Seria: GÓRNICTWO z. 175

Nr kol. 986

Kazimierz STOIŃSKI

PODPORA HYDRAULICZNA JEDNOTELESKOPOWA Z ZAWOREM BEZPIECZEŃSTWA – ZALEŻNOŚCI ANALITYCZNE DLA WYBRANYCH OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH

> Streszczenie. Praca dotyczy analitycznego wyznaczania przebiegów czasowych ciśnienia cieczy hydraulicznej oraz suwu tłoczyska podpory jednoteleskopowej, wyposażonej w zawór bezpieczeństwa dla wybranych rodzajów obciążenia dynamicznego. Zależności wyprowadzono posługując się modelem podpory o jednym stopniu swobody dla dyskretnego rozłożenia masy i sprężystości. Zawór przyjęto jako oporność wypływu cieczy włączanej i wyłączanej do obwodu hydraulicznego podpory z opóźnieniami wynikającymi z charakterystyk dynamicznych. Przypadki obciążeń przyjęto najczęściej stosowane w badaniach: udar masy, wymuszenie siły i prędkości o przebiegu sinusoidalnym i trapezowym. Relacje analityczne wyznaczono rozwiązując równania różniczkowe opisujące model podpory – liniowe dla zaworu zamkniętego oraz nieliniowe o zmiennych parametrach dla zaworu otwartego. Analityczne zależności będą wykorzystane w pracach Głównego Instytutu Górnictwa dotyczących doboru obudów do warunków ścian zagrożonych tąpaniami oraz atestacji.

1. Wprowadzenie

Odporność podpory hydraulicznej na obciążenia dynamiczne, a w szczególności udarowe jest przedmiotem dużego zainteresowania z uwagi na systematyczne powiększanie się ilości eksploatowanych ścian zagrożonych tąpaniami. Zwiększanie odporności na obciążenia dynamiczne podpory uzyskuje się przez przyrost grubości ścianki cylindra, zastosowanie lepszych materiałów lub zwiększenie objętości cieczy hydraulicznej. Kierunek ten jest ograniczany przez przyrost ciężaru, co w warunkach dołu kopalni jest bardzo istotne lub wzrostu kosztów produkcji. Zwiększenie odporności na obciążenia dynamiczne i to bardzo znaczne, można uzyskać również przez zastosowanie zaworu bezpieczeństwa. Zawory te są już stosowane powszechnie do produkowanych w CSRS i RFN podpór przeznaczonych do ścian zagrożonych tąpaniami. W Polsce nie stosuje się w chwili obecnej zaworów bezpieczeństwa dla produkowanych podpór, prace badawcze i konstrukcyjne są prowadzone również w ograniczonym zakresie. Jednym z podstawowych utrudnień dla badań jest brak w kraju odpowiedniego wyposażenia badawczego.

Budowa stoisk, zakup odpowiedniej aparatury pomiarowej, opracowanie metodyk badawczych wymaga dużych nakładów finansowych, organizacyjnych i

wykonawczych, na co w obecnych warunkach gospodarczych jest trudno znaleźć środki. Pozostają dostępne metody analityczne, które umożliwiają na podstawie gabarytów podpory określenie jej własności dynamicznych. Koszty wyznaczenia charakterystyk podpory metodami analitycznymi są niewspółmiernie niskie w stosunku do stoiskowych i mogą być z powodzeniem wykorzystywane do oceny odporności na obciążenia dynamiczne.

W pracy podano zależności analityczne opisujące ciśnienie cieczy hydraulicznej i suw tłoczyska dla podpory wyposażonej w zawór bezpieczeństwa i obciążanej wybranymi obciążeniami dynamicznymi. Zależności analityczne wyznaczono dla najczęściej stosowanej podpory, tzn. jednoteleskopowej. W obliczeniach wykorzystano analogie elektromechaniczne oraz rachunek operatorowy Laplace'a-Carsona.

2. Podstawy teoretyczne

Badanie podpór hydraulicznych wyposażonych w zawory bezpieczeństwa prowadzi się w stoiskach kafarowych lub prasach wyposażonych w akumulatory hydrauliczne. Podpora obciążana jest udarem masy lub wymuszeniem siły czy prędkości o różnych przebiegach w funkcji czasu. Rodzaje typowych obciążeń podpory stosowanych w badaniach stoiskowych przedstawiono na rys.1.

