpracującego turbozespołu, sprężystości podparć wału maszyny, sprzężenia drgań rygli ram poprzecznych z ramą podłużną, możliwości drgań konstrukcji fundamentu w trzech podstawowych kierunkach.

W normie [58] obowiązującej w naszym kraju w latach 1967 - 1980, nie przedstawiono żadnych zaleceń dotyczących konieczności obliczania drgań ram podłużnych, jakkolwiek w monografii J. Lipińskiego [59] (z tego samego okresu) stwierdzono, że mogą występować

obciążenia dynamiczne, działające wzdłuż osi maszyny. W cyt. monografii zalecono przyjęcie wielkości sił osiowych zgodnie z wcześniejszą pracą autora [52]. Niemniej jednak w przykładzie obliczeń fundamentu pod turbosespół o mocy 25 MW wartości tej nie uwzględniono (rygiel ramy podłużnej obliczono wg zasad sformułowanych przez E. Rauscha).

W pracy W. Herrmanna [60] oraz w monografiach A. Majora [61] i G. Buzdugana [62] problem obliczania podłużnych ram fundamentu ograniczono do podania zaleceń przedstawionych w opracowaniu E. Rauscha [46].

W najnowszej monografii A. Majora [63] w zestawieniu obciążeń ujęto poziome siły osiowe jako obciążenia wzbudzające drgania wzdłuż osi podłużnej fundamentu; nie podano jednak ich wartości. Miejsce przyłożenia sił osiowych przyjęto zgodnie z opracowaniem [54].

Wiele miejsca w publikacji poświęcono omówieniu schematów ram podłużnych, stosowanych przy obliczaniu drgań własnych (wg prac cyt. wyżej).

W aktualnie obowiązującej w kraju normie dotyczącej fundamentów pod maszyny [64] uwzględniono obciążenia dynamiczne, działające w osi konstrukcji. Przyjęto wielkość siły osiowej równą połowie wartości poprzecznych sił wzbudzających, co jest zgodne z wcześniejszymi propozycjami, przedstawionymi w pracach [16, 50, 52].

5. Ocena wyników badań i prac teoretycznych

Prowadzone w ostatnim dwudziestolecu badania dynamiczne eksploatowanych fundamentów turbos zespołów jednoznacznie wykazały występowanie drgań osiowych. Zarejestrowano mocno zróżnicowane wartości amplitud drgań osiowych, wzrastające wraz z mocą turbos zespołów. W przypadku maszyn o mocy 200 MW, wartości rozważanych amplitud drgań płyty górnej fundamentu są podobne do wartości amplitud drgań pionowych bądź poprzecznych [26]. Oznacza to, że niesposób nadal pomijać ich określenia w obliczeniach projektowych, a także w ujęciu normowym (wartości dopuszczalnej amplitudy drgań osiowych [64]).

Do problemów nadal nie rozwiązanych należy jednak wielkość osiowych sił wzbudzających.

Obowiązująca w kraju norma [64] ujmuje wielkości sił osiowych zgodnie z propozycjami autorów z końca lat pięćdziesiątych [16, 50, 51, 52], a więc przyjmuje siłę o wielkości równej połowie charakterystycznego obciążenia dynamicznego, zalecanego do obliczeń amplitud drgań pionowych bądź poprzecznych.

Powyższa wartość siły osiowej nie jest wynikiem szerszych badań konstrukcji czy analiz teoretycznych lecz została przyjęta przez pewną analogię do zaobserwowanych mniejszych wartości amplitud drgań osiowych (pomierzone amplitudy drgań osiowych były znacznie mniejsze od amplitud drgań poprzecznych [52]).

W tym miejscu należy zaznaczyć, że autorzy omawianych wyżej prac obserwowali fundamenty turbos zespołów o mocy do 100 MW (w przypadku publikacji [52] — do 50 MW). Stąd brak oceny spotykanych aktualnie wartości amplitud drgań osiowych fundamentów turbos zespołów dużej mocy [26].

W przypadku przyjęcia wyżej przytoczonego rozumowania dla fundamentów turbozespołów o mocy 200 MW — normową wartość siły osiowej należałoby zwiększyć dwukrotnie.

Powyższe zjawiska nie mają jednak liniowej zależności, co łatwo zauważyć śledząc treść pracy H. Webera, E. Krämera, Z. Walczyka, J. Glienicke czy A. Muszyńskiej.

