

Rafał **BIEDAK**

## KINEMATYKA UKŁADACZA MOSTU WSPARCIA

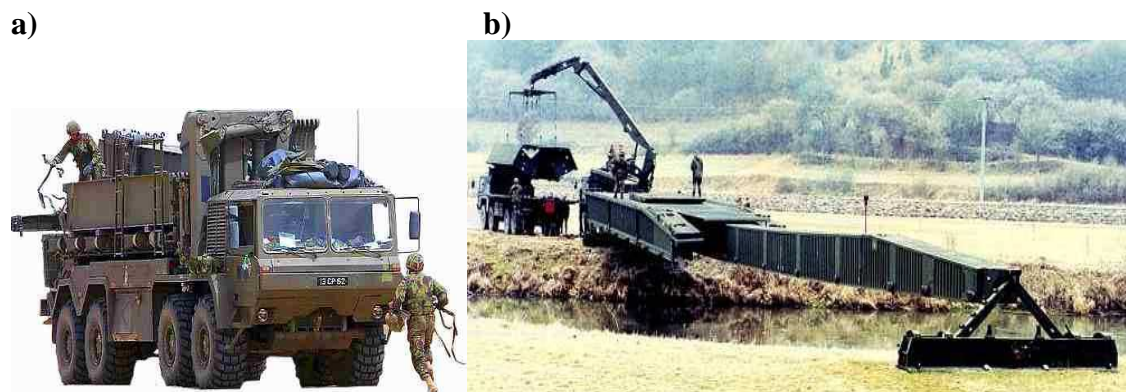
**Streszczenie.** W artykule omówiono współczesne rozwiązania konstrukcyjne układów mechanicznych składania mostów, przeznaczonych do pokonywania przeszkód o szerokości 40 metrów. Przedstawiono propozycję polskiej wersji układacza. Omówiono problemy, jakie występują w procesie projektowania układacza oraz w trakcie rozkładania segmentów mostu. Przedstawiono analizę warunków brzegowych, kinematykę i zakres pracy układacza.

**Słowa kluczowe:** most, most mobilny, układacz, przęsło, moment stabilizujący, moment wywracający.

### 1. WSTĘP

Współczesne osiągnięcia inżynierii materiałowej w zakresie tworzyw konstrukcyjnych o wysokich parametrach wytrzymałościowych, jak np. specjalne stopy aluminium, stale typu WELDOX®, HARDOX®, a także coraz częściej stosowane włókna węglowe i kompozyty żywiczne, ich obróbka i sposoby łączenia, pozwalają na opracowywanie coraz śmielszych konstrukcji. Przełomem było niewątpliwie wdrożenie metod łączenia elementów ze stopów aluminium i wysoko wytrzymałościowych stali. Umożliwiło to uzyskanie konstrukcji lekkich i jednocześnie o większej wytrzymałości. Takim przykładem jest pierwsza konstrukcja układacza składanego mostu przęsłowego FFB (Faltfestbrücke) [5] do pokonywania przeszkód o szerokości do 40 metrów. Dzięki zastosowaniu połączeń nitowych elementów niespawalnych i zaprojektowaniu lekkich konstrukcji segmentów mostu, możliwe jest rozłożenie przęsła pomocniczego (tzw. wędki) nad przeszkodą. Ułożenie wędki zapewnia układacz wbudowany w naczepę pojazdu samochodowego. W pierwszym etapie wysuwa się on z naczepy, po czym jest on poziomowany za pomocą wbudowanych podpór. Wysunięcie układacza zwiększa moment stabilizujący niezbędny do zrównoważenia momentu wywracającego, pochodzącego od ułożonych przęseł pomocniczych. Konstrukcja układacza ma kształt litery „U”. W niej umieszcza się i łączy, za pomocą sworzni, segmenty przęsła pomocniczego. Konstrukcja przęseł ma kształt zamknięty w formie skrzynki. Boczne ściany mają kształt blachy trapezowej, przez co segmenty są lekkie i odporne na odkształcenia pochodzące od sił rozciągających i ściskających górne i dolne pasy nośne. Etapy wysuwania realizuje napęd w formie łańcucha z zamocowanymi zębami (rys.1b).

Innym przykładem mostu towarzyszącego z układaczem zdolnym do ułożenia mostu na przeszkodzie o szerokości 32 lub 62 metrów (z dodatkowym modułem) jest brytyjski ABLE Bridge System, wchodzący w skład rodziny mostów BR90, opracowanych w latach dziewięćdziesiątych [3] [5]. Na system ten składa się zmechanizowany sprzęt do montażu mostu (ABLE), dwa samochody transportujące oraz 32-metrowy komplet mostu (rys.1a). W tym przypadku układacz rozkłada belkę montażową z podporą i osadza ją na przeciwległym brzegu przeszkody. Przęsła główne układane są pod belką i przesuwane wzdłuż, nad przeszkodą. Po ułożeniu mostu belka montażowa zostaje usunięta.