Badanie przebiega przy obciążeniu dynamicznym podpory dla różnych podporności wstępnych, wysuwów tłoczyska, rodzajów konstrukcji czy wyposażenia. W trakcie obciążenia dynamicznego dokonuje się najczęściej pomiarów suwu tłoczyska, ciśnienia cieczy hydraulicznej, naprężeń w cylindrze czy



Rys. 1. Rodzaje obciężeń podpory hydraulicznej

a – udar masą, b – wymuszenie prędkości – przebieg sinusoidalny, c – wymuszenie siły – przebieg sinusoidalny, d – wymuszenie prędkości i siły – przebieg trapezowy

Fig. 1. Type of hydraulic prop load

a - mass stroke, b - velocity forcing - sinusoid coruse, c - strength forcing - sinusoid course, d - velocity and strength forcing - trapezoid course

sił w wybranych elementach. Najistotniejszymi wielkościami mierzonymi są suw oraz ciśnienie cieczy hydraulicznej.

Zależności analityczne wyprowadzono dla przyjętego modelu podpory o dyskretnym rozłożeniu masy i sprężystości podanego przez Olaszowskiego 1, s.8. Przyjęcie dyskretnego rozłożenia masy i sprężystości jest uzasadnione z uwagi na różnicę o więcej niż rząd wielkości pomiedzy przebiegiem fali dźwiękowej w podporze w stosunku do rozpatrywanego zjawiska. Sposób wyznaczania analitycznego ciśnienia cieczy hydraulicznej dla podpory z zaworem bezpieczeństwa obciążonej udarem masy podaje literatura [3, s.26]. Obciążony on jest jednak znacznym błędem wynikającym z przyjecia liniowej charakterystyki zaworu bezpieczeństwa oraz stałych parametrów podpory dla przypadku pracy z otwartym zaworem bezpieczeństwa. Masa i sprężystość podpory w zależności od stanu zaworu bezpieczeństwa są wielkościami stałymi (dla zaworu zamkniętego) lub zmieniającymi się w zależności od ilości cieczy hydraulicznej (dla zaworu otwartego). Dla pierwszego przypadku (zawór zamknięty) przebiegi dynamiczne podpory opisujemy równaniami różniczkowymi liniowymi, w drugim (zawór otwarty) równaniami różniczkowymi liniowymi o zmiennych parametrach. Wypływ cieczy hydraulicznej z wielkością ciśnienia powiązany jest zależnościami nieliniowymi, co powoduje, że równanie różniczkowe staje się również nieliniowe. Rozwiązanie tego typu równań jest możliwe jedynie dla niektórych przypadków. Przyjmując dla dostatecznie małego odcinka czasu 🛆 stałość parametrów podpory oraz wprowadzając w podanym odcinku linearyzację, możemy zastąpić równania różniczkowe nieliniowe o zmiennych parametrach równaniami różniczkowymi liniowymi o stałych parametrach. Wymaga to jednak przy rozwiązywaniu dokonywania wielokrotnych wyliczeń parametrów podpory, warunków. poczatkowych oraz wartości funkcji, co w konsekwencji prowadzi do konieczności zastosowania maszyn cyfrowych.

Zalażności wylicza się opierając się na modelu matematycznym podpory. Model budujemy wprowadzając założenie osiowego przyłożenia obciążenia dynamicznego oraz pominięciu tarcia. Wielkościami wyliczanymi w modelu jest siła oraz prędkość, stanowiac podstawę wyznaczenia ciśnienia i suwu.

Dla występujących w praktyce przypadków oraz przyjętych założeń upraszczających podporę przedstawiamy jako układ drgający nietłumiony lub aperiodyczny. Wymienione dwa stany podpory związane są z otwarciem lub zamknięciem zaworu bezpieczeństwa, a więc:

I – zawór bezpieczeństwa zamknięty, przebiegi periodyczne nietłumione,
 II – zawór bezpieczeństwa otwarty, przebiegi aperiodyczne.

Przejście stanu podpory z układu drgającego nietłumionego do aperiodycznego wymuszone jest własnościami zaworu bezpieczeństwa.

Dla przypadku zaworu zamkniętego model opisują relacje:

 $H_1 = A_1 \times G_1$

(1)

Podpora hydrauliczna jadnoteleskoccaa...

K. Stoiński

ati w wybranych diamentach. Mattatotniajazymi wielkościemi mierzonymi so adzie: eum oraz ciénienie cleczy hydreulicznej.

