

Damian GASKA<sup>1</sup>, Manfred CHMURAWA<sup>1,2</sup>, Tomasz ŁUKASIK<sup>1</sup>

## METODY WYZNACZANIA I OBLICZANIA OBCIĄŻEŃ REGULARNYCH DŹWIGNIC W ŚWIETLE NORM EUROPEJSKICH

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia nowe metody projektowania i obliczania ustrojów nośnych dźwignic, a w szczególności problematykę wyznaczania obliczeniowych obciążeń regularnych wg projektu normy europejskiej prEN 13001-2:2003, będącego jednocześnie tekstem ostatecznym tej normy przed jej ustanowieniem w połowie 2005 roku.

### CALCULATION AND DETERMINE METHODS OF CRANE LOADS IN ASPECTS OF EUROPEAN NORMS

**Summary.** The article presents the new methods of design and calculation of cranes load-carrying structures, and in peculiarity the problems of calculating and determining the regular loads according to project of European Norm prEN 13001-2:2003, being simultaneously the final draft of this norm before it is made in the second half of 2005.

#### 1. WPROWADZENIE

W związku z przystąpieniem Polski z dniem 1 maja 2004 roku do Unii Europejskiej obowiązujące dotychczas polskie akty normatywne, dotyczące zasad wymiarowania stalowych ustrojów nośnych dźwignic, będą musiały być wycofane i zastąpione przez odpowiednie normy europejskie, z datą ich ustanowienia, która nastąpi prawdopodobnie w czerwcu 2005 roku.

W tej sytuacji należy opracować procedury wymiarowania ustrojów nośnych oparte na opublikowanych już projektach tych norm [1-4]. Artykuł przedstawia część metodyki wymiarowania i obejmuje procedury wyznaczania i obliczania obciążeń działających na dźwignicę.

Obciążenia działające na dźwignicę zostały podzielone, ze względu na częstość działania, na:

- obciążenia regularne,
- obciążenia nieregularne,
- obciążenia wyjątkowe.

Wymienione obciążenia powinny być uwzględnione przy sprawdzaniu wytrzymałości na wypadek zaistnienia uszkodzeń spowodowanych niekontrolowanym ruchem,

<sup>1</sup> Katedra Logistyki i Transportu Przemysłowego, Wydział Transportu, Politechnika Śląska, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, tel. (+48 32) 603 4356; (+48 32) 603 4157, damian.gaska@polsl.pl, tomasz.lukasik@polsl.pl, manfred.chmurawa@polsl.pl

<sup>2</sup> Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Dźwignic i Urządzeń Transportowych „Detrans”, ul. Powstańców Śl. 6, 41-902 Bytom

przekroczeniem granicy plastyczności, sprężystą niestabilnością oraz tam, gdzie to możliwe, na zmęczenie materiału wg nowych kryteriów i zasad wymiarowania stalowych ustrojów nośnych [3, 5, 6].

## 2. OBCIĄŻENIA REGULARNE DZIAŁAJĄCE NA KONSTRUKCJĘ NOŚNĄ DŹWIGNICY

Obciążenia regularne są nieodłącznie związane z użytkowaniem dźwignicy, występują często w czasie jej normalnego działania i uwzględniają wpływ:

- dynamiki podnoszenia ładunku i grawitacji na masy dźwignicy,
- bezwładności i grawitacji na siły działające pionowo na podnoszony ładunek (przy podnoszeniu swobodnego ładunku z podłoża i/lub przy nagłym zwolnieniu części podnoszonego ładunku,
- obciążeń spowodowanych jazdą po nierównej powierzchni (szyn, torów lub jezdni),
- obciążeń spowodowanych przyspieszaniem poszczególnych ruchów roboczych (napędów) dźwignicy,
- obciążeń wywołanych odkształceniami.