**Rys.1. Układacze mostów**

a – układacz mostu ABLE [9]      b – układacz mostu FFB[10]

Budowa mostów do pokonywania przeszkód o szerokości 40 metrów pod względem logistycznym wymaga zaangażowania większej liczby ludzi i sprzętu niż dla przeszkód 20 metrów. Czas do ułożenia mostu 40 m jest znacznie dłuższy, przy czym nie powinien przekraczać jednego dnia [6] [7]. W przypadku konstrukcji wykonywanych w OBRUM sp. z o.o., składanie i złożenie mostu 20-metrowego odbywa się w czasie rzędu kilkunastu minut. Jeśli chodzi o projektowany w Ośrodku most MS-40, to zakłada się, że czas ten nie powinien przekraczać 90 minut [4].

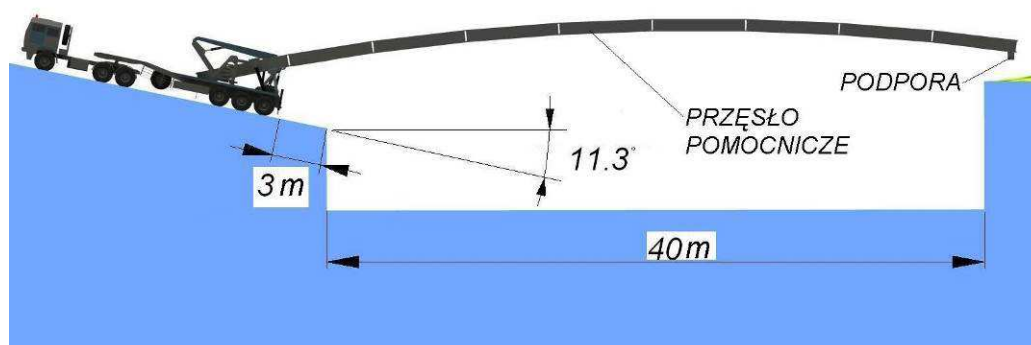
Należy podkreślić, że mosty towarzyszące są to konstrukcje tymczasowe, przeznaczone do eksploatacji w obszarze działań wojskowych oraz cywilnych. Do działań wojskowych wykorzystywane są w czasie zadań logistycznych, nienarażonych bezpośrednio na ogień przeciwnika, natomiast w zastosowaniach cywilnych wykorzystywane są w czasie klęsk żywiołowych jako wiadukty zastępcze [6] [7].

Obszarem, w którym mosty segmentowe mogłyby być również wykorzystywane jest budownictwo, w którym mosty segmentowe pełniłyby rolę rozwiązań tymczasowych, na czas budowy podstawowego wiaduktu np. w trakcie wykonywania autostrady.

## 2. WYMAGANIA TAKTYCZNO-TECHNICZNE DLA PROJEKTOWANEGO MOSTU[4]

Podstawowym zadaniem układacza mostu przewoźnego o przeznaczeniu wojskowym, jest ułożenie przęsła pomocniczego nad przeszkodą. Zgodnie z wymaganiami określonymi w ZTT [4], przeszkoda ma ograniczoną szerokość, która wynosi 40 metrów, pochylenie brzegów do  $11.3^\circ$ , a maksymalne różnice wysokości brzegów wynoszą 2 metry (rys.2.)

Układacz na naczepie posiada odpowiedni zakres kąta pracy (rys.4.), uwzględniający luzy i odkształcenia elementów jego struktury. Zakres ten umożliwia sprawne montowanie przęseł i odłożenie ich na przygotowany grunt. Musi również umożliwiać proces odwrotny, czyli łatwe ułożenie przęseł na pojazdy transportowe.



**Rys.2. Główne wymiary graniczne ułożenia układacza z przęsłem**

Bazując na dotychczasowych światowych rozwiązaniach, można stwierdzić, że spełnienie sekwencji kolejno następujących po sobie etapów technologicznych, jest niezbędne przy układaniu mostów 40 m. Wymagania opracowane przez DPZ MON zawarte w założeniach taktyczno-technicznych [4], określają procedurę budowy mostu o szerokości 40 m. Bardziej szczegółowy opis procesu układania i podejmowania przęsła wymaga jednak głębszych analiz i może odbywać się w wielu kombinacjach.

