



## Metoda szybkiego projektowania mostu składanego opartego na podporach pływających

JAN MARSZAŁEK, MIECZYŚLAW PIECHOTA

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,  
Katedra Inżynierii i Komunikacji, Warszawa,  
jan.marszalek@wat.edu.pl, mieczyslaw.piechota@wat.edu.pl

**Streszczenie.** Artykuł obejmuje metodykę szybkiego projektowania mostu składanego opartego na podporach pływających. Metodyka ta zawiera analizę możliwości wykorzystania bloków pontonowych z parku PP-64 jako podpory pływające dla mostu składanego DMS-65, budowanego jako przeprawa tymczasowa w warunkach cywilnych. Analizę tę przeprowadzono dla obciążenia pojazdem w ruchu. Jej wyniki, opracowane w formie nomogramów, umożliwią szybkie projektowanie przepraw w różnych układach konstrukcyjnych.

**Słowa kluczowe:** budownictwo lądowe, mosty składane, podpory pływające

**DOI:** 10.5604/12345865.1223256

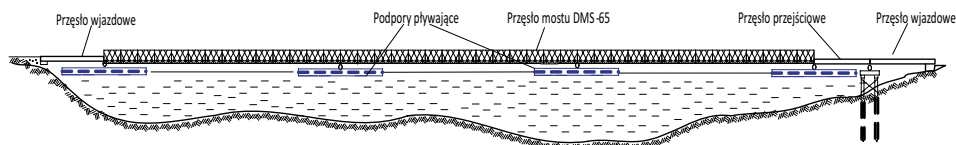
### 1. Wprowadzenie

W niniejszym artykule przedstawiono analizę pracy mostu składanego opartego na podporach pływających, obciążonego poruszającym się pojazdem. W jej wyniku określono wpływ parametrów eksploatacyjnych na dynamiczne wartości momentów zginających i ugięć w odniesieniu do ich wartości dopuszczalnych. Następnie opracowano przykładowe nomogramy do obliczania momentów zginających w moście i ugięć na podporze najbardziej obciążonej.

W artykule [3] przedstawiono metodę szybkiej oceny nośności mostów składanych opartych na podporach pływających pod obciążeniem statycznym. W rozważaniach tych nie uwzględniono zachowania się podpór pływających. W rozprawie

doktorskiej [4] odniesiono się do możliwości budowy mostów składanych na podporach pływających przy wykorzystaniu wszelkiego rodzaju barek rzecznych i promów. Takie rozwiązanie konstrukcyjne daje możliwość szybkiej budowy przeprawy tymczasowej. Zastąpienie podpór stałych pływającymi znacznie przyspieszy proces budowy przeprawy zastępczej, ponieważ budowa podpór stałych jest czasochłonna i w głównej mierze decyduje o czasie budowy całego mostu. Jest to szczególnie ważne przy krótkotrwałej eksploatacji.

Niniejszy artykuł jest kontynuacją i uszczegółowieniem tych analiz. Obejmuje on analizę pracy konstrukcji składanego mostu DMS-65 opartego na podporach pływających montowanych z bloków pontonowych z zestawu parku PP-64, w warunkach cywilnej eksploatacji. Schemat części rzecznej analizowanego mostu kombinowanego przedstawiono na rysunku 1.1.



Rys. 1.1. Przykład przeprawy kombinowanej

W następnym rozdziale przedstawiono krótkie charakterystyki analizowanych konstrukcji: drogowego mostu składanego DMS-65 oraz podpór pływających montowanych z bloków pontonowych z parku PP-64. Określono tym samym dane do analizy numerycznej, którą wykonano za pomocą programu komputerowego *most-kombinowany*, opracowanego w ramach rozprawy doktorskiej.

W końcowej części artykułu przedstawiono nomogramy do określania zestawu mostu kombinowanego w odniesieniu do poszczególnych warunków eksploatacyjnych.

