12. KSZTAŁTOWANIE FUNDAMENTÓW POD STACJONARNE WIBROPRASY DO BETONU CZĘŚĆ 1: ZAGADNIENIA TEORETYCZNE

1. WPROWADZENIE

Problem optymalizacji parametrów pracy linii produkcyjnej do betonu wibroprasowanego jest zagadnieniem złożonym. Z tego względu, w prowadzonej analizie przydatne jest opieranie się na układzie modelowym. Wibroprasa do betonu jest układem dynamicznym, poddanym drganiom wymuszonym. Wymuszenie jest realizowane najczęściej poprzez pracę dwóch zestawów wibratorów. Pierwszy zestaw stanowi element stołu wibracyjnego i jest uruchamiany podczas etapu zasypywania formy mieszanką betonową (tzw. wibracja pośrednia). Drugi zestaw wibratorów (fot. 1) jest zintegrowany z konstrukcją stempla i bierze udział w końcowym wibroprasowaniu.

Fot. 1. Wibratory zintegrowane z konstrukcją stempla wibroprasy (fot. Ł. Mrozik)

Fot. 1. The block making machine integrated witch vibration isolators (photo by Ł. Mrozik)

Istotą stosowania wibracji w zagęszczaniu mieszanki jest wprowadzenie jej w drgania zbliżone do częstości drgań własnych tego ośrodka. Powoduje to przejście tej zawiesiny w stan zbliżony do lepkiej cieczy, w której tarcie wewnętrzne i siły ciężkości tracą na znaczeniu, a wzajemne przemieszczenia cząstek fazy stałej są uwarunkowane działaniem siły wymuszającej. W wibracyjnym zagęszczaniu mieszanki betonowej szczególne znaczenie mają dwa parametry pracy urządzenia wibrującego, tj. częstość pracy oraz amplituda drgań. Częstość wynika bezpośrednio z parametrów mechanicznych i elektrycznych użytych silników, zaś amplituda zależy od właściwości mecha-

AGNIESZKA GRZYBOWSKA, ŁUKASZ MROZIK
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

nicznych całego układu. Parametry te zależą od masy i sztywności poszczególnych elementów maszyny, jak również od rodzaju produkowanego asortymentu, który determinuje masę oraz właściwości mieszanki betonowej.

Jak wspomniano wcześniej, problem optymalizacji parametrów pracy wibroprasy, z uwagi na uzyskanie najwyższej efektywności zagęszczania, jest niezwykle ważny. Dynamiczny charakter oddziaływań pociąga jednak za sobą dodatkowe efekty. Mowa tutaj o oddziaływaniu maszyny na podłoże gruntowe. Przenoszone drgania wpływają bowiem na komfort pracy ludzi i w dłuższej perspektywie mogą decydować o wydajności zespołu roboczego. Nie należy także zapominać o szkodliwym wpływie drgań na organizm człowieka [2]. Dodatkowym, niekorzystnym efektem drgań podłoża są powstające – szczególnie przy źle zoptymalizowanym układzie – defekty zaformowanych elementów (fot. 2). Wpadające w wibracje taśmociągi, przenoszące blaty ze świeżymi wyrobami, powodują bowiem rozluźnienie mieszanki i tym samym spękania, deformacje czy też dezintegrację. Dodatkowe informacje w tym zakresie zostaną przedstawione w drugiej części niniejszej publikacji.

Fot. 2. Widoczne po prawej stronie spękania świeżych obrzeży betonowych spowodowane drganiami przenoszonymi z podłoża na taśmociąg (fot. Ł. Mrozik)

Fot. 2. Visible on the right side cracks of fresh concrete edges caused by transmitted from the ground to the conveyor vibrations (photo by Ł. Mrozik)

Należy w tym miejscu podkreślić, że opisane powyżej zagadnienie nie zostało do tej pory szczegółowo opisane w teorii. W praktyce wykorzystywane są bowiem przede wszystkim spostrzeżenia doświadczalne. Bardzo często jednak brakuje możliwości identyfikacji przyczyn problemów, występujących podczas produkcji, jedynie poprzez obserwację procesu oraz stosowanie tzw. metody prób i błędów podczas optymalizacji układu. Z tego względu aktualny stan wiedzy w tym zakresie uznano za niewystarczający i zaproponowano praktyczne wykorzystanie znanych z dynamiki zależności do opisu pracy układu, jakim jest stacjonarna wibroprasa do betonu wraz z zagęszczaną mieszanką.