Podstawowy algorytm układania mostu segmentowego jest następujący:

- 1) podjazd pojazdem układacza tyłem do przeszkody, wypoziomowanie i przygotowanie układacza,
- 2) składanie segmentów przęsła pomocniczych w układaczu i wysuwanie ich nad przeszkodą do momentu osiągnięcia przeciwległego brzegu,
- 3) składanie segmentów przęsła głównych na układaczu i przesuwanie ich na przęsło pomocniczym do momentu osiągnięcia przeciwległego brzegu,
- 4) wypoziomowanie mostu, nałożenie pomostów najazdowych i przygotowanie do eksploatacji.

Do podstawowych zespołów i podzespołów tworzących strukturę mostu segmentowego należy zaliczyć:

- pojazd – układacz,
- segmenty pomocnicze,
- segmenty główne i najazdowe,
- podpory,
- pomosty najazdowe,
- pojazdy transportowe.

Kolejnym elementem, który określa gabaryty układacza, jest rozmiar przęsła pomocniczego oraz wymiary samego pojazdu, zgodnie z którymi pojazd-układacz w celu swobodnego poruszania się po drogach, musi spełnić wymagania z zakresu transportu drogowego jak w tabelicy 1[4].

Tablica 1. Warunki brzegowe pojazdu-układacza.

PARAMETR		WARTOŚĆ
maksymalny ciężar pojazdu-układacza	t	48
maksymalna wysokość od podłoża	mm	4000
maksymalna szerokość pojazdu	mm	3000
wysokość segmentu przęsła pomocniczego	mm	980
szerokość segmentu przęsła pomocniczego	mm	680
długość segmentu przęsła pomocniczego	mm	5700
długość przęsła	m	46
masa przęsła	kg	6000÷11000

### 3. ANALIZA KINEMATYCZNA PROJEKTOWANEGO UKŁADACZA MOSTU

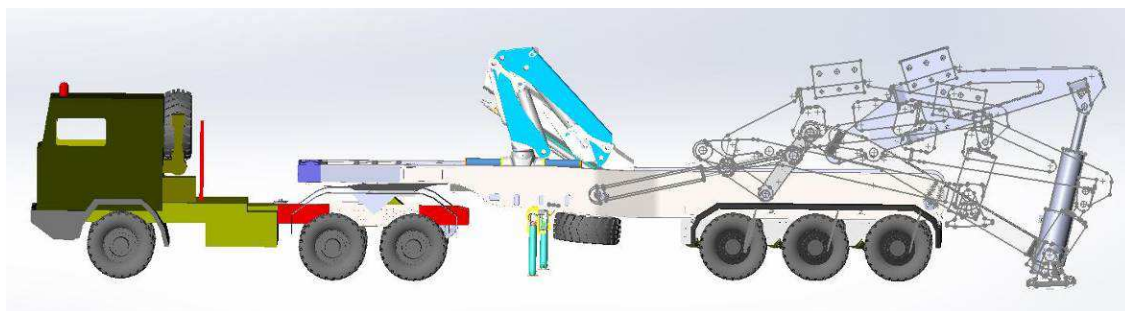
Projektowany układacz mostu do pokonywania przeszkód o szerokości do 40 metrów zbudowany jest z następujących modułów:

- układacz główny (rynna) z wbudowanymi rolkami dolnymi,
- ramię układacza,
- para siłowników teleskopowych,
- para siłowników dwustronnego działania,
- podpora układacza,
- zdejmowane rolki górne.

Cała konstrukcja układacza jest integralną częścią pojazdu-układacza. W skład pojazdu-układacza wchodzi ciągnik i naczepa. Na naczepie zamontowany jest układacz przęsła pomocniczych, żuraw oraz elementy wyposażenia mostu.

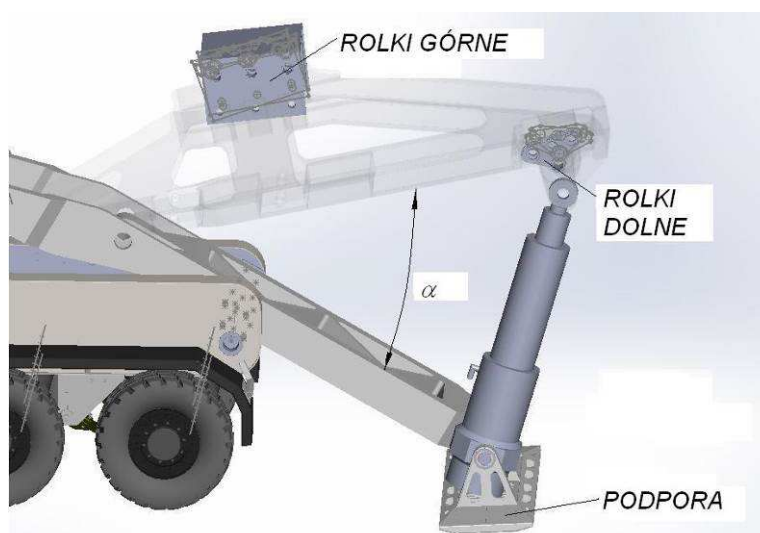
Budowa układacza ściśle wiąże się z przedstawionym algorytmem procesu układania całego mostu.