## 2. Charakterystyka konstrukcji mostu kombinowanego

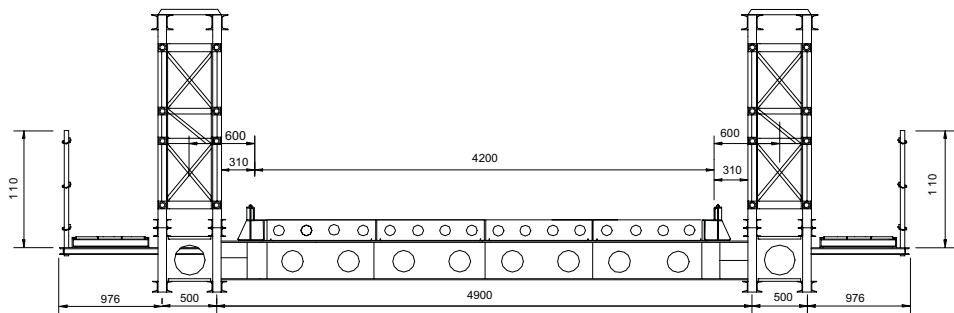
### 2.1. Charakterystyka konstrukcji przęsłowej mostu DMS-65

Zestaw DMS przeznaczony jest do szybkiej i wielokrotnej budowy i odbudowy zniszczonych wysokowodnych mostów o różnej długości na dowolnych podporach. Most ten może być stosowany również w gospodarce narodowej do szybkiej budowy tymczasowych i półstałych mostów. Do zestawu wchodzi konstrukcja przęsłowa w układzie podstawowym o łącznej długości 99 m + 6 m w układzie przęseł wjazdowych. Z elementów mostu buduje się przęsła o rozpiętości do 45 m, z modułem zmiany długości 3 m. Elementy mostu są skonstruowane w taki sposób, żeby

można było montować z nich różne układy konstrukcji przęseł i jezdni w zależności od warunków terenowych i potrzeb użytkownika:

- układ podstawowy;
- układ wzmocniony nakładką;
- układ z jezdnią górą;
- trzydziwigarowy z dwiema jezdniami;
- układ poszerzony wzmocniony nakładką;
- przęsło wjazdowe;
- przęsło wjazdowe z podwójnych krat przestrzennych.

Najczęściej stosowanym i najprostszym układem konstrukcyjnym jest układ podstawowy. Przekrój poprzeczny mostu w tym układzie pokazano na rysunku 2.1. Maksymalne obciążenie wynosi 400 kN. Szybkość jazdy po moście pojazdów kołowych do 40 km/h, pojazdów gąsienicowych do 30 km/h. Podstawowe elementy przęsłowe mostu przedstawiono w literaturze [2].



Rys. 2.1. Przekrój poprzeczny mostu DMS-65 w układzie podstawowym [2]

## 2.2. Charakterystyka podpór

W analizowanym układzie mostu kombinowanego za podpory pływające przyjęto bloki pontonowe wchodzące w skład zestawu parku pontonowego PP-64. Park ten służy do budowy przepraw mostowych i promowych. Ze sprzętu parku pontonowego można budować na naturalnych i sztucznych przeszkodach wodnych promy przewozowe i mosty pontonowe, które umożliwiają przeprawę gąsienicowych i kołowych pojazdów mechanicznych o masie całkowitej do 40 t — w układzie wstęgi pojedynczej oraz do 80 t — w układzie wstęgi podwójnej. W skład kompletu parku pontonowego wchodzi:

- 48 bloków pontonowych pływających;
- 6 bloków pontonowych brzegowych;
- 48 samochodów STAR 266 AP-64;

- 6 samochodów STAR 266 BP-64;
- ciągnik burtowy;
- kuter holowniczy KH-200;
- środki pomocnicze.

Ze sprzętu parku pontonowego można zbudować:

- most jednokierunkowy w układzie wstęga pojedyncza o długości 186 m;
- most dwukierunkowy w układzie wstęga podwójna o długości 97 m;
- 2 promy o dużej powierzchni *ładowania*;
- 3 promy o nośności 80 t;
- 6 promów o nośności 40 t.