A1 - macierz współczynników podpory (stałe dla przedziału obliczeniodeskrotnym roziożeniu may i sprężystości podanego przez Ola, (opewildgo - wektor

(prędkość – wielkość wyliczana), H, – wektor warunków początkowych (siła – wielkość początkowa dla przedziału obliczeniowego) natomiast dla zaworu otwartego 3. a.26. Obciazony on test fednak znacznya bledza wynikatecym z przyto-

- H2 = A2 x G2 salo amtanesseigted unowas lighterestate card and trow pedpery dia przypadku pracy z otwartym zaworem bezpieczenietwa. Masaj sprožystoše podpory * zaležnošet od stanu zamoru bazplaozedatna staizbo stalkościeni stałymi intstocymt sie w za-

macierz współczynników podpory (staże dla kroku obliczeniowego, -102 współczynniki macierzy są funkcjami wysuwu tłoczyska i ciśnienia ymotuezo cieczy hydraulicznej). wszego przypadku (zawór zamknięty) przebieg

G, - waktor (prędkość - wielkość wyliczana),

H. - wektor warunków poczatkowych (siła - wielkość poczetkowa dla kroco powoduje. 20 robliczeniowego), 012 ejste evolutional electrony es eluborad op zanie tego typu równań jest nożitwe jedynie dla niektórych przypadków,

Rząd równania różniczkowego opisujący podporę wynika z przyjętej liczby stopni swobody modalu. Przyjęto dla rozpatrywanej podpory jednoteleskopowej model o jednym stopniu swobody. Przyjęcie takiego założenia przybliża w sposób wystarczający wielkości wyliczane analitycznie z uzyskanymi doświadczalnie, a równocześnie radykalnie upraszcza procedury obliczeniowe 3, s.53 . henore thomewheney a constrained tobother same device to soo

Zależności opisujące dynamikę podpory wyznaczono wykorzystując rachunek operatorowy Laplace'a-Carsona oraz analogie elektromechaniczne [5, 6]. Przyjęto następujące analogie:

- sile f odpowiada napięcie elektryczne U,
- sprężystości k odpowiada odwrotność pojemności 🛱,
- masie m odpowiada indukcyjność L,
- odporowi wypływu cieczy z zaworu bezpieczeństwa R_h, odpowiada rezystancjal R, lonawio S as anazalar podpory zwiezana se z otwarci, karojecioga
- prędkości v odpowiada prąd elektryczny I,
- przesunięciu 1 odpowiada ładunek elektryczny q.

Na rys. 2 przedstawiono podporę hydrauliczną jednoteleskopową w stoiskach badawczych oraz odpowiadający model zbudowany według podanych założeń. Elementy modelu podpory wyliczamy na podstawie gabarytów z zależno-Die przypadku zaworu zasknierogo nodal opiauja relacja: ści:

$$k_2 = \frac{BA_2}{I_2}$$
, $Nm^{-1}m'_{2z} = (0,4m_{h1} + m_t + m_k + m_{d1} + m_{t21} + m_{dh1})$, kg (3)

gdzie:		
A2	-	powierzchnia cylindra, m ² ,
В	-	moduł ściśliwości cieczy hydraulicznej, Nm ⁻² ,
12	-	Nysokość słupa cieczy hydraulicznej, m,
^m t ł1	-	nasa tłoczyska teleskopu, kg,
^m dh1	-	masa dodatkowa związana z cieczą hydrauliczną, kg,
^m dt	-	nasa dodatkowa tłoczyska, kg,
m _{h1}	-	nasa cioczy hydraulicznej, kg,
mk	-	nasa koronki oraz obudowy powiązanej mechanicznie z tłoczyskiem,
		kg.





model o jednym stopniu swobody





Rys. 2. Podpora hydrauliczna jednotloskopowa w stoisku badawczym oraz odpowiadający model

a - stoisko kafarowe, b - stoisko oparte o prasę hydrauliczną Fig. 2. Single-telescope hydraulic prop at the test rig and the respective model

a - pile-driber rig, b - hydraulic press rig

(4)

(5)

Elementy modelu są wielkościami stałymi dla zaworu zamkniętego lub zmieniającymi się z każdym krokiem obliczeniowym dla zaworu otwartego, co możemy zapisać:

$$F_{n} = F_{n-1}(\Delta t) \stackrel{c}{=} U_{n} = U_{n-1}(\Delta t)$$

$$V_{n} = V_{n-1}(\Delta t) \stackrel{c}{=} I_{n} = I_{n-1}(\Delta t)$$

$$m_{n} = m_{n-1}(\Delta t) \stackrel{c}{=} L_{n} = L_{n-1} - c_{1} \int_{0}^{\Delta t} i_{2,n-1}(t) dt$$

$$k_{n} = k_{n-1}(\Delta t) \stackrel{c}{=} [c_{n}]^{-1} = [c_{n-1} - c_{2} \int_{0}^{\Delta t} i_{2,n-1}(t) dt]^{-1}$$