W początkowej fazie układacz wysuwamy z naczepy do momentu oparcia o zamocowaną pod nim podporę. Następnie za pomocą siłowników teleskopowych ustawiamy układacz w odpowiedniej pozycji umożliwiającej układanie w nim przęsła pomocniczych (rys.3.). Przęsła kładzie się bezpośrednio na rolki dolne oraz rolki pomocnicze. Dolne rolki są integralną częścią układacza i dzięki ruchowi wahliwemu dopasowują się do zmiennych warunków pracy. Podczas wysuwania przęsła, w miarę zwiększania się sił nacisku, rolki dolne dopasowują się pod wpływem sił nacisku do aktualnego w danej chwili kąta (rys.4.) Górne rolki natomiast montowane są na stałe. Układacz ma kształt litery „U”, do niego wkłada się za pomocą żurawia kolejno przęsła pomocnicze, a na wewnętrznych ścianach układacza zamontowane są ślizgi pozwalające na swobodne przesuwanie przęsła pomocniczych. Po zakończeniu procedury układania przęsła pomocniczego, zdejmowane są górne rolki z układacza. Do następnego etapu należy układanie mostu głównego zbudowanego z segmentów przęsła głównych. W tym przypadku układacz pełni rolę podpory, a łącznie z wędką pełni rolę bieżni, po której przesuwają się segmenty przęsła głównego. Zakończeniem procedury układania mostu jest położenie go na podporach wbudowanych do przęsła głównych. Realizowane jest to przez odpowiednie pochylenie całego mostu układaczem.



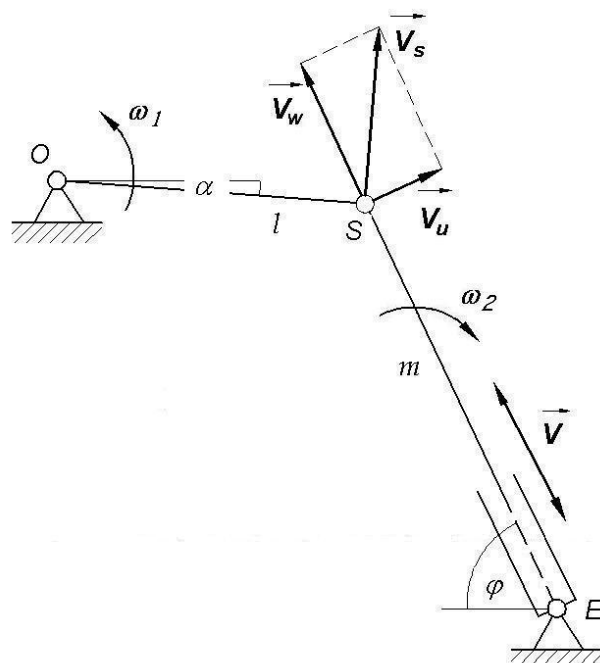
**Rys.3. Pojazd-układacz z wysuniętą podporą.**

Na podstawie granicznych wartości trajektorii ruchu układacza (rys.3.) wyznaczono jego schemat kinematyczny (rys.5.). Siły działające w poszczególnych węzłach układacza wyznaczono z analizy momentów sił - jego momentu wywracającego i momentu stabilizującego (statycznego) otrzymanego z utworzonego schematu kinematycznego jak na rys.6.