Funkcję podpór pływających w analizowanym moście kombinowanym pełnić będą promy przewozowe w różnych układach konstrukcyjnych. Zasadniczym elementem promu są bloki pontonowe pływające transportowane na specjalnych samochodach STAR 266 AP-64 (rys. 2.2). Pojedynczy blok pontonowy składa się z dwóch pontonów: lewego i prawego z wyposażeniem. Pontony w bloku są połączone za pomocą zamka stałego zaczepu głównego i zamka stałego zaczepu głównego z uchwytem do liny. Pontony pływające lewy i prawy, wchodzące w skład bloku, to kadłuby spawane składające się z przestrzennego szkieletu i poszycia. Zasadnicze dane techniczne bloku pontonowego są następujące:

- masa — 3000 kg;
- długość — 6,25 m;
- szerokość — 3,70 m;
- wysokość — 0,895 m.

Szczegółowe dane techniczne i eksploatacyjne przedstawione są w instrukcji [5].



Rys. 2.2. Widok bloku pontonowego pływającego na samochodzie STAR 266 AP-64

### 3. Analiza pracy mostu składanego opartego na podporach pływających

#### 3.1. Wstęp do analizy

W tym rozdziale przedstawiono analizę pracy mostu składanego DMS-65 opartego na podporach pływających zmontowanych z bloków pontonowych z zestawu parku PP-64. Analiza ta ma na celu określenie wpływu parametrów eksploatacyjnych, takich jak: wielkość luzów montażowych, podatności podpór oraz rozpiętości przęsła oraz prędkość poruszającego się pojazdu na nośność mostu składanego oraz zanurzenie podpór pływających. Analizę wykonano na podstawie równania różnicowego 3.1 oraz warunków brzegowych 3.3 i początkowych 3.4, przedstawionych szczegółowo w pracy [4].

$$\begin{aligned}
 & y_{i-2,k} - 4y_{i-1,k} + (6 + D_{kp}\delta_r + \alpha^2(q - p\delta_{i,k}))y_{i,k} - (4 - 2p\delta_{i,k}\alpha^2)y_{i+1,k} + y_{i+2,k} = \\
 & = qK^2 + p(K^2 - \alpha^2h^2\beta^2)\delta_{i,k} + p\delta_{i,k}\alpha^2(y_{i+1,k-1} + 2y_{i,k-1} - y_{i-1,k-1} - y_{1,k-2}) \\
 & + q\alpha^2(2y_{i,k-1} - y_{i,k-2}),
 \end{aligned} \quad (3.1)$$

gdzie:  $K^2 = \frac{h^4}{EJ_z}$ ;

$$\alpha^2 = \frac{h^2}{g} \frac{v^2}{EJ_z};$$

$$\beta^2 = -\frac{M_{sp}}{EJ_{zq}};$$

$$D_{kp} = k_{pr} \frac{h^3}{EJ_z};$$

$h$  — długość kroku [m];

$EJ_z$  — sztywność zastępcza przekroju zginanego mostu [kNm<sup>2</sup>];

$q$  — ciężar jednostki długości mostu [kN/m];

$p$  — intensywność obciążenia zewnętrznego, rozłożonego równomiernie na odcinku kroku  $h$  [kN/m];

$g$  — przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>];

$v$  — prędkość ruchu pojazdu po moście [m/s];

$k_{pr}$  — współczynnik charakteryzujący sprężyste własności podpory [kN/m];

$M_{sp}$  — moment zginający w moście składanym na podporach pływających od ciężaru własnego;

$EJ_{zq}$  — zastępcza sztywność na zginanie mostu od ciężaru własnego;  
 $i$  — kolejny krok podziału różnicowego;  
 $k$  — kolejny krok podziału czasowego;  
 $r$  — miejsca występowania podpór;  
 $\delta_{i,k}, \delta_r$  — całki Kroneckera zgodnie z zależnościami 3.2:

$$\delta_{i,k} = \begin{cases} 1, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases}, \quad \delta_r = \begin{cases} 1, & i = r \\ 0, & i \neq r \end{cases}. \quad (3.2)$$