Dla celów obliczeniowych wpływ ww. czynników przyjmuje postać odpowiednich sił [7]:

- a) siły ciężkości wynikającej z masy własnej urządzenia  $F_w$ ,
- b) siły ciężkości podnoszonego ładunku wraz z siłą dynamiczną  $F_d$ ,
- c) siły dynamicznej nagłego zwolnienia części podnoszonego ładunku  $F_{dn}$ ,
- d) sił dynamicznych spowodowanych jazdą po nierównej powierzchni:
  - ustroju nośnego  $F_{djb}$ ,
  - wózka  $F_{djw}$ ,
- e) sił dynamicznych przyspieszania ruchów roboczych (napędów) dźwignicy:
  - napędu jazdy dźwignicy  $F_{dph}$ ,
  - napędu jazdy wózka  $F_{dpw}$ .

### 2.1. Siły ciężkości wynikające z masy własnej urządzenia $F_w$

Ruchy robocze podnoszenia lub opuszczania ładunku wzbudzają drgania ustroju nośnego dźwignicy. Uwzględnienie tych drgań następuje przy wykorzystaniu współczynnika wpływu dynamiki i grawitacji mas własnych:

$$\varphi_1 = 1 + \delta, \text{ w przypadku klasy rozkładu mas MDC1, rys. 1a} \quad (1)$$

$$\varphi_1 = 1 \pm \delta, \text{ w przypadku klasy rozkładu mas MDC2, rys. 1b} \quad (2)$$

gdzie:

$\delta$  – współczynnik charakteryzujący konstrukcję dźwignicy, a jego wartość powinna być dobierana na podstawie doświadczeń z przedziału  $0 \leq \delta \leq 0,1$ .

Wyboru dokonuje się w zależności od częściowo wzrastającego (+ $\delta$ ) lub malejącego (- $\delta$ ) oddziaływania grawitacyjnego mas, w rezultacie skojarzenia obciążeń w punktach i przekrojach krytycznych wybranych do obliczeń sprawdzających, rys 1b.

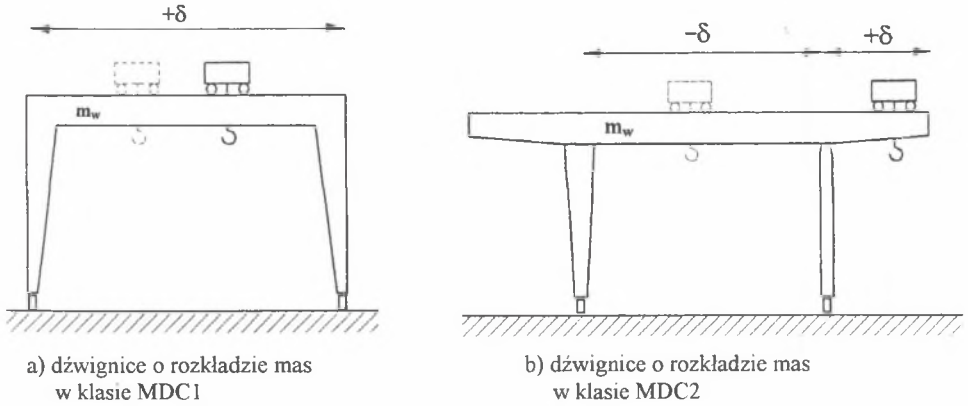
Należy uwzględnić masę dźwignicy łącznie z tymi częściami, które zawsze występują w czasie jej pracy, z wyjątkiem samego ładunku użytecznego.

Siła ciężkości  $F_w$  jest obliczana jako iloczyn sił grawitacji wynikających z masy własnej dźwignicy  $m_w$  lub jej części przez współczynnik  $\varphi_1$ , uwzględniający wpływ drgań masy własnej podczas podnoszenia lub opuszczania ładunku:

$$F_w = \varphi_1 \cdot m_w \cdot g \quad (3)$$

gdzie:

$m_w$  – masa własna rozpatrywanego ustroju nośnego lub jego części,  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $g=9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ .