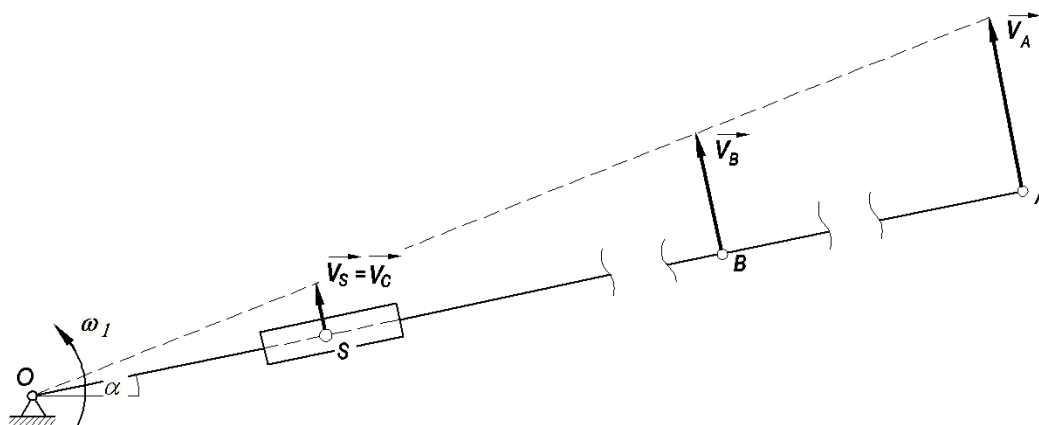


**Rys.4. Ilustracja położenia górnych i dolnych rolek wraz z kątowym zakresem pracy układacza.**

Otrzymany schemat opiera się na analizie ruchu złożonego, który wynika ze składowych ruchu unoszenia, względnego i bezwzględnego [2] [8]. Ramiona połączone są ze sobą przegubowo, z czego ramię OS symbolizuje rynnę układacza (rys.5.), a ramię OA przęsło pomocnicze z zamocowaną w punkcie A podporą (rys.6.). Przy stałej prędkości wysuwu siłownika ES zmienia się prędkość kątowa  $\omega_1$  rynny układacza OS, co wpływa na ruch przęsła OA. Prędkość bezwzględna  $V_s$  jest jednocześnie prędkością całkowitą  $V_c$ , względem której wyznaczono prędkość kątową  $\omega_1$  oraz drogę i przyśpieszenie kątowe, niezbędne do dalszych analiz. Do przeprowadzenia poprawnych analiz korzystne jest określenie przyśpieszenia siłownika. Siły dynamiczne powstające przy nagłym zatrzymaniu siłownika, jak i wprawieniu go w ruch wpływają na cały układ obciążenia mostu. Można je przedstawić na odpowiednich wykresach prędkości i utworzonych równań lub zastępując ogólnie odpowiednim współczynnikiem bezpieczeństwa.



**Rys.5. Schemat kinematyczny układacza z wysuniętą podporą**



**Rys.6. Schemat kinematyczny układacza z wysuniętym przęśłem pomocniczym**

Budowa i aktualny układ kinematyczny układacza ulegały ciągłym modyfikacjom, który zamieszczono we wcześniejszych opracowaniach [1] [2]. Obliczenia układacza wykonane zostały na podstawie dynamicznego równania ruchu wykorzystującego równania Lagrange'a II rodzaju [2] [8] na podstawie schematu z rys.6. Równanie to pozwala określić moment sił względem wcześniej przyjętego punktu, w tym przypadku punktu mocowania układacza – punkt O (rys.6.). Dolne rolki na rysunkach określa punkt S. Zgodnie z równaniem (1) obliczano moment wywracający na układaczu, który posłużył w dalszym etapie do wyznaczenia siły na dolnych i jednocześnie górnych rolkach układacza. Otrzymane siły zostały w dalszym etapie przeniesione do modelu obliczeniowego układacza, w celu wyznaczenia metodą MES przybliżonych wartości naprężeń i przemieszczeń charakterystycznych punktów konstrukcyjnych układacza. Obliczenia oraz schemat

kinematyczny aktualnie realizowanego układacza (rys.5., 6.) oparto na podstawie wcześniej przeprowadzanych analiz, które zamieszczono we wcześniejszych publikacjach [1] [2].

$$(J_c + m_c \cdot n_c^2)\ddot{\alpha} + m_c \cdot g \cdot n_c \cdot \cos(\alpha) = M_o \quad (1)$$

gdzie:

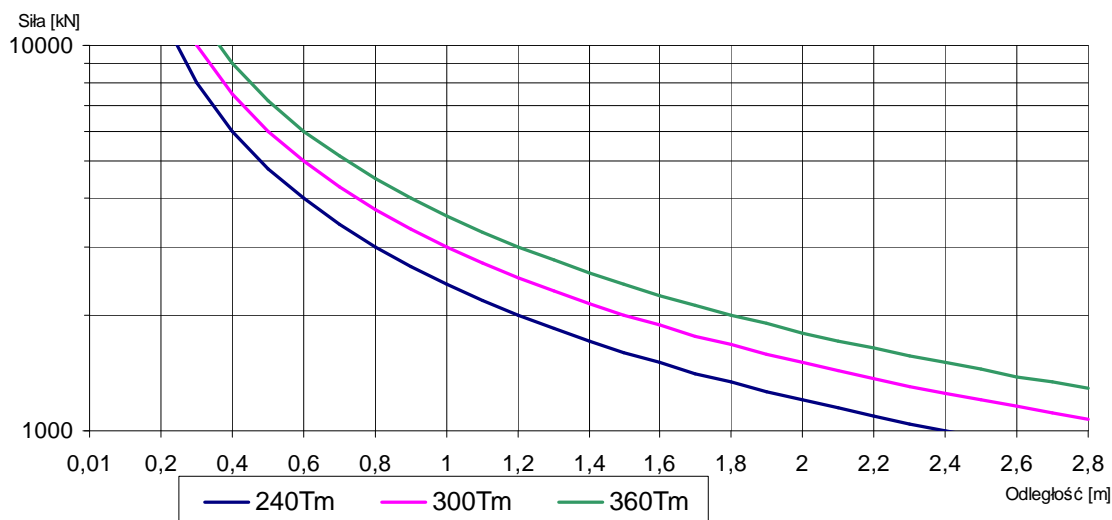
- $m_c$  – masa przęsła,
- $n_c$  – odległość od środka masy układu do punktu podparcia przęsła,
- $J_c$  – centralny moment bezwładności przęsła,
- $\alpha$  – kąt położenia przęsła,
- $\ddot{\alpha}$  – przyspieszenie kątowe przęsła.
- $M_o$  – siła uogólniona względem punktu O.

#### 4. WSTĘPNE OBLICZENIA UKŁADACZA MOSTU

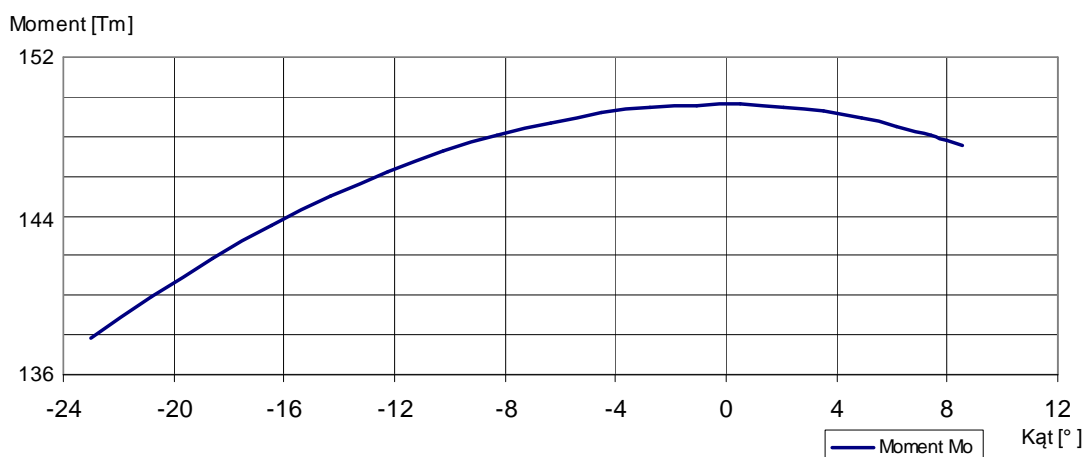
Obliczenia konstrukcyjne i analizy parametrów ruchu oraz sił w charakterystycznych punktach układacza, uwarunkowane są głównie przez wartości brzegowe, które to z kolei opierają się na założeniach taktyczno-technicznych zawartych w dokumencie[4] opracowanym przez DPZ MON. Wartości brzegowe oraz ogólne zasady konstrukcyjne projektowania mostów określają przyjęcie odpowiedniej liczby stopni swobody oraz determinują kinematykę realizacji rozkładania mostu. Względy bezpieczeństwa konstrukcji zapewniają odpowiednio wyznaczone wartości współczynników bezpieczeństwa.

W wyniku układania segmentów przęsła pomocniczego, na układaczu wzrastają siły. Rolki układacza pełnią funkcję podpór, natomiast przęsło - rolę belki podpartej w dwóch punktach. W takim układzie moment sił, pochodzący od sił ciężkości przęsła, oddziałuje na górne i dolne rolki układacza. Wraz ze zmianą ich rozstawu zmieniają się siły, jakie przyjmuje struktura układacza a zwłaszcza dolne rolki (rys.7.). Najkorzystniejszym rozwiązaniem byłoby przyjęcie jak największego rozstawu rolek względem siebie, jednak ograniczeniem są gabaryty układacza. Natomiast chcąc spróbować zmniejszyć moment sił na układaczu, należy przeprowadzić optymalizację modelu fizycznego segmentów pomocniczych, czyli maksymalnie zmniejszyć ich masę, bez obniżania ich nośności (rys.9.).