Warunki brzegowe dla momentów zginających i sił poprzecznych na podporach brzegowych określono wyrażeniami 3.3:

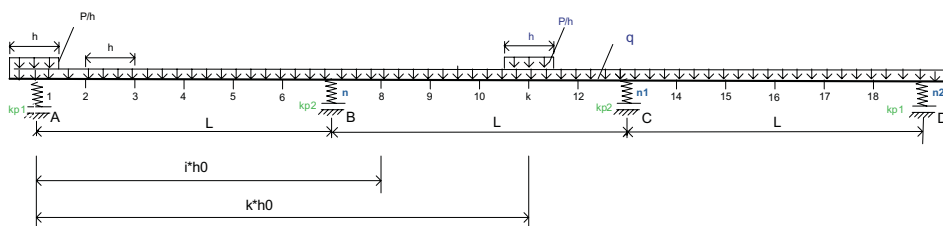
$$M_{1,k} = M_{n2,k} = 0, \quad Q_{1,k} = k_{pr} y_{1,k}, \quad Q_{n2,k} = k_{pr} y_{n2,k}. \quad (3.3)$$

Warunki początkowe w układzie dyskretnym mają postać:

$$y(i, 0) = y_q(i), \quad y(i, -1) = 0, \quad (3.4)$$

gdzie:  $y_q(i)$  — ugięcie mostu od ciężaru własnego.

Model obliczeniowy w układzie dyskretnym przedstawiono na rysunku 3.1. W analizie tej wykorzystano metodykę wyznaczenia sztywności zastępczej dla wieloprzęsłowych belek składanych ciągłych, algorytmy obliczania momentów zginających i ugięć od ciężaru własnego konstrukcji oraz zastępcze sztywności na zginanie z uwzględnieniem funkcji kompensacji momentów podporowych, przedstawione w pracy [4]. Analiza została przeprowadzona za pomocą programu komputerowego *mostkombinowany*, opracowanego w ramach rozprawy doktorskiej.



Rys. 3.1. Model obliczeniowy w układzie dyskretnym

### 3.2. Dane do analizy numerycznej

Przedmiotem analiz jest część rzeczna trójprzęsłowego mostu składanego DMS-65 opartego na promach przewozowych montowanych z parku pontonowego PP-64. Przyjęto równe rozpiętości przęseł oraz stałą zastępczą sztywność

na zginanie dla całego mostu. Na podstawie analizy wyników, przeprowadzonej w pracy [4], określono maksymalny eksploatacyjny luz kątowy w połączeniach między składnikami  $\varphi_0 = 0,004$  rad. Dopuszczalne dodatkowe zanurzenie podpory pływającej przyjęto na poziomie  $\Delta_{zdop} = 0,65$  m na podstawie pracy [1], dotyczącej konstrukcji mostów na oddzielnych podporach, uwzględniając wysokości konstrukcyjne tych podpór ( $h_p = 0,90$  m), ich zanurzenie pod wpływem własnego ciężaru ( $z_g = 0,15$  m) oraz stawiane im wymogi dotyczące zapasu wolnej burty (0,10 m).

Parametry stałe przyjęte do obliczeń są następujące:

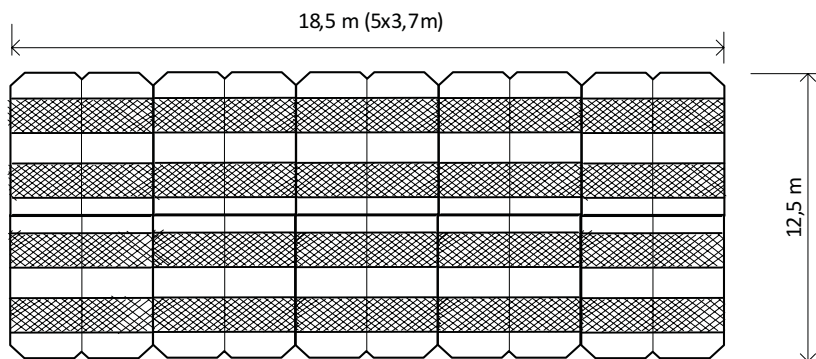
- ciężar własny konstrukcji przęsła  $q = 20$  kN/m;
- sztywność przęsła na zginanie  $EJ = 10^7$  kNm<sup>2</sup>;
- obciążenie zewnętrzne ruchome  $P = 400$  kN;
- długość składnika mostu  $l_0 = 3,0$  m;
- krok  $h_0 = l_0 = 3,0$  m;
- luz kątowy w połączeniach między składnikami  $\varphi_0 = 0,004$  rad;
- dopuszczalne dodatkowe zanurzenie podpory pływającej  $\Delta_{zdop} = 0,65$  m.

Parametry zmienne przyjęte do obliczeń komputerowych są następujące:

- rozpiętość przęsła  $L = 30$  m, 36 m i 42 m;
- współczynniki sprężystości podpór  $k_{p1} = 1600$ ; 2400; 2800 oraz 3200 kN/m;
- prędkości poruszania się obciążenia  $v = 0$ ; 10; 15 i 20 m/s;
- krok czasowy odpowiednio: 0,3 s; 0,2 s; 0,15 s.

Współczynniki sprężystości podpór określone w przeprowadzonej analizie pracy mostu składanego odwzorowują kolejno:

- $k_p = 1600$  kN/m — prom składający się z 8 bloków pontonowych;
- $k_p = 2000$  kN/m — prom składający się z 10 bloków pontonowych (rys. 3.2);
- $k_p = 2400$  kN/m — prom składający się z 12 bloków pontonowych;
- $k_p = 2800$  kN/m — prom składający się z 14 bloków pontonowych;
- $k_p = 3200$  kN/m — prom składający się z 16 bloków pontonowych.



Rys. 3.2. Schemat podpory pływającej z 10 bloków pontonowych pływających [3]

Z jednego zestawu parku możemy zmontować:

- 6 podpór o  $k_p = 1600$  kN/m (most pięcioprzęsłowy);
- 4 podpory o  $k_p = 2000$  kN/m, 1 podporę o  $k_p = 1600$  kN/m (most cztero-przęsłowy);
- 4 podpory o  $k_p = 2400$  kN/m (most trójprzęsłowy);
- 3 podpory o  $k_p = 2800$  kN/m (most dwuprzęsłowy);
- 3 podpory o  $k_p = 3200$  kN/m (most dwuprzęsłowy).

## 4. Opracowanie nomogramów do szybkiego projektowania przepraw

### 4.1. Informacje wstępne

W tym rozdziale przedstawiono analizę wyników uzyskanych z symulowanych obliczeń programem *mostkombinowany* w dwóch aspektach. Pierwszy aspekt dotyczył analizy przemieszczeń podpór pływających pod wpływem ruchomego obciążenia. Przemieszczenia te, w wielu przypadkach, będą decydujące w zakresie określenia dopuszczalnych parametrów eksploatacyjnych, w szczególności przy współczynnikach sprężystości o małych wartościach. Wyniki tej analizy pozwoliły na określenie wpływu właściwości sprężystych podpór i rozpiętości przęseł na zanurzenie podpór pływających przy określonej prędkości poruszającego się pojazdu.

Drugim aspektem analizy było określenie wpływu tych samych parametrów eksploatacyjnych na wielkość momentów zginających w moście przy danym położeniu obciążenia. Istotą tej analizy było znalezienie chwili, dla jakiego  $k$ -tego kroku czasowego moment zginający osiągnie wartość maksymalną.

Zakresy wartości parametrów stałych i zmiennych, uwzględnionych w analizie pracy mostu, określono w poprzednim rozdziale w punkcie dotyczącym danych numerycznych.