Elementy modelu m_n i k_n powiązane są z ilością cieczy hydraulicznej (zmiana l_2 i m_{h1}), wypływ której powoduje powiększanie wartości k_n i zmniejszenie wartości m_n (wg zależności 3). Wypływ cieczy hydraulicznej dla stałych gabarytów zaworu, sposobu działania oraz rodzaju wypływu zależy od wielkości ciśnienia cieczy hydraulicznej.

Stosowane są zawory bezpieczeństwa nie regulowane, pracujące dwustanowo. Otwarcie zaworu następuje po przekroczeniu wartości ciśnienia ponad ciśnienie otwarcia, zamknięcie wynika z histerezy. Przebieg czasowy otwarcia i zamknięcia zaworu, tzn. zmiany przekroju wypływu następuje w zależności od stałej czasowej zaworu. Wypływ cieczy hydraulicznej uzależniony jest nie tylko od przekroju otworu wypływowego, ale również od rodzaju wypływu (laminarny - turbulentny), różnicy ciśnień, strat miejscowych ciśnienia, rodzaju cieczy. Dla warunków, w których pracują zawory, tak ze wzoledu na wielkości ciśnienia, jak również liczbę Reynoldsa, można przyjąć, że występuje wypływ turbulentny. Zawór bezpieczeństwa, charakterystyki z nim związane oraz model przedstawiono na rys. 3. Do analizy pracy zaworu oraz budowy modelu wykorzystano pracę Guillona [2, s.63]. Uwzględnienie wszystkich elementów mających wpływ na wielkość wypływu cieczy hydraulicznej nie jest możliwe ze względu na znaczne komplikacje obliczeniowe. Przyjęto, że zawór będzie przedstawiony jako wypadkowy opór wypływu cieczy, włączany i wyłączany do układu hydraulicznego podpory z odpowiednimi opóźnieniami czasowymi. Uwzględniając, że zawór współpracuje z podporą, opisujemy go z wykorzystaniem prędkości i siły (wielkości stosowane w opisie podpory). Prędkość suwu tłoczyska jest powiązana ze zmianą ilości cieczy, siła z ciśnieniem, a więc opór wypływu określamy jako nachylenie stycznej w punkcie (P_n , Q_n) do krzywej P = f(Q)

 $R_{n} = \frac{dP_{n}}{dQ_{n}} \triangleq R_{n} = \frac{dF_{2}}{dV_{2}} \triangleq R = \frac{dU}{dI}$

a graficznie przedstawiono na rys. 4.













a – przekrój, b – charakterystyka zastępcza zaworu, c – przebieg czasowy otwarcia i zamknięcia zaworu (I, II – rzeczywisty, III, IV – zastępczy) d – analog zaworu

Fig. 3. Safety valve

a - cross-section, b - valve equivalent characteristics, c - time course: valve opening and closing (I, II - real, III, IV - equivalent), c - valve analogue

Współczynniki prostej stycznej w punkcie (P_n , Q_n) do krzywej $P = c_2 Q^2$ (przyjęto wypływ turbulentny) mają postać:

$$R_{h} = 2c_{2}Q_{n} = 2c_{2}V_{2n}A_{2}$$

$$P_{on} = \frac{F_{on}}{A_{2}} = -c_{2}Q_{n}^{2} = -c_{2}V_{2n}^{2}A_{2}^{2}$$

gdzie:

$$A_z = powierzchnia wypływu z zaworu, m2,
 $C_2 = \frac{5}{20A^2}$, Ns²m⁻⁸$$

F₂ - siła nacisku tłoka na ciecz hydrauliczną, N,

g - przyspieszenie ziemskie, ms⁻²,

(6)



Rys. 4. Sposób linearyzacji zaworu bezpieczeństwa Fig. 4. Safety valve delinearization method

Według podanych zasad zbudowano analog podpory hydraulicznej wyposażonej w zawór bezpieczeństwa, który został przedstawiony na rys. 5. Na rysunku tym przedstawiono również analogi wybranych rodzajów obciążeń. Wyliczenia dokonano posługując się analogiem. Objęły one ciśnienie cieczy hydraulicznej i suw tłoczyska dla zaworu bezpieczeństwa zamkniętego oraz dodatkowo dla otwartego szybkość wpływu cieczy hydraulicznej przez zawór. Szybkość wypływu cieczy hydraulicznej jest wielkością wykorzystywaną do wyliczania wartości elementów modelu (m. k. w przypadku otwarcia zaworu.