W czasie łączenia przęsła pomocniczych na układaczu, pomimo poziomego ich ułożenia, pod wpływem sił ciężkości, przęsło przybiera kształt łuku. Ugięcie to bezpośrednio wpływa na ułożenie rolek w układaczu. W celu wyrównania rozkładu sił na tulejach, zastosowano dolne rolki wahliwe. Dopasowują się one do linii ugięcia przęsła, redukują krawędziowe skupienia obciążenia, co powoduje mniejsze zużycie. Ze względu na gabaryty konstrukcji i związaną z tym zmniejszoną tolerancję wykonania, eliminują również niedoskonałości wykonania zespołów.



**Rys.7. Zależność sił działających na rolki od wartości momentów obciążających układacza i rozstawu rolek.**



**Rys.8. Wykres momentu obciążenia w zależności od kąta ustawienia układacza**

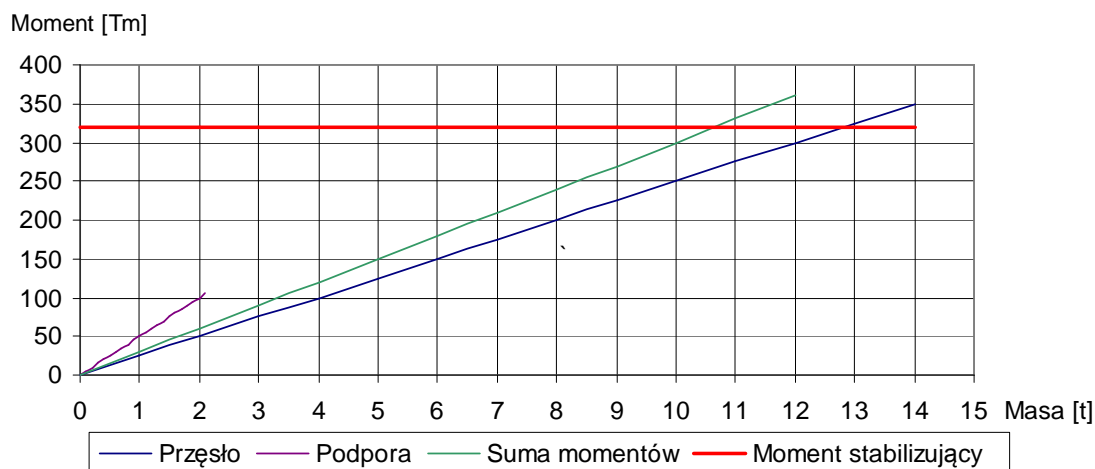
Przemieszczenie kątowe układacza i jednocześnie różne nachylenie przęseł do gruntu wpływa na zmianę sił w strukturze układacza. Zgodnie z równaniem Lagrange'a i zastosowaniem odpowiednich równań ruchu, wyznaczenie sił sprowadza się do sporządzenia wykresu momentu sił zależnie od kąta ustawienia układacza (rys.8.). W dalszym etapie na podstawie rozstawu rolek na układaczu możliwe jest wyznaczenie sił na tulejach rolek (rys.7.).

Podczas realizacji układania przęseł pomocniczych następuje znaczny wzrost momentu siły który powoduje odrywanie od podłoża zestawu pojazdu-układacza wraz z ciągnikiem. Punktem obrotu (podporą stałą) jest podparcie z układacza (rys.4). Względem niej, obliczana jest stateczność całego zestawu. Graniczny moment stabilizujący całość zestawu względem tej podpory pochodzi od sumy wszystkich komponentów wchodzących w skład po stronie pojazdu-układacza i ewentualnie elementy dociągające cały zestaw (rys.9).

Moment wywracający, pochodzący od zmontowanych segmentów przęseł pomocniczych i zaczepionej na ich końcu podpory, można zmniejszyć jedynie przez



zmniejszenie ich mas. Długość przęsła pomocniczego jest stała, natomiast podpora zawsze umocowana jest na jego końcu. Z tego względu środek masy podpory lub przęsła jest w różnej odległości od punktu podparcia i jednostkowa zmiana masy każdego nie wpływa jednakowo na stateczność (rys.9.).