I jakkolwiek rozwiązano wiele problemów mechanicznych, to jednak nie udało się jednoznacznie określić osiowej siły wzbudzającej, która winna być przyjmowana do obliczeń fundamentów.

Należy domniemywać, że taki stan wiedzy wynika przede wszystkim z przyjętego punktu widzenia autorów, którzy dostrzegają problem od strony wpływu fundamentu na pracę turbozespołu (np. [42, 43, 44]). Brak natomiast opracowań, w których byłaby przeprowadzona analiza występujących sił pod kątem wpływu turbozespołu na fundament. Stąd dla pełnego rozwiązania problemu, przy całkowitej przydatności wyników dla konstruktorów fundamentów, konieczna jest ścisła współpraca w czasie badań i analiz teoretycznych inżynierów mechaników i inżynierów budownictwa.

6. Uwagi końcowe i wnioski

Prawidłowa praca turbozespołu zależy m.in. od dobrego stanu technicznego fundamentu. Tymczasem występujące coraz częściej zarysowania konstrukcji fundamentów, szczególnie pod turbozespoły o mocy powyżej 50 MW wskazują, iż nie wszystkie problemy techniczne rozpatrywanej konstrukcji wsporczej zostały wyjaśnione.

Należy mieć również na uwadze fakt, że aktualnie budowane są w kraju turbozespoły o mocy 500 MW (są także w eksploatacji), wymagające skomplikowanej konstrukcji wsporczej o długości ok. 50,00 m. Stąd wydaje się anachronizmem stosowanie sił bądź parametrów określonych ponad ćwierć wieku temu podczas obserwacji fundamentów turbozespołów małych i średnich mocy (do 50 MW [50]) — do obliczeń fundamentów turbozespołów dużej mocy.

Konieczności prowadzenia badań dynamicznych dla wyjaśnienia rozważanych w niniejszej pracy zagadnień nie potrzeba uzasadniać. Uczynił to przed wielu laty R. Ciesielski przy omawianiu ogólnych problemów budownictwa, związanego z obciążeniami dynamicznymi [65, 66]. Również W. Włodarczyk w pracy [67] wskazuje, że w przypadku skomplikowanego układu konstrukcyjnego bądź występowania niewyjaśnionych dostatecznie obciążeń dynamicznych, najsłuszniejszą metodą dla rozwiązania problemu są badania dynamiczne.

Powstaje zatem pytanie: czy wolno nadal improwizować przy obliczaniu fundamentów turbozespołów dużej mocy, stosując metody i zasady wypróbowane i wystarczające — przy obliczaniu fundamentów turbozespołów małej mocy?

W świetle dotychczas prowadzonych badań fundamentów turbozespołów, a także na podstawie omówionego w publikacji materiału, można stwierdzić, że koszt rozwiązania problemu będzie wielokrotnie niższy od kosztów koniecznych napraw i wzmocnień aktualnie budowanych konstrukcji.

Można stąd sformułować następujące wnioski:

- 1). Występujące w czasie eksploatacji turbozespołu siły osiowe są duże i nie można ich pomijać przy obliczaniu amplitud drgań fundamentu
- 2). W obliczeniach fundamentów turbozespołów dużej mocy muszą być uwzględniane siły osiowe o wartościach zbliżonych do rzeczywiście występujących (ich ocena nie będzie jednoznaczna, zależy bowiem od stanu technicznego maszyny).
- 3). Badania dynamiczne i analizy teoretyczne wyjaśniające problem sił osiowych i związanych z nimi drgań, winny być prowadzone przez zespół składający się z inżynierów mechanicznych i inżynierów budownictwa
- 4). W znowelizowanej normie dotyczącej fundamentów pod maszyny musi być określona rzeczywista siła osiowa lub sposób jej obliczania (zalecana do obliczeń projektowych), jak również wartość dopuszczalnych amplitud drgań osiowych.