### 4.2. Opis nomogramów do wyznaczenia zanurzenia podpory

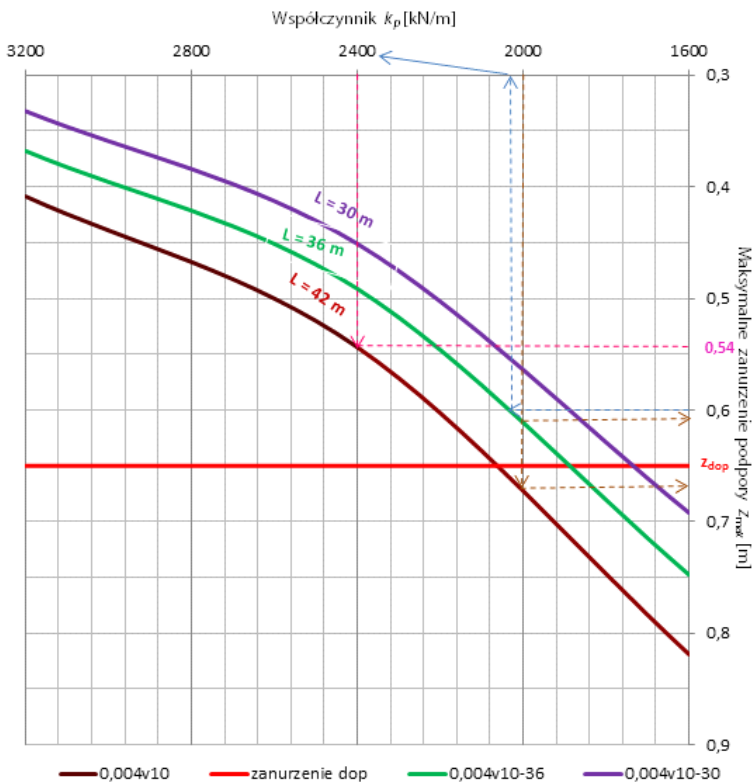
Na podstawie wyników analiz opracowane zostały dwa nomogramy, które mogą posłużyć do szybkiej analizy projektowej danej przeprawy. Na rysunku 4.1 przedstawiono zależności maksymalnego zanurzenia podpór od współczynnika sprężystości podpór  $k_p$  oraz rozpiętości przęseł  $L$  przy maksymalnej prędkości ruchu po moście  $v = 10$  m/s.

Nomogram wykonano dla konstrukcji mocno wyeksploatowanej (założono luz kątowy  $\varphi_0 = 0,004$ ) i obciążenia 400 kN (maksymalne obciążenie dla mostu DMS-65). Pozioma linia koloru czerwonego oznacza wartość dopuszczalnego zanurzenia podpory pływającej ( $z_{dop} = 0,65$  m). Linie ciągle nomogramu przedstawiają rozpiętości przęseł przy prędkości pojazdu 10 m/s. Na osi poziomej



oznaczono kolejno wartości współczynników sprężystości  $k_p$ . Poniżej podano trzy przykłady korzystania z tych nomogramów:

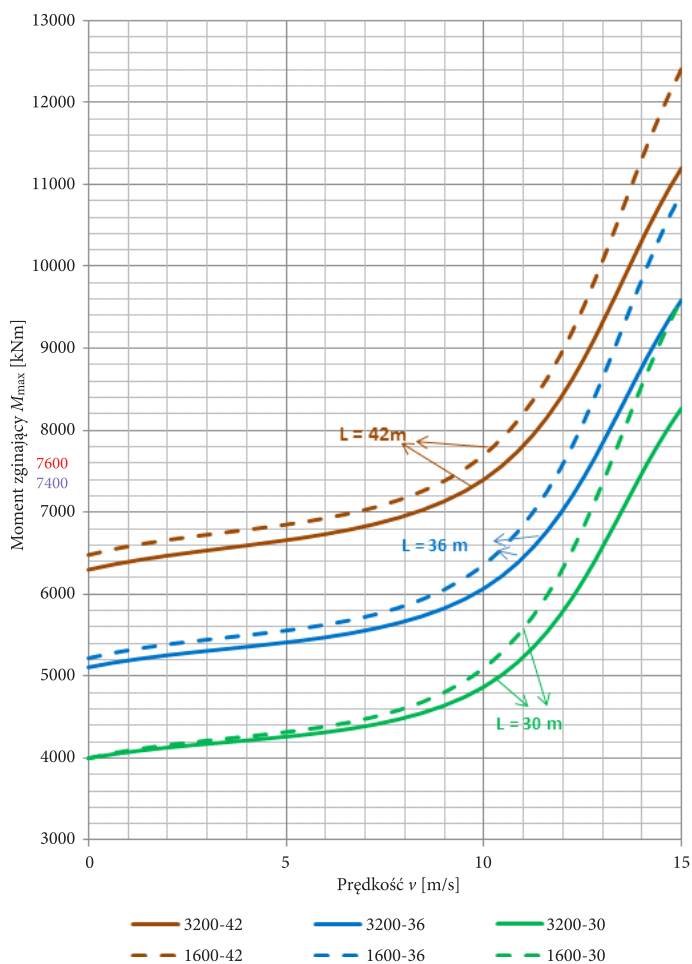
- 1) Wykorzystujemy podpory pływające o współczynniku  $k_p = 2000$  kN/m do oparcia mostu o rozpiętości 42 m. Przy prędkości 10 m/s największe zanurzenie podpory wyniesie 0,67 m i będzie większe od dopuszczalnego. Należy więc np. zmniejszyć rozpiętość do 39 m. Tok postępowania zaznaczono linią przerywaną koloru brązowego.
- 2) Zakładając 5 cm zapasu zanurzenia podpory pływającej, przy wymaganej rozpiętości przęsła 36 m i maksymalnej prędkości 10 m/s, minimalna wartość współczynnika  $k_p$  wynosi 2400 kN/m. Tok postępowania ilustruje linia przerywana koloru błękitnego.
- 3) Przy rozpiętości mostu 42 m opartego na podporach pływających o współczynniku sprężystości  $k_p = 2400$  kN/m maksymalne zanurzenie podpory wynosi 0,54 m.



Rys. 4.1. Nomogram zależności maksymalnego zanurzenia podpory od parametrów eksploatacyjnych dla prędkości  $v = 10$  m/s i luzu kąтового  $\varphi_0 = 0,004$  rad

### 4.3. Opis nomogramu do wyznaczenia momentów zginających w przęśle mostu

Na rysunku 4.2 przedstawiono nomogram zależności maksymalnego momentu zginającego od prędkości poruszającego się pojazdu, rozpiętości przęseł i współczynnika sprężystości podpór dla luzów kątowych  $\varphi_0 = 0,004$ . Linie ciągłe koloru brązowego, niebieskiego i zielonego oznaczają rozpiętości przęseł odpowiednio: 42; 36 i 30 m dla współczynnika sprężystości podpór  $k_p = 3200$  kN/m. Tymi samymi kolorami oznaczono linie przerywane dla współczynnika  $k_p = 1600$  kN/m.



Rys. 4.2. Nomogram do określania maksymalnego momentu zginającego dla mostu DMS-65

Poniżej podano dwa przykłady korzystania z nomogramu:

- 1) Dla mostu o rozpiętości 36 m, opartego na podporach pływających o współczynniku sprężystości podpór  $k_p$  równym 1600 kN/m (prom 40 t), przy maksymalnej prędkości pojazdów 12 m/s, maksymalny moment zginający w przęśle zjazdowym wyniesie 7600 kNm. Tok postępowania oznaczono linią przerywaną koloru czerwonego.
- 2) Dla prędkości 10 m/s, przy współczynniku sprężystości podpór  $k_p = 3200$  kN/m (prom 80 t) oraz rozpiętości 42 m, maksymalny moment zginający wynosi 7400 kNm (linia przerywana koloru fioletowego).