Rys. 1. Dwie klasy rozkładu mas dźwignicy  
 Fig. 1. Mass distribution classes MDC1 and MDC2

## 2.2. Siła ciężkości podnoszenia ładunku wraz z siłą dynamiczną $F_d$

Przy podnoszeniu swobodnie położonego ładunku z podłoża należy uwzględnić siłę dynamiczną spowodowaną drganiami dźwignicy. Uwzględnienie siły dynamicznej następuje przez pomnożenie siły ciężkości podnoszonego ładunku przez współczynnik  $\varphi_2$ . Masa podnoszonego ładunku obejmuje masę samego ładunku, masę urządzenia chwytowego oraz masę części zawieszonych lin lub łańcuchów podnoszących. Wartość współczynnika oblicza się ze wzoru:

$$\varphi_2 = \varphi_{2,\min} + \beta_2 V_h \quad (4)$$

gdzie:

$\varphi_{2,\min}$  – minimalna wartość współczynnika (dla prędkości  $V_h=0$ ) wg tabl. 1,

$\beta_2$  – współczynnik (kierunkowy prostej) w  $[\text{s/m}]$  wg tabl. 1,

$V_h$  – ustalona prędkość podnoszenia ładunku w  $[\text{m/s}]$ , zależna od sposobu kojarzenia obciążeń i typu napędu podnoszenia oraz sposobu jego pracy.

Wartości  $\varphi_{2,\min}$  oraz  $\beta_2$  zostały podane w zależności od odpowiedniej klasy napędu podnoszenia. Na potrzeby wymiarowania dźwignice zaszeregowano do 4 klas podnoszenia od HC<sub>1</sub> do HC<sub>4</sub> (por. tabl. 1), [1].

Wyznaczanie współczynnika  $\varphi_2$  wg wzoru (4) zależy także od ustalonych prędkości podnoszenia  $V_h$  (maksymalnej  $V_{h,\max}$  lub zwolnionej  $V_{h,cs}$ ), które z kolei zależą od skojarzenia obciążeń (A1, B1 lub C1) oraz od typu mechanizmu podnoszenia i sposobu jego

pracy. Norma prEN 13001-2:2003 wyróżnia 5 typów napędu podnoszenia od HD1 do HD5 w zależności od wpływu typu napędu na dynamikę podnoszenia (por. tabl. 2).

Tablica 1

Wartości współczynników  $\varphi_{2,\min}$  i  $\beta_2$ 

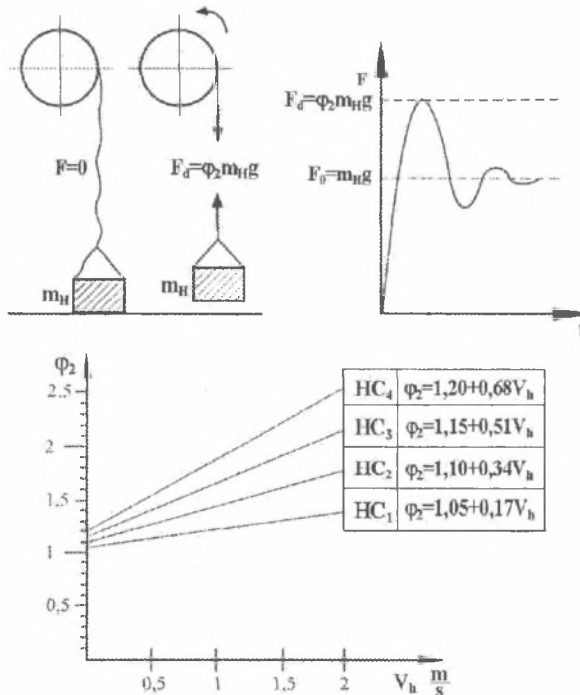
Klasy podnoszenia	$\varphi_{2,\min}$	$\beta_2$ [s/m]
HC <sub>1</sub>	1,05	0,17
HC <sub>2</sub>	1,10	0,34
HC <sub>3</sub>	1,15	0,51
HC <sub>4</sub>	1,20	0,68