Literatura

1. J. GEIGER, *Untersuchung von Schwingungserscheinungen an Turbodynamos mit Hilfe des Vibrographen*. Zeitschr. d. VDI, 66/1922/18, s. 437 - 440
2. G. MENSCH, *Rechnerisch ermittelte und gemessene Schwingungszahlen an einem Turbinenfundament*. Bauingenieur 9/1928/H.9, s. 152 - 153.
3. T. C. RATHBONE, *Curing Resonant Vibration in Turbine Units*. Power, Apr. 10, 1928, s. 629 - 632.
4. H. KAYZER, *Über Fundamentalschwingungen*. Zeitschr. d. VDI, 73/1929/37, s. 1305 - 1310.
5. H. KAYZER, *Zur Beanspruchung von Turbinenfundamenten. Bericht über neuere Messungen von Fundamentschwingungen*. Bauingenieur 13/1932/H. 17/18, s. 231 - 235; H. 31/32, s. 419 - 420.
6. G. EHLERS, *Dampfturbinenfundamente und damit zusammenhängende Fragen des Eisenbetonbaues*. Bauingenieur 15/1934/H. 29/30, s. 298 - 301; H. 31/32, s. 312 - 314.
7. S. VESSELOWSKY, *Experimental and Theoretical Investigation of a Turbine Foundation*. Journ. Appl. Mech. June 1940, s. 63 - 70; Sept. 1941, s. 141 - 143.
8. T. C. RATHBONE, *Vibration of Turbine-Generator-Foundations*. Power, Apr. 3, 1928, s. 588 - 592, s. 606.
9. В.В. МАКАРИЧЕВ, *Фундаменты под турбоагрегаты*. Москва-Ленинград, Госэнергоиздат, 1951.
10. А.И. АБАШИДЗЕ, М.А. БРАНОВСКИЙ, *О работе рамных фундаментов под динамической нагрузкой*. Электрические Станции № 2/1955, с. 18 - 25.
11. R. KÖHLER, *Das Schwingungssystem Turbine-Fundament*. VIK-Berichte nr 28 (August) 1955, s. 7 - 29.
12. R. KÖHLER, *Ergebnisse von Schwingungsuntersuchen an Turbinen-fundamenten und Turbinen*. VDI-Berichte Bd. 24, 1957, s. 59 - 63.
13. Z. ŚNIADKOWSKI, *Pomiar drgań fundamentu turbozespołu 19 MW*. Inż. i Bud. nr 5/1958, s. 173 - 174.
14. B. KOUNOVSKY, *Nové poznatky o kmitání zakladu pod turboagregáty*. Symp. Dynamics of Structures. Praga 1959, Ref. s. 39 - 63.
15. M. NOVAK, *Axiální kmitání ložiskových stojanu generátora*. Stavebnický Časopis, Bratislava 1960, nr 5/6, s. 324 - 339.
16. А.И. АБАШИДЗЕ, *Динамика фундаментов паровых турбин*. Москва-Ленинград Госэнергоиздат 1960.
17. J. PAŁKA, *Analiza drgań fundamentów pod turbozespoły*. Inż. i Bud. nr 2, 1962, s. 66 - 70
18. M. NOVAK, *On some dynamical problems of turbomachinery frame foundations*. Proc. RILEM Symp. 1, Budapest 1963, s. 215 - 234.
19. А.И. АБАШИДЗЕ, С.А. БЕРЕНСТЕЙН, Ф.В. СЛОЖНИКОВ, *Фундаменты паровых турбин (турбогенераторов)*, Москва-Ленинград, Госэнергоиздат, 1963
20. A. NESITKA, *Federnd gelagerte Dampfturbinenfundamente*, Bauingenieur 39/1964/H.6, s. 228 - 230.
21. О.А. СЛАВИНОВ, *Современные конструкции фундаментов под машины и их расчёт*. Ленинград-Москва, Стойиздат, 1964.