Rys.9. Wykres momentów sił na układaczu pochodzących od przęsła i podpory

## 5. PODSUMOWANIE

Konstrukcja przęsła pomocniczego (Tab.1.), a przede wszystkim jego wskaźnik wytrzymałości poprzecznej i moment bezładności przekroju są głównymi wielkościami, które określają konstrukcję przęsła pod względem masowym i wytrzymałościowym. Wpływa ona bezpośrednio na wielkość momentu wywracającego względem wcześniej przyjętego punktu podparcia. Również po teoretycznej próbie jego optymalizacji zgodnie z rys.9., całkowita masa jest zbyt duża i zbliża się niebezpiecznie do granicy momentu stabilizującego. Narzuca to konieczność wyprowadzenia punktu podparcia pojazdu-układacza jak najdalej poza naczepę układacza. Wiąże się to z wysuwaniem mechanizmu układającego przęsła poza naczepę i zastosowanie dodatkowej podpory, umocowanej pod układaczem (rys.4.). Wcześniejsze analizy momentu wywracającego z zastosowaniem lekkiego przęsła pomocniczego dopuszczały zastosowanie układacza z podporą, który jest wbudowany w ramę naczepy pojazdu-układacza (pojazd-układacz z wbudowanymi podporami w naczepę został opisany w pracach [1] [2]). Względny bezpieczeństwa wykazują jednak, że wyjątkowo korzystne i bezpieczne staje się umiejscowienie punktu wywrotu jak najdalej poza naczepą, niezależnie od budowy przęsła pomocniczego (rys.3.).

Podstawowa przyczyna znacznych rozmiarów pojazdu-układacza, a przede wszystkim zastosowanych siłowników, leży w ciężkim przęsle pomocniczym, wykonanym ze stali. Odpowiednia konstrukcja przęsła pomocniczego, z zastosowaniem stopów aluminium zmniejszy ich masę i pozwoli zmniejszyć masę całego zestawu pojazdu-układacza.

Zarówno przy wysuwaniu przęseł łamanych, jak i połączonych ze sobą w linii prostej konieczne jest zastosowanie górnych oraz dolnych rolek zamocowanych przegubowo (rys.4.). Siły na rolkach i ilość użytych par rolek zależne są od odległości między górnymi i dolnymi rolkami (rys.7.).

Zdejmowanie przęsła może odbywać się w dwojaki sposób. Układanie przęseł za naczepą, oraz za pomocą żurawia obok naczepy [1]. Warunkiem zdejmowania przęseł obok naczepy jest zastosowanie odpowiednio większego żurawia.

Zbudowanie mostu 40 m z segmentów wymaga znacznego czasu, dlatego dąży się do łączenia i optymalizacji poszczególnych etapów składania mostu oraz jak najszerszej automatyzacji całego procesu.

Przedstawione w artykule (bazującym na wcześniejszych pracach [1] [2]), analizy dotyczące mobilnego mostu składanego zostały wykorzystane w OBRUM sp. z o.o., w trakcie wykonywanej pracy rozwojowej, realizowanej na rzecz Inspektoratu Uzbrojenia MON.

## 6. LITERATURA

- [1] Biedak R.: Projekt układacza mostu MS-40, Praca dyplomowa magisterska wykonana na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Arkadiusza Mężyka, Gliwice 2009,
- [2] Biedak R., Mężyk A.: Układacz mostu przewoźnego MS-40, Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa, 2010, nr 8, s. 74-83,
- [3] Bustin I.: HAB – A Clean Launch Platform, Military Technology, 1994, nr 3, s. 93-96.
- [4] Departament Polityki Zbrojeniowej MON, Założenia taktyczno-techniczne na mobilny most składany MLC70/100 do pokonywania średnich przeszkód wodnych i terenowych, Warszawa 2007,
- [5] Grastyka J.: Mosty zmechanizowane dla wojsk lądowych, Raport - Wojsko Technika Obronność, 2003, nr 10, s. 50-54,
- [6] Łopatka M. J., Zelkowski J.: Wymagania stawiane współczesnym mostom wojskowym, Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe, 2009, nr 24, s. 35-41,
- [7] Szelka J. Duchaczek A.: Specyfika budowy przepraw wojskowych, Inżynieria Wojskowa, problemy i perspektywy, 2008,
- [8] Zawadzki J., Siuta W.: Mechanika, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1966.
- [9] <http://www.army.mod.uk/royalengineers/equipment/703.aspx> [2012]
- [10] [http://www.panzerbaer.de/helper/bw\\_lkw\\_15t\\_milgl\\_kat\\_i\\_a1\\_ffb-a.htm](http://www.panzerbaer.de/helper/bw_lkw_15t_milgl_kat_i_a1_ffb-a.htm) [2012]

## KINEMATICS OF A SUPPORT BRIDGE LAUNCHER

**Abstract.** The paper discusses modern design solutions applied in the mechanical systems of bridge launchers designed to negotiate obstacles 40 metres wide. A Polish version of a launcher is presented. Problems encountered during the design of a launcher and during the launching of bridge segments are discussed. Boundary conditions, kinematics and operating scope of the launcher are analysed.

**Keywords:** bridge, mobile bridge, launcher, span, stabilising moment, overturning moment.