Tablica 2

Wartości  $V_h$  do wyznaczania współczynnika  $\varphi_2$ 

Kombinacja obciążeń	Typ napędu podnoszenia i sposób jego pracy				
	HD1	HD2	HD3	HD4	HD5
A1, B1	$V_{h,\max}$	$V_{h,CS}$	$V_{h,CS}$	$0,5 \cdot V_{h,\max}$	$V_h = 0$
C1	-	$V_{h,\max}$	-	$V_{h,\max}$	$0,5 \cdot V_{h,\max}$

Dla przykładu, napęd typu HD1, który nie może pracować z prędkością zwolnioną, charakteryzuje się większym oddziaływaniem dynamicznym i dlatego dla kojarzenia A1 i B1 [1] występuje  $V_{h,\max}$ . I odwrotnie – dla napędu typu HD5, charakteryzującego się łagodnym przebiegiem podnoszenia ładunku (np.: programowanym za pośrednictwem mikroprocesora), dla kojarzenia obciążeń A1 i B1 – należy przyjąć  $V_h=0$  i wartość współczynnika dynamicznego  $\varphi_2$  osiąga swoje minimum  $\varphi_{2,\min}$ .  $V_{h,CS}$  oznacza ustaloną zwolnioną prędkość podnoszenia.



Rys. 2. Współczynnik  $\varphi_2$  przy podnoszeniu swobodnego ładunku z podłoża  
Fig. 2. Factor  $\varphi_2$  at hoisting an unrestrained grounded load

Równocześnie wartości współczynnika  $\varphi_2$  można wyznaczyć analitycznie lub doświadczalnie bez uwzględniania klasy podnoszenia [1, 7]. Po ustaleniu wartości  $\varphi_2$  należy obliczyć siłę ciężkości ładunku z uwzględnieniem siły dynamicznej podnoszenia:

$$F_d = \varphi_2 \cdot (m_H + m_o + m_l) \cdot g \quad (5)$$

gdzie:

$m_H$  – masa ładunku brutto,

$m_o$  – masa urządzenia chwytowego,

$m_l$  – masa części zawieszonych lin lub łańcuchów podnoszących.

Jeżeli  $m_H \gg m_o + m_l$ , to z dopuszczalnym uproszczeniem  $F_d = \varphi_2 \cdot m_H \cdot g$ , jak na rys. 2.

### 2.3. Siła dynamiczna nagłego zwolnienia części podnoszonego ładunku $F_{dn}$

Siła ta występuje w dźwignicach, w których zwolnienie części ładunku jest charakterystyczne dla normalnej eksploatacji (np.: w suwnicach chwytakowych lub wyposażonych w chwytник elektromagnetyczny).

Wpływ największej amplitudy przy zwolnieniu części ładunku można uwzględnić za pomocą współczynnika  $\varphi_3$ , (rys. 3):

a) dla dźwignic wyposażonych w chwytak lub podobne urządzenie umożliwiające powolne zwolnienie ładunku

$$\varphi_3 = 1 - 1,5 \cdot \frac{\Delta m_H}{m_H} \quad (6)$$

b) dla dźwignic wyposażonych w chwytник elektromagnetyczny lub podobne urządzenie umożliwiające gwałtowne zwolnienie ładunku

$$\varphi_3 = 1 - 2 \cdot \frac{\Delta m_H}{m_H} \quad (7)$$

gdzie:

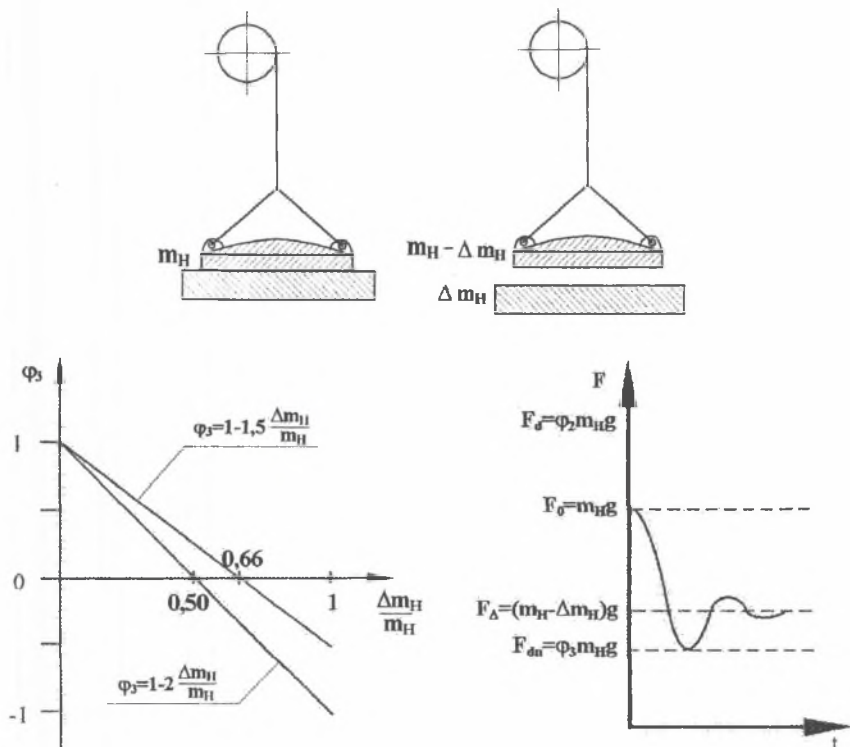
$\Delta m_H$  – zwolniona część ładunku,

$m_H$  – masa ładunku brutto.

Siłę dynamiczną zwolnienia części ładunku  $F_{dn}$  należy obliczyć mnożąc obciążenie użyteczne (wynikające z masy ładunku brutto  $m_H$ ) przez współczynnik  $\varphi_3$ :

$$F_{dn} = \varphi_3 \cdot m_H \cdot g \quad (8)$$

Siła  $F_{dn}$  może przyjmować wartości ujemne w przypadku, gdy względny udział zwolnionej części ładunku jest większy od 0,5 – dla dźwignic wyposażonych w chwytник elektromagnetyczny lub podobne urządzenie umożliwiające gwałtowne zwolnienie ładunku lub 0,66 – dla dźwignic wyposażonych w chwytak lub podobne urządzenie umożliwiające powolne zwolnienie ładunku (rys. 3).



Rys. 3. Współczynnik  $\varphi_3$  związany ze zwolnieniem części podnieszonego ładunku  
 Fig. 3. Factor  $\varphi_3$  at sudden release of a part of the hoist load

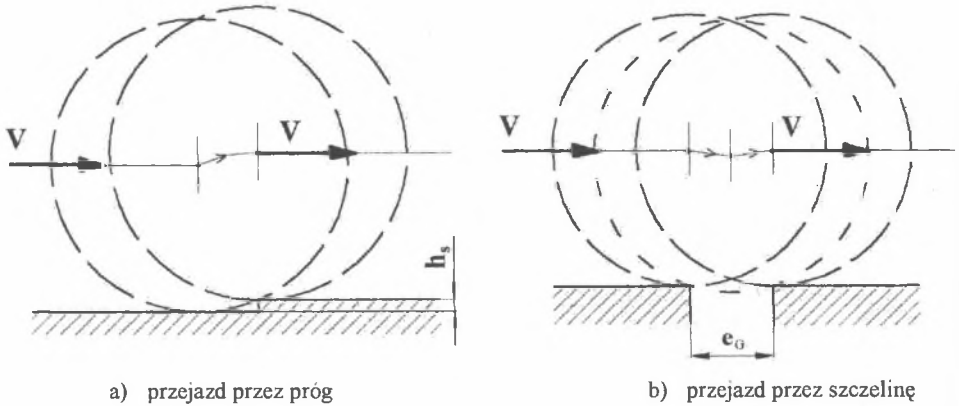
#### 2.4. Siła dynamiczna powodowana jazdą po nierównej powierzchni $F_{dJ}$