Wyniki wyliczeń podano w postaci relacji niezbędnych do praktycznego wykorzystania, nie załączając pełnych wyprowadzeń z uwagi na zbyt dużą objętość. Indeksem n. oznaczono kolejne przedziały czasu przy oblicze-

g = przyspieszenie ziemekie, me⁻²,



Rys. 5. Analog elektryczny podpory hydraulicznej jednoteleskopowej (przyjęto jeden stopień swobody) wyposażonej w zawór bezpieczeństwa oraz analogi elektryczne obciażeń

Fig. 5. Electric analogue of hydraulic single-telescope prop (one degree of freedom adopted) provided with safety valve and load electric analogues

niach w przypadku zaworu otwartego, indeksem m kolejne cykle obliczeniowe dla zaworu zamkniętego. Zamiana modelu odpowiadającego podporze z otwartym lub zamkniętym zaworem następuje w momentach przekraczania wielkości ciśnienia dla otwarcia lub zamknięcia zaworu przez ciśnienie cieczy hydraulicznej opóźnionych dodatkowo o wielkość stałych czasowych zaworu. W chwilach zmiany modelu następuje wyznaczanie warunków początkowych. Przewidywany obliczeniowy przebieg czasowy ciśnienia cieczy hydraulicznej w podporze wyposażonej w zawór bezpieczeństwa obciążonej udarem masy przedstawiono na rys. 6.

2.1. Obciążenie udarem masowym

Zgodnie z analogiem przedstawionym na rys. 5, wyprowadzone zależności opisujące ciśnienie cieczy hydraulicznej oraz suw tłoka mają postać:

 I - zawór bezpieczeństwa zamknięty (wyłącznik w analogu w pozycji wyłączonej)

$$P_{2,m}(f) = p_{w} + \frac{\omega_{1}}{A_{2}}(mV_{o} + m_{2z,m}'V_{2,m})sin\omega_{1,mt}, Nm^{-2}$$

$$l_{1,m}(f) = \int_{0}^{t} v_{1,m}(x)dx, m$$

gdzie:

m – masa bijaka, kg

 $m'_{2} = (m_{h1} + m_{t} + m_{k} + m_{d1} + m_{t1} + m_{dh1}), kg,$

259

(7)



Rys. 6. Przewidywany przebieg ciśnienia cieczy hydraulicznej w podporze wyposażonej w zawór bezpieczeństwa przy obciążeniu udarem masy