22. А.И. АБАШИДЗЕ, А.Т. КАЗАНДЖЯН, *Сборные железобетонные фундаменты под турбоагрегаты*. Энергетическое Строительство нр. 41/1964, с. 3 - 7.
23. Г.Г. АРГАНОВСКИЙ, *Натурное обследование сборных железобетонных фундаментов под крупные турбоагрегаты*. Энергетическое Строительство нр. 6/1966, с. 71 - 74.
24. А.И. АБАШИДЗЕ, Ф.В. САПОЖНИКОВ, А.Т. КАЗАНДЖЯН, *Фундаменты машин тепловых электростанции*. Москва, Энергия, 1975.
25. A. GARSTECKI, A. WEGNER, *Badania dynamiczne fundamentów ramowych pod turbozespoły dużej mocy*. Inż. i Bud. nr 2/1977, s. 65 - 69.
26. A. WEGNER, H. LITWINOWICZ, *Analiza drgań zmodernizowanych żelbetowych fundamentów ramowych pod turbozespoły o mocy 200 MW*. Zesz. Nauk. PP — seria: Budownictwo Lądowe nr 25/1980, s. 13 - 28.
27. A. WEGNER, *Wpływ zarysowania fundamentu na zmianę jego charakterystyki dynamicznej i na pracę turbozespołu*. Energetyka nr 3/1981, s. 83 - 86.
28. A. WEGNER, *Wpływ elektropetryfikacji podłoża na zmianę wartości amplitud drgań żelbetowego fundamentu pod turbozespół 200 MW*. Konf. Nauk. nt. Geotechniczne problemy Wielkopolski — połączona z Sesją wyjazdową Sekcji Mech. Gruntów, Skał i Fundamentowania KI LiW PAN, Poznań 1978, Materiały s. 167 - 171.
29. A. WEGNER, *Badanie wpływu pracy maszyn sąsiednich i towarzyszących na fundamenty turbozespołów dużej mocy*. Zesz. Nauk. PP — seria: Budownictwo Lądowe (w druku).
30. A. SCHÖNBURG, *Richtlinien für den Bau von Dampfturbinen-Fundamenten in Eisenbeton*. Bauingenieur 10/1929/H.46, s. 814 - 816.
31. E. RAUSCH, *Maschinenfundamente und andere dynamische Bauaufgaben*. 3 Teil, Berlin, VDI-Verlag 1942.
32. H. WEBER, *Über das gemeinsame Schwingungsverhalten von Welle und Fundament bei Turbinenanlagen*. VDI-Berichte nr 48/1961, s. 55 - 62.
33. E. KRÄMER, *Über die Laufruhe von Turbogruppen*. VDI-Berichte nr 48/1961, s. 63 - 69.
34. I. KISIEL, *Dynamika fundamentów pod maszyny*. Warszawa, PWN, 1957.
35. J. KOŻEŚNIK, *Dynamika maszyn*. Warszawa, WNT, 1963.
36. И.С. ЛИПСМАН, А. Т. МУЗИКА, В. С. ЛИПСМАН, *Предупреждение и устранение вибраций роторных машин*. Киев, Издат „Техника”, 1968.
37. R. ŁĄCZKOWSKI, *Drgania elementu turbin ciepłych*. Warszawa, WNT, 1974.
38. R. ŁĄCZKOWSKI, *Podstawy diagnostyki stanu dynamicznego turbozespołu*. Energetyka nr 3/1968, s. 89 - 93.
39. E. TULISZKA, *Turbiny ciepłe. Zagadnienia termodynamiczne i przepływowe*. Warszawa, WNT, 1973.
40. R. ŁĄCZKOWSKI, *Wzdłużne drgania własne wału napędowego o stałej średnicy*. Przegląd Mechaniczny 34/1975/3, s. 77 - 81.
41. R. ŁĄCZKOWSKI, *Wzdłużne drgania własne wału napędowego o zmiennej średnicy*. Przegląd Mechaniczny 34/1975/5, s. 149 - 153.
42. Z. WALCZYK, *Wyznaczenie krytycznych obrotów oraz amplitud drgań wielopodporowego wału turbogeneratora z uwzględnieniem sprężystego powiązania podpór wału oraz filmu olejowego*. Konf. Nauk. nt. Metod numerycznych w mechanice, Gdańsk 1972, Materiały s. 115 - 118.
43. J. GLIENICKE, *Veränderungen im Schwingungsverhalten gleitgelagerter Wellen infolge von Zusatzeinflüssen*. VDI-Berichte nr 320/1978, s. 1 - 8.
44. E. KRÄMER, *Gemeinsame Schwingungsberechnung von Rotor und Fundament bei Turbomaschinen*. VDI-Berichte nr 381/1980, s. 121 - 127.
45. A. MUSZYŃSKA, *Modelowanie i analiza dynamiczna wirników*. Prace IPPT PAN nr 52/1975, Warszawa 1975.
46. E. RAUSCH, *Richtlinien für den Bau von Dampfturbinen-Fundamenten in Eisenbeton*. Bauingenieur 14/1933/H. 15/16, s. 227 - 228.
47. DIN 4024. *Dampfturbinenfundamente. Richtlinien für die Berechnung und Ausführung*. September 1951. Bauingenieur 27/1952/H.3, s. 106 - 108.
48. DIN 4024. *Stützkonstruktionen für rotierende Maschinen (vorzugsweise Tisch-Fundamente für Dampfturbinen)*. Januar 1955.
49. J. JÄNISCH, *Neuere Erkenntnisse für die Schwingungsberechnung von Turbinenfundamenten*. Bauplanung- und Bautechnik nr 2/1958, s. 73 - 76.