Jazda dźwigni z ładunkiem lub bez ładunku po drogach, torach, poza drogami lub poza torami wywołuje siłę dynamiczną działającą na dźwignię. Dynamiczny wpływ jazdy należy określić na podstawie doświadczenia, eksperymentów lub obliczeń – korzystając z modelu właściwego dla danej dźwigni lub wciągarki z uwzględnieniem podłoża lub toru, po którym odbywa się ruch. Powstające podczas jazdy przyspieszenia oddziałujące na masy dźwigni oraz ładunek są uwzględniane za pomocą współczynnika  $\varphi_4$ .

Normy europejskie dotyczące poszczególnych rodzajów dźwignic określają tolerancje dla torów szynowych i warunki dla ich podłoży oraz podają zwyczajowe wartości współczynników  $\varphi_4$ . W przypadkach, dla których nie podano wartości  $\varphi_4$ , współczynnik definiowany jest następująco [1, 7]:

a) dla przejazdu przez próg (rys. 4a)

$$\varphi_4 = 1 + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{V^2}{g \cdot r} \cdot \xi_s \quad (9)$$



Rys. 4. Ruch środka koła w czasie przejazdu przez próg lub szczelinę  
 Fig. 4. Movement of the wheel centre at travelling over a step and over a gap

b) dla przejazdu przez szczelinę (rys. 4b)

$$\varphi_4 = 1 + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{V^2}{g \cdot r} \cdot \xi_G \quad (10)$$

gdzie:

$r$  – promień koła jezdnego dźwignicy [m],

$V$  – stała pozioma prędkość jazdy dźwignicy lub wciągarki [m/s],

$\xi_s, \xi_G$  – współczynniki krzywej dynamiki jazdy dźwignicy przez nieciągłość toru (rys. 5), wyznaczane na podstawie współczynników charakteryzujących przejazd przez określoną nieciągłość, a mianowicie:

a) współczynnik charakteryzujący przejazd dźwignicy przez próg,

$$\alpha_s = \frac{2 \cdot f_q \cdot h_s}{V} \cdot \sqrt{\frac{2r}{h_s}} \quad (11)$$

b) współczynnik charakteryzujący przejazd dźwignicy przez szczelinę,

$$\alpha_G = \frac{f_q \cdot e_G}{V} \quad (12)$$

gdzie:

$h_s$  – wysokość progu w [m],

$e_G$  – szerokość szczeliny w [m],

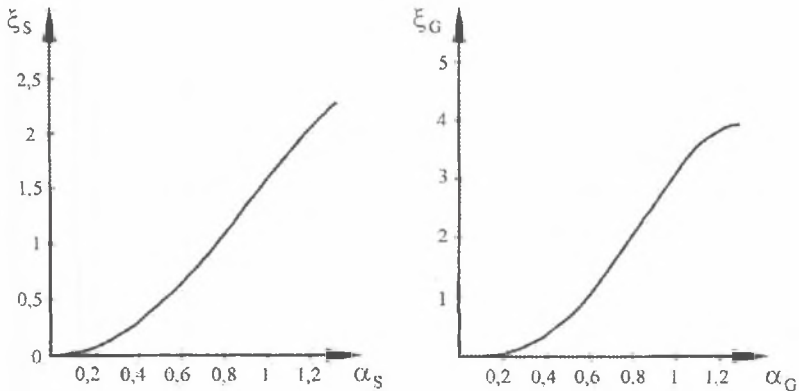
$f_q$  – częstość własna liniowo sprężystego modelu dźwignicy w [Hz], obliczana wg wzoru:

$$f_q = \frac{\sqrt{c/(m_w + m_H)}}{2\pi} \quad (13)$$

gdzie:

$c$  – stała sztywności dźwignicy.