	I	-	zawór	bezpied	czeństwa zamknięty
	M	51	punkt	otwarci	ia zaworu zmiana modelu,
	N	-	punkt	zamknię	ęcia zaworu wyliczenie wartości początkowej
	P	-	Г	7	- maksynalne
	Pn	-	ciśnienie	- minimalne	
	Pw	-	cieca	zy	- wstępne
	Pzo	-	0100	and and	- otwarcia zaworu
	Pzz	-	hydra nej	aulicz-	- zamknięcia zaworu
	t,	-	Ē	7	- osiągnięcia ciśnienia otwarcia zaworu
	t	t	czas	– opóźnienie otwarcia	
	t			- opóźnienie zamknięcia	
	En An		The solution is		
	Δt	-	-	olocity re-	- krok obliczeniowy
Fig.	∆t 6. Tł	-	foreca vide	asted co ad with	- krok obliczeniowy ourse of hydraulic liquid pressure in a prop pro- safety valve on load by mass stroke
Fig.	∆t 6. Th I	-	foreca vide safety	asted co ad with y valve	- krok obliczeniowy ourse of hydraulic liquid pressure in a prop pro- safety valve on load by mass stroke closed
Fig.	At 6. Th II	10	foreca vide safety safety	asted co ad with y valve y valve	- krok obliczeniowy ourse of hydraulic liquid pressure in a prop pro- safety valve on load by mass stroke closed opened
Fig.	∆t 6. Th I II N N		foreca vide safety safety valve valve	asted co ad with y valve y valve opening closing	- krok obliczeniowy ourse of hydraulic liquid pressure in a prop pro- safety valve on load by mass stroke closed opened g point change of model g point initial value calculation
Fig.	∆t 6. Th I II M N P_m		foreca vide safety safety valve valve	asted co ad with y valve y valve opening closing	 krok obliczeniowy burse of hydraulic liquid pressure in a prop pro- safety valve on load by mass stroke closed opened g point change of model g point initial value calculation maximum
Fig.	At 6. Th II M N P m P		foreca vide safety safety valve valve	asted co ad with y valve y valve opening closing raulic uid	 krok obliczeniowy burse of hydraulic liquid pressure in a prop pro- safety valve on load by mass stroke closed opened g point change of model g point initial value calculation maximum minimum
Fig.	At 6. Th II M N Pm Pm Pm		foreca vide safety safety valve valve hydr liqu pres	asted co ad with y valve opening closing raulic uid ssure	 krok obliczeniowy burse of hydraulic liquid pressure in a prop pro- safety valve on load by mass stroke closed opened point change of model point initial value calculation maximum minimum initial
Fig.	Δt 6. TH II M P m P n P v v P		foreca vide safety safety valve valve fhydr liqu pres	asted co ad with y valve opening closing raulic uid ssure	 krok obliczeniowy burse of hydraulic liquid pressure in a prop pro- safety valve on load by mass stroke closed opened g point change of model g point initial value calculation maximum minimum initial valve opening
Fig.	Δt 6. Th II M P m P m P v P zo P zo		foreca vide safety safety valve valve hydr liqu pres	asted co ad with y valve opening closing raulic uid ssure	 krok obliczeniowy burse of hydraulic liquid pressure in a prop pro- safety valve on load by mass stroke closed opened point change of model point initial value calculation maximum minimum initial valve opening valve closing
Fig.	At 6. Th I II M N Pm Pn Piv Pzo Pzz t ₁		foreca vida safety valve valve hydr liqu pres	asted co ad with y valve opening closing raulic uid ssure	 krok obliczeniowy burse of hydraulic liquid pressure in a prop pro- safety valve on load by mass stroke closed opened point change of model point initial value calculation maximum minimum initial valve opening valve closing reaching valve opening pressure
Fig.	At 6. Th III M N P m P n P v P zz t 1 t zz		foreca vida safety valve valve hydr liqu pres	asted co ad with y valve opening closing raulic uid ssure	 krok obliczeniowy burse of hydraulic liquid pressure in a prop pro- safety valve on load by mass stroke closed opened point change of model point initial value calculation maximum initial valve opening valve closing reaching valve opening pressure opening delay
Fig.	At 6. TH I III M N P m P r P zz t 1 t zo t		foreca vide safety valve valve hydr liqu pres	asted co ad with y valve opening closing raulic uid ssure	 krok obliczeniowy burse of hydraulic liquid pressure in a prop pro- safety valve on load by mass stroke closed opened point change of model point initial value calculation maximum initial valve opening valve closing reaching valve opening pressure opening delay closing delay

- calculation step

Δt

$$\begin{split} \mathbf{m}'_{2z,m} &- \mathsf{masa zredukowana podpory, kg} \\ \mathbf{h} &- \mathsf{wysokość swobodnego spadku bijaka, m,} \\ \mathbf{h}_z &= \mathbf{h} \frac{\mathbf{m}'_{2z}}{\mathbf{m}_2}, \ \mathbf{m} \\ \mathbf{V}_o &= \sqrt{2h_z g}, \ \mathbf{ms}^{-1}, \\ \mathbf{V}_{2,m} &- \mathsf{prędkość, warunek początkowy cyklu po każdorazowym zamknię-ciu zaworu, ms^{-1}, \\ \mathbf{V}_{1,m}(\mathbf{x}) &= \sqrt{\left(\frac{\mathbf{m}\mathbf{V}_o + \mathbf{m}'_{2z,m}\mathbf{V}_{2,m}}{\mathbf{m} + \mathbf{m}'_{2z,m}}\right)^2} + \left(\frac{A_2 \mathbf{P}_{1,m}}{\mathbf{k}_{2,m}}\right)^{2} \sin(\omega_{1,m} t - \mathbf{\varphi}_{1,m}) \ \mathbf{ms}^{-1}, \\ \boldsymbol{\omega}_{1,m} &= \sqrt{\frac{\mathbf{k}_{2,m}}{\mathbf{m} + \mathbf{m}_{2z,m}}}, \ \mathbf{s}^{-1} \\ \mathbf{\varphi}_{1,m} &= \operatorname{arc tg} \frac{A_2 \mathbf{P}_{m}}{\boldsymbol{\omega}_{1,m}(\mathbf{m}\mathbf{V}_o + \mathbf{m}'_{2z,m}\mathbf{V}_{2,m})}, \ \mathbf{rd} \end{split}$$