2. WYBRANE ZAGADNIENIA DYNAMIKI BUDOWLI DOTYCZĄCE PROJEKTOWANIA WIBROIZOLACJI I FUNDAMENTÓW POD MASZYNY

Drgania układów powstają na skutek naruszenia równowagi układu mechanicznego. Układ ten charakteryzuje − w zależności od liczby stopni swobody − częstość drgań własnych. Zmniejszenie negatywnych efektów generowanych przez pracującą maszynę może nastąpić poprzez wprowadzenie do układu izolacji drgań, polegającej na umieszczeniu pomiędzy drgającą maszyną a jej fundamentem odpowiednich elementów sprężysto-tłumiących. Jest to wibroizolacja czynna, zwana także siłową, której celem jest zapobieżenie przenoszenia się sił dynamicznych do podłoża, np. podczas pracy wibroprasy. Często wystarczające okazuje się dobranie masy i geometrii posadowienia. Wibroizolację stosuje się tylko w przypadku, gdy powyższy zabieg okazuje się niewystarczający. Ma ona na celu redukcję przenoszenia drgań z maszyny na podłoże lub elementy mocujące. Skuteczność wibroizolacji jest tym większa, ich większy jest stosunek częstości Ω/ω, gdzie Ω to częstość siły wymuszającej, a ω – częstość drgań własnych. Oznacza to, że przy danej częstości Ω, należy dążyć do uzyskania możliwie niskiej wartości ω. Obniżenie częstości ω można osiągnąć przez zmniejszenie sztywności układu k lub wzrost masy układu m. W przypadku konieczności odizolowania urządzenia od drgającego podłoża stosuje się wibroizolację bierną, zwaną też przemieszczeniową [3]. Ten typ wibroizolacji, w odniesieniu do rozważanego układu, znajduje zastosowanie przy taśmociągach przenoszących blaty ze świeżymi wyrobami. Nieodizolowana prawidłowo od fundamentu wibroprasa może wprowadzać podłoże w drgania, które następnie mogą przenosić się na taśmociągi. Ważnym czynnikiem doboru wibroizolatorów w przypadku pras jest rodzaj wymuszenia [1], bowiem maszyny pracujące z wymuszeniami okresowymi są narażone na zjawisko rezonansu. Rezonans jest zjawiskiem zachodzącym w układach drganiowych, gdy częstość drgań wymuszających ω jest równa lub bliska którejkolwiek częstości drgań własnych ω_0.

Rezonans polega na szybkim wzroście amplitudy drgań układu fizycznego, tym większym, im mniejsze jest tłumienie drgań w układzie. Charakterystykę rezonansową układu przedstawia krzywa rezonansowa, na podstawie której stwierdzić można, że im szersza jest krzywa rezonansowa, tym łatwiej jest pobudzić układ drganiowy do drgań wymuszonych − układ jest mniej selektywny. Skończona wartość amplitudy drgań rezonansowych wynika z tego, że w układach rzeczywistych część energii zostaje stracona − układ jest dyssypatywny [4]. Zjawisko rezonansu może spowodować znaczny wzrost amplitudy drgań, a w konsekwencji może dojść do nadmiernych (niepożądanych) przemieszczeń układu. W przypadku silnego tłumienia może w ogóle nie dojść do rezonansu. Wibroizolacja jest skuteczna, gdy częstość siły wymuszającej jest co najmniej $\sqrt{2}$ razy większa od częstości drgań własnych układu dynamicznego. Im bardziej elastyczne jest podparcie maszyny, tym zazwyczaj wyższa jest efektywność wibroizolacji. Bardzo istotne jest możliwie dokładne wyznaczenie położenia środka ciężkości układu składającego się z fundamentu i maszyny. Częstość siły wzbudzającej powinna być 2,5-krotnie większa od dowolnej częstości drgań własnych układu.