Jeżeli częstość  $f_q$  nie jest znana, powinna być przyjęta wartość  $f_q = 10$  Hz.



a) współczynnik  $\xi_S$  dla przejazdu przez próg

b) współczynnik  $\xi_G$  dla przejazdu przez szczelinę

Rys. 5. Współczynniki krzywej  $\xi_S$ ,  $\xi_G$ , charakteryzujące dynamikę przejazdu przez nieciągłość toru  
Fig. 5. Curve factors  $\xi_S$ ,  $\xi_G$ , that characterizes the dynamic of travelling on uneven surface

Siła dynamiczna spowodowana jazdą po nierównej powierzchni jest obliczana jako iloczyn sił ciężkości odpowiednich mas dźwignicy  $m_w$  i ładunku  $m_H$  przez współczynnik  $\varphi_4$ :

$$F_{dj} = \varphi_4 \cdot (m_w + m_H) \cdot g \quad (14)$$

Siła ta powinna być obliczona oddzielnie dla jazdy ustroju nośnego  $F_{djb}$  i oddzielnie dla jazdy dla wózka  $F_{djw}$ .

## 2.5. Siły dynamiczne przyspieszania ruchów roboczych (napędów) dźwignicy

Dźwignice charakteryzują się ruchem przerywanym, co wiąże się z występowaniem sił wywołanych przyspieszeniami lub opóźnieniami ruchów roboczych (napędu podnoszenia, jazdy, obrotu i/lub zmiany wysięgu). Są to w zasadzie siły bezwładności i jako obciążenia skojarzone powinny być uwzględnione dla tych ustrojów nośnych oraz ładunku brutto, na które działają.

Obciążenia powstające w dźwignicy wskutek przyspieszeń lub opóźnień mogą być obliczone z zastosowaniem prostego modelu dynamicznego ciała sztywnego. W metodzie tej przyjmuje się, że ładunek brutto jest zaczepiony sztywno na końcu wysięgnika lub bezpośrednio poniżej wciągarki przejezdnej.

Analiza ruchu ciała sztywnego bezpośrednio nie odzwierciedla wpływów sprężystości (i tłumienia), dlatego wpływy te należy uwzględnić mnożąc składniki zmian obciążenia napędu  $\Delta S$  przez współczynnik  $\varphi_5$  [1, 7]. Wtedy obciążenie spowodowane przyspieszeniem lub opóźnieniem ruchu roboczego danego mechanizmu (napędu) można wyznaczyć z zależności (rys. 6):

$$\bar{S} = S_i + \varphi_5 \cdot \Delta S \quad (15)$$

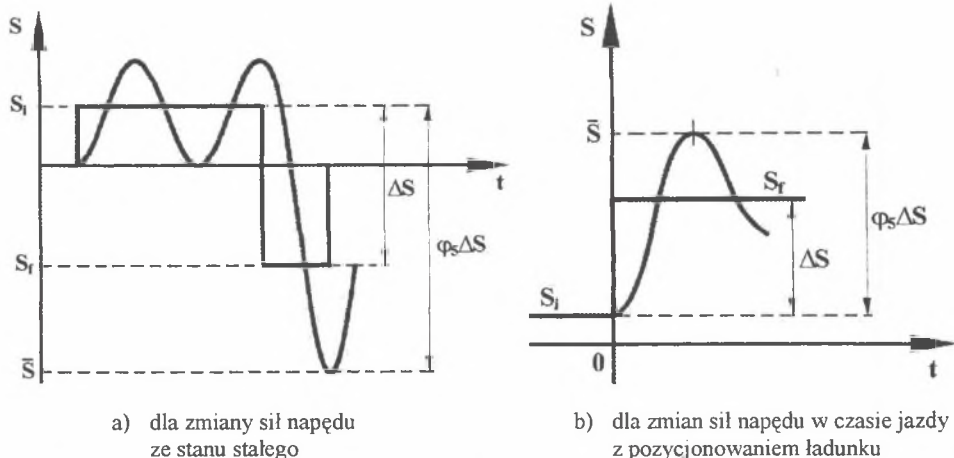


gdzie:

$S_i$ ,  $S_f$  – początkowa i końcowa wartość obciążenia wywołana siłą napędową początkową  $F_i$  i końcową  $F_f$ ,

$\Delta S = S_f - S_i$  – zmiana obciążenia spowodowana zmianą siły napędowej  $\Delta F = F_f - F_i$ , w ruchu ustalonym,

$\varphi_5$  – współczynnik zależny od więzów i luzów w mechanizmach napędowych, którego wartość powinna być przyjmowana od 1 do 3.