II - zawór bezpieczeństwa otwarty (wyłącznik w analogu w pozycji załączonej)

$$P_{2,n}(t) = \left[\frac{m'_{1,n}}{A_{2}} + \frac{m'_{n}}{R_{n}}(P_{2,n} - P_{2,n}) \frac{1}{T_{2,n} - T_{1,n}} \left(e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}\right)\right]$$
$$- \frac{t}{P_{2,n}} \frac{1}{T_{2,n} - T_{1,n}} \left(T_{1,n} - T_{2,n}\right) \frac{1}{T_{2,n} - T_{2,n}} + \frac{t}{T_{2,n}} + \frac{t}{$$

$$L_{1,n}(t) = \int_{0}^{t} V_{1,n}(x) dx, m$$
 (8)

$$V_{2,n}(t) = -\frac{P_{z,n}A_2}{R_n} + \left[\frac{m'_n}{R_n}V_{1,n} + (P_{z,n} - P_{2,n})\frac{m'_nA_2}{R_n^2}\right]\frac{1}{T_{2,n} - T_{1,n}}$$

$$(e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}) - \frac{P_{2,n}A_2}{R_n} \frac{1}{T_{2n} - T_{1,n}} (T_{1,n}e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} - T_{2,n}e^{-\frac{t}{T_{2,n}}}), me^{-1}$$

gdzie: $m'_n = m + m'_{2z,n}$, kg

$$T_{1,n} = \frac{m'_{n}}{2R_{n}} \sqrt{\left(\frac{m'_{n}}{2R_{n}}\right)^{2} - \frac{m'_{n}}{k_{2,n}}}, s$$

K. Stoiński

$$T_{2,n} = \frac{m'_{n}}{2R_{n}} + \sqrt{\left(\frac{m'_{n}}{2R_{n}}\right)^{2} - \frac{m'_{n}}{k_{2,n}^{2}}}, s$$

$$V_{1,n}(t) = -\frac{P_{z,n}A_{2}}{R_{n}} - (V_{1,n} + \frac{P_{z,n}A_{2}}{R_{n}}) \frac{1}{T_{2,n}-T_{1,n}}(T_{1,n}e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} - T_{2,n}e^{-\frac{t}{T_{2,n}}})$$

$$-\frac{P_{2,n}A_{2}}{k_{2,n}(T_{2,n}-T_{1,n})} \left(e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}\right), ms^{-1}$$

2.2. Wymuszenie siłą - przebieg sinusoidalny

Ciśnienie cieczy hydraulicznej oraz suw tłoczyska wyznaczono posługując się modelem przedstawionym na rys. 5 oraz przebiegiem siły wymuszającej przedstawionej na rys. 7.

Rys. 7. Wymuszenie siłą – przebieg sinuosidalny Fig. 7. Forcing by strength, sinusoid course

Relacje mają postać:

 I - zawór bezpieczeństwa zamknięty (wyłącznik w analogu w pozycji wyłączonej)

$$P_{2,m}(t) = (P_{w}-P_{2,m})(1-\cos_{2,m}t) + V_{1,m} \frac{m_{m}^{\prime}\omega_{2,m}}{A_{2}} \sin\omega_{2,m}t + \frac{F\omega_{2,m}}{(\omega_{2,m}^{2}-\Omega^{2})A_{2}} \left\{ \omega_{2,m}\sin\Omega t - \Omega\sin\omega_{2,m}t - \left[\omega_{2,m}\sin\Omega(t-T) - \Omega\sin\omega_{2,m}t - \Omega\sin\omega_{2,m}t - \Omega\sin\Omega(t-T) - \Omega\sin\omega_{2,m}t - \Omega\sin\omega_{2,m}t - \Omega\sin\Omega(t-T) - \Omega\sin\omega_{2,m}t - \Omega\sin\omega_{2,m}t - \Omega\sin\Omega(t-T) \right\}, Nm^{-2}$$

$$I_{1,m}(t) = \int_{0}^{t} V_{1,m}(x)dx, m$$
(9)

gdzie: m' = m + m'2z,m'

$$V_{1,m}(x) = \frac{P_{w}A_{2} - P_{2,m}A_{2}}{m'_{m}\omega_{2,m}} \sin\omega_{2,m}x + V_{1,m}\cos\omega_{2,m}x + \frac{F\Omega}{m'_{m}(\omega_{2,n}^{2} - \Omega^{2})} \left\{ \cos\Omega x - \cos\omega_{2,m}x - \left[\cos\Omega(x-T) - \cos\omega_{2,m}(x-T) \right] H(x-T) \right\}, ms^{-1}$$
$$\omega_{2,m} = \sqrt{\frac{k_{2,m}}{m'_{m}}}, s^{-1}$$

kg

 II - zawór bezpieczeństwa otwarty (wyłącznik w analogu w pozycji wyłączonej).