W rozważaniach dotyczących projektowania wibroizolacji i fundamentów pod wibroprasy przyjmuje się, że:

- fundament jest bryłą sztywną o 6 stopniach swobody;
- moment bezwładności układu (zarówno fundamentu, jak i maszyny), wyznaczany jest przy założeniu, że są one ze sobą sztywno połączone;

- bardzo istotne jest możliwie dokładne wyznaczenie położenia środka ciężkości układu składającego się z fundamentu i maszyny;
- układ fundamentu i rozmieszczenie wibroizolacji należy tak projektować, żeby odległość w pionie między środkiem ciężkości układu a środkiem sztywności wibroizolatorów była jak najmniejsza;
- wibroizolatory, jeżeli są konieczne, należy dobierać tak, żeby uzyskać odpowiednio niską częstość drgań własnych. Ze względu na masę, układ fundamentu i maszyny ze wszystkimi urządzeniami i elementami pomocniczymi w większości przypadków nie wymaga wibroizolacji, natomiast bardziej podatny na drgania jest stempel, a jako jego wibroizolację stosuje się gumowe tuleje;
- rozważany fundament jest fundamentem blokowym lub dwudzielnym. Fundamenty blokowe mają postać masywnej bryły, są kształtu regularnego. Charakteryzuje je duża sztywność, traktuje się je jak ustroje nieodkształcalne, posadowione sprężyście. Ich zdolność do wyhamowywania drgań zależy od sprężystości gruntu lub podłoża;
- jako podpory stołów wibracyjnych stosuje się zazwyczaj sprężyny walcowe w zespole z dodatkowymi tulejami gumowymi;
- fundamenty stołów powinny być dokładnie oddzielone od sąsiednich fundamentów i podłogi dylatacjami wypełnionymi łatwo ściśliwymi materiałami;
- na fundamenty tego rodzaju należy stosować beton klasy co najmniej C20/25;
- miejsce robocze na fundamencie powinno być zabezpieczone od wpływu drgań;
- dopuszczalny jest 3% mimośród (wymiaru podstawy fundamentu równoległego do kierunku przesunięcia siły wzbudzającej w stosunku do kierunku przesunięcia siły wzbudzającej w stosunku do środka ciężkości układu) działania sił wzbudzających pionowych w stosunku do środka ciężkości podstawy fundamentu, jeżeli pełne wycentrowanie nie jest możliwe [3].

W odniesieniu do rozważanego problemu stosowane są dwa układy. Układ o jednym stopniu swobody wykorzystywany jest w projektowaniu wibroizolacji stempla w celu zminimalizowania drgań przenoszonych na korpus (ramę) maszyny. Wibroizolatory stempla to najczęściej podkładki gumowe lub układy gumowo-stalowe (sprężyny). W ten sposób można także określić optymalną amplitudę odpowiedzi układu, która wpływa na efektywność zagęszczenia mieszanki betonowej. W tym przypadku masa m_1 to masa stempla z wibroizolatorami i mieszanką betonową, a c_1 i k_1 to parametry wibroizolacji stempla, co przedstawiono na rysunku 1b.

Układ o dwóch stopniach swobody służy do oceny odpowiedzi układu dynamicznego, jaki stanowi cała wibroprasa posadowiona na podłożu gruntowym. W tym przypadku stosuje się oznaczenia jak wyżej, a ponadto wprowadza się (rys. 1a): m_2 – masę korpusu (ramy) maszyny ze wszystkimi urządzeniami i elementami pomocniczymi, jak np.: zasobniki, szuflady zasypujące, siłowniki, blat, forma itp. oraz ewentualną mieszankę betonową znajdującą się w szufladach i w zasobnikach, jak również masę fundamentu blokowego; c_2, k_2 – parametry podłoża gruntowego z ewentualną wibroizolacją (która stosowana jest rzadko). Model ten może być szczególnie przydatny do optymalizacji geometrii i masy fundamentu blokowego pod maszynę.