50. М. Ф. МАКАРОЧКИН, Ю. А. СОВОЛЕВСКИЙ, *Фундаменты под машины*. Минск, Госиздат БССР, 1958.
51. П. А. ГУТИДЗЕ, *Расчёт фундаментов рамного типа под турбогенераторы на действие продольных возмущающих сил*. Изв. ТНЦСГЭИ, т. 10, 1958.
52. Cz. KŁOŚ, J. LIPIŃSKI, *Fundamenty pod maszyny*. Warszawa, Arkady 1959.
53. E. RAUSCH, *Maschinenfundamente und andere dynamisch beanspruchte Baukonstruktionen*. VDI-Kommission Verlag. Dusseldorf 1959.
54. *General Electric Co.: Steam turbine-generator foundations*. GET-1749-B-C, USA, 1961 - 1967.
55. E. KRYNICKI, W. WŁODARCZYK, *Projektowanie fundamentów pod maszyny. Przykłady*. Warszawa, Wyd. Politechniki Warszawskiej, 1964.
56. G. KLEIN, *Dynamische Berechnung von Turbineifundament*. Berlin, W. Ernst u. Sohn, Verlag, 1965.
57. G. KLEIN, *Entwicklung und Stand der Berechnung von Fundamenten für Dampfturbosätze*. Bautechnik nr 6/1966, s. 192 - 195; nr 8/1966, s. 284 - 287.
58. PN-67/B-3040. *Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny. Obliczenia i projektowanie*. Warszawa, Wyd. Normalizacyjne 1967.
59. J. LIPIŃSKI, *Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny*. Warszawa, Arkady 1969.
60. W. HERRMANN, *Schwingungsbeanspruchung von Maschinenfundamenten*. Berlin, VEB Verlag Technik, 1954.
61. A. MAJOR, *Berechnung und Planung von Maschinen — und Turbinenfundamenten*. Berlin, VEB Verlag für Bauwesen, 1961.
62. G. BUZDUGAN, *Dynamique des Fondations Machines*. Paris, Editions Eyrolles 1972.
63. A. MAJOR, *Dynamics in Civil Engineering*. Vol. I - IV, Foundations for high speed machinery Vol. III, Budapest, Akademiai Kiado, 1980.
64. PN-80/B-3040. *Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny. Obliczenia i projektowanie*. Warszawa, Wyd. Normalizacyjne, 1981.
65. R. CIESIELSKI, *Aktualne kierunki badań doświadczalnych elementów i konstrukcji*. Czasopismo Techniczne nr 7/1969, s. 1 - 7.
66. R. CIESIELSKI, *Diagnostyka dynamiczna w budownictwie*. Konf. Nauk. Techn. nt. Oceny szkodliwości wpływów dynamicznych na budynki i konstrukcje inżynierskie. Kraków, 1971, Materiały T. 1, s. 5 - 20.
67. W. WŁODARCZYK. *Doświadczenia z badań dynamicznych fundamentów i konstrukcji obciążonych maszynami*. Zesz. Nauk. Pol. Warszawskiej, Budownictwo nr 12, Warszawa 1970, s. 51 - 90.

Резюме

ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ НА ФОНЕ ПРОВЕДЁННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В статье изложено актуальное знание относительно вынужденных продольных колебаний фундаментов турбогенераторов.

Представлены, полученные до сих пор, экспериментальные динамические исследования на моделях и эксплуатируемых фундаментах.

Обнаружено появление больших продольных колебаний фундаментов, увеличивающихся вместе с мощностью турбогенераторов.

Обсуждены на фоне проведённых исследований попытки выяснить причины продольных колебаний и тоже — образ математического вычисления продольных вынужденных сил.

Summary

THE LONGITUDINAL VIBRATIONS OF LARGE-TURBO-GENERATOR FOUNDATIONS ACCORDING TO THE EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS

Up to date state of knowledge on the forced vibrations of turbogenerator foundations in the longitudinal direction is reviewed and discussed in the paper.

Existing experiments both on the dynamically loaded foundations and on the model of the fram foundations are presented as well.

It was found that the longitudinal amplitudes of the foundation — vibrations are large and increase with the power rating.

Explanation of the phenomenon of longitudinal vibrations, as well as computation methods for the longitudinal dynamic load are outlined.

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 5 lutego 1986 roku.