Rys. 6. Współczynnik  $\varphi_5$  i obciążenie skojarzone  $\bar{S}$  spowodowane przyśpieszeniem ruchu roboczego (napędu) dźwignicy

Fig. 6. Factor  $\varphi_5$  and load effect  $\bar{S}$  caused by acceleration of cranes drives

Kierunek obciążeń  $\bar{S}$  (np.: siły dynamicznej przyśpieszania napędu jazdy dźwignicy  $F_{dpb}$  lub siły dynamicznej przyśpieszania napędu jazdy wózka  $F_{dpw}$ ) jest styczny do kierunku ruchu roboczego (jazdy, obrotu, podnoszenia).

## 2.6. Siły od obciążeń wywołanych odkształceniami

W obliczeniach ustrojów nośnych należy uwzględnić przewidziane w projekcie siły od obciążeń spowodowanych odkształceniami, np.: wstępnym napięciem (sprężaniem ustroju), lub wynikające z odkształceń mieszczących się w polu tolerancji wykonania, jak odchyłki w rozstawie lub wysokości szyn lub posadowienia podpór. Norma prEN 13001-2 nie precyzuje szczegółów w zakresie liczbowego określania tych sił.

## 3. PODSUMOWANIE

Dla wszelkiego typu dźwignic, z których niektóre mają bardzo skomplikowaną budowę i posiadają masę własną dochodzącą do 500 t, odpowiednie i dokładne wyznaczenie obciążeń obliczeniowych ma podstawowe znaczenie w procesie wymiarowania. Przedstawione powyżej obciążenia należą do grupy obciążeń regularnych. Poza nimi występują również w eksploatacji dźwignic obciążenia nieregularne i wyjątkowe, do których należą m.in. obciążenia od wiatru w stanie roboczym i nieroboczym (burzowym) [8] oraz

obciążenia na podestach i dojściach. Po wyznaczeniu obciążeń, następnym etapem wymiarowania konstrukcji nośnej dźwignic jest ich odpowiednie skojarzenie, a następnie sprawdzenie warunków wytrzymałości statycznej, wytrzymałości zmęczeniowej, wytrzymałości połączeń oraz stateczności zespołów [5, 6].

## Literatura

1. prEN 13001-2:2003. Cranes – General design – Part 2: Load effects.
2. prEN 13001-1:2003. Cranes – General design – Part 1: General principles and requirements.
3. prEN 13001-3.1:2004. Cranes – General design – Part 3.1: Limit states and proof of competence of steel structures.
4. prEN 1993-1-1:2003. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.
5. Gąska D., Chmurawa M.: Geometryczne modelowanie suwnicy jako podstawa wymiarowania jej ustroju nośnego w świetle norm europejskich. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport z. 56, Gliwice 2004, s. 223-228.
6. Chmurawa M., Gąska D.: Problemy wymiarowania ustrojów nośnych dla przejezdnych podwieszonych urządzeń transportowych. Transport Przemysłowy nr 2, 2004, s. 6-9.
7. Chmurawa M., Gąska D., Markusik S.: Nowe metody projektowania i obliczania ustrojów nośnych dźwignic. Praca badawcza OBRDiUT „Detrans”. Bytom 2004.
8. Markusik S.: Obciążenia od wiatru w konstrukcjach stalowych dźwignic zgodne z normami europejskimi. Transport Przemysłowy nr 3(5), 2001, s. 32-35.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Antoniak