Przedstawione przykłady korzystania z nomogramu potwierdzają możliwość szybkiego określania maksymalnych momentów zginających w przęśle zjazdowym.

#### 4.4. Wnioski

Analizując nomogramy, można wyciągnąć następujące wnioski:

- 1) W mostach opartych na podporach pływających, oprócz spełnienia warunku nośności przęseł, należy sprawdzić zanurzenia podpór, aby nie dopuścić do zatopienia podpór, bo to spowoduje znaczne obniżenie nośności podpory, co z kolei może doprowadzić do utraty nośności całego układu mostu kombinowanego.
- 2) Dla mostu trójprzęsłowego optymalnym wariantem jest wykorzystanie podpór o współczynniku sprężystości  $k_p = 2400$  kN/m (12 bloków pływających). Użyte zostaną wszystkie bloki pontonowe pływające z zestawu parku PP-64. Maksymalna długość części rzecznej wyniesie  $3 \times 42$  m.
- 3) Przedstawiony na rysunku 4.2 nomogram pozwala na szybkie określanie maksymalnego momentu zginającego w przęśle zjazdowym dla przyjętego układu konstrukcyjnego mostu kombinowanego.

## 5. Podsumowanie i wnioski końcowe

W artykule zaprezentowano przykładowe opracowanie nomogramów dla konkretnych danych mostu składanego i podpór pływających. Dla dowolnie innych danych można opracować takie nomogramy, korzystając z programu komputerowego *mostkombinowany*.

Opracowane nomogramy mogą być wykorzystane do:

- szybkiej analizy pracy przęseł mostu składanego, gdzie w sytuacjach kryzysowych czas projektowania i budowy ma najważniejsze znaczenie w odtwarzaniu zniszczonej lub uszkodzonej przeprawy stałej;
- doboru rozpiętości przęseł w zależności od luzów, podatności podpór i prędkości poruszania się obciążenia;

- monitorowania zanurzenia najbardziej obciążonej podpory pływającej, tak aby nie dopuścić do jej zatopienia.

Przedstawiona w artykule metoda może być przydatna dla służb odpowiedzialnych za zabezpieczenie przejezdności ciągów komunikacyjnych w sytuacjach kryzysowych.

Źródło finansowania: PBS-934/2016.

Artykuł wpłynął do redakcji 18.05.2016 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 7.07.2016 r.

#### LITERATURA

- [1] BURSZTYNOWSKI Z., *Mosty pływające na oddzielnych podporach*, WAT, Warszawa, 1988.
- [2] MARSZAŁEK J. i in., *Mosty składane. Projektowanie, badania i eksploatacja*, podręcznik, Wydawca GDDKiA i WAT, Warszawa, 2005.
- [3] MARSZAŁEK J., PIECHOTA M., *Metoda szybkiej oceny nośności mostów składanych opartych na podporach pływających*, Biuletyn WAT, 63, 4, 2014.
- [4] PIECHOTA M., *Analiza pracy mostów składanych na podporach podatnych obciążonych pojazdem w ruchu*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 2016.
- [5] *Park pontonowy PP-66. Opis i użytkowanie*, Szef. Woj. Inż., Warszawa, 1985.

J. MARSZAŁEK, M. PIECHOTA

#### **The method of rapid design of the folding bridge based on floating supports**

**Abstract.** The article includes a methodology for the rapid design of the folding bridge based on floating supports. This methodology includes an analysis of the possibilities of using blocks from the park pontoon PP-64 as a support for the floating folding DMS-65 bridge, built as a temporary crossing for civilian application. The analysis was carried out for the bridge loaded with a moving vehicle. The results of this analysis have been developed in the form of nomograms that enable rapid development of crossings in different structural systems.

**Keywords:** civil engineering, folding bridges, floating supports

**DOI:** 10.5604/12345865.1223256