Rys. 1. Schematy wibroprasy przy a) wibroizolacji dwustopniowej; b) wibroizolacji jednostopniowej [4]

Fig. 1. Diagrams of the block making machine with a) two-stage vibration isolation; b) a single-stage vibration isolation

Równanie ruchu dla układu jednomasowego jest następujące:

$$m_1 \cdot \ddot{x}_1 + k_1\, x + c_1\, \dot{x} = F \tag{1}$$

a dla układu dwumasowego układ równań przyjmie poniższą postać:

$$\begin{gathered} m_1 \cdot \ddot{x}_1 + k_1\,(x_1 - x_2) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = F \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 + k_2 x_2 - \; k_1(x_1 - x_2) + c_2\dot{x}_2 - c_1(\,\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0 \end{gathered} \tag{2}$$

gdzie:

m_1 – masa stempla z wibroizolatorami, kg,
m_2 – masa ramy wraz z masą dodatkową, kg,
k_1, k_2 – współczynniki sztywności, N/m,
c_1, c_2 – stałe tłumienia, Hz.

Współczynnik przenoszenia drgań układu określa, czy wibroizolacja jest skuteczna. Określa się go jako stosunek wartości maksymalnej całkowitej siły działającej na fundament do amplitudy siły wymuszającej. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie krzywych rezonansowych dla układu jedno- i dwumasowego, gdzie η oznacza stosunek częstości Ω/ω.

Rys. 2. Porównanie współczynników przenoszenia dla układu jedno- i dwumasowego [4]
Fig. 2. Comparison of transfer coefficients for the single- and dual mass

Z porównania współczynników przenoszenia dla układu jednomasowego (wibroizolacja jednostopniowa) i dwumasowego (wibroizolacja dwustopniowa) wynika, że przenoszenie drgań nie zostaje zredukowane w niskim zakresie częstości, jest natomiast mniejsze głównie w zakresie częstości ponadrezonansowych, tj. od $\eta > 1{,}3$.

3. PODSUMOWANIE

Zmniejszenie negatywnych efektów wynikających z pracy wibroprasy, przedstawionych w tym artykule, realizowane może być poprzez wprowadzenie do układu wibroizolacji. Skuteczność wibroizolacji jest tym większa, im większy jest stosunek częstości siły wzbudzającej do drgań własnych maszyny. Najczęściej maszynę stawia się na podłożu gruntowym wzmocnionym fundamentem blokowym o odpowiednio dobranej masie, a optymalizacji mogą podlegać jedynie gumowe lub gumowo-stalowe wibroizolacje stempla.

LITERATURA

[1] Fiebig W., 2013. Wibroizolacja dwustopniowa na przykładzie wstrząsarki. XVI Międzynarodowa Konferencja Noise Control 2013, Ryn.
[2] Kawecki J., Stypuła K., 2011. Naruszenie wymagań dotyczących zapewnienia ludziom w budynku niezbędnego komfortu wibracyjnego jako stan zagrożenia awaryjnego. Inżynieria i Budownictwo 5, 266-269.
[3] Lipiński J., 1985. Fundamenty pod maszyny. Arkady Warszawa.
[4] Żółtowski B., Łukasiewicz M., 2012. Diagnostyka drganiowa maszyn. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji − Państwowego Instytutu Badawczego Bydgoszcz.

CONSTRUCTION OF FOUNDATION FOR STATIONARY VIBROPRESSED CONCRETE MACHINE PART 1: THEORETICAL ISSUES

Summary. In this article, authors attempted to detailed analysis of construction of foundation structures for vibropressed elements production lines. Brief outline of this product group has been made. Authors emphasized, that high strength performance, aesthetics and durability are characteristics expected from so. small-sized concrete gallantry. Technical and technological factors which guarantee assumed characteristics of the product has been specified. Authors identified most common defects and showed, which of them can be the result of insufficient technical state of production line. In order to determine the causes of malfunction of vibro-press, detailed analysis of machine-foundation-base configuration has been performed. Particular attention has been focused on phenomenon of resonance in individual elements of production line. For selected example implementation, authors indicated selected errors in installation and setup of the machine.

In the first part of publication authors presented selected issues of structure dynamics applicable to machine fuondations constructing.