$$\begin{split} P_{2,n}(t) &= \frac{V_{1,n}m_{n}^{t}D_{n}}{A_{2}} (e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}) + P_{2,n}(A_{n}e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} + B_{n}e^{-\frac{t}{T_{2,n}}}) + \\ &+ P_{2,n}\frac{m_{n}^{t}D_{n}}{R_{h}} (e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}) + P_{w}(1 - A_{n}e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} - B_{n}e^{-\frac{t}{T_{2,n}}}) + \\ &+ \frac{F}{A_{2}} \bigg[(A_{n}E_{1,n} + B_{n}E_{2,n})ein\Omega t + \frac{A_{n}G_{1,n} + B_{n}G_{2,n}}{\Omega} (1 - \cos\Omega t) + \\ &+ H_{1,n}(1 - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}) + H_{2,n}(1 - e^{-\frac{t}{T_{2,n}}}) \bigg] - \frac{F}{A_{2}} \bigg\{ (A_{n}E_{1n} + B_{n}E_{2,n})ein\Omega(t - T) + \\ &+ \frac{A_{n}G_{1,n} + B_{n}G_{2,n}}{\Omega} \bigg[1 - \cos\Omega(t - T) \bigg] + H_{1,n}(1 - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}) + \\ &+ H_{2,n}(1 - e^{-\frac{t}{T_{2,n}}}) \bigg\} \cdot H(t - T), \quad Nm^{-2} \end{split}$$

$$\begin{split} V_{2,n}(t) &= V_{1,n} \frac{m'_{n} D_{n}}{R_{n}} (e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}) + \frac{P_{2,n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} + B_{n} e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} - \frac{t}{T_{2,n}} - \frac{m'_{n} D_{n}}{R_{n}} (e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}) \right] - \frac{P_{2,n} A_{2}}{R_{n}} \left[1 - \frac{m'_{n} D_{n}}{R_{n}} (e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}) \right] - \frac{P_{2,n} A_{2}}{R_{n}} \left[1 - \frac{m'_{n} D_{n}}{R_{n}} (e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}) \right] - \frac{P_{2,n} A_{2}}{R_{n}} \left[1 - \frac{m'_{n} D_{n}}{R_{n}} (e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}) \right] - \frac{P_{2,n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} \right] - \frac{P_{2,n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} \right] - \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} \right] - \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} \right] - \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} \right] - \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} \right] - \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} \right] - \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} \right] - \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} \right] - \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} \right] - \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} \right] - \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} \right] - \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} \right] + \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} \right] + \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} \right] + \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} \right] + \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} \right] + \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + B_{n} E_{2,n} e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} \right] + \frac{P_{n} A_{2}}{R_{n}} \left[A_{n} E_{1,n} + A_{n} E_{1,n} +$$

gdzie:

$$A_n = \frac{T_{1,n}}{T_{1,n} - T_{2,n}}, \quad B_n = \frac{-T_{2,n}}{T_{1,n} - T_{2,n}}, \quad D_n = \frac{1}{T_{2,n} - T_{1,n}}, \quad s^{-1}$$

$$E_{1,n} = \frac{1}{1+\Omega^2 T_{1,n}^2}, \quad E_{2,n} = \frac{1}{1+\Omega^2 T_{2,n}^2}, \quad G_{1,n} = \frac{\Omega^2 T_{1,n}}{1+\Omega^2 T_{1,n}}, \ s^{-1}$$

$$G_{1,n} = \frac{\Omega^2 T_{1,n}}{1+\Omega^2 T_{1,n}}, s^{-1} G_{2,n} = \frac{\Omega^2 T_{2,n}}{1+\Omega^2 T_{2,n}}, s^{-1}$$

$$H_{1,n} = -\frac{\Omega T_{1,n}}{1+\Omega^2 T_{1,n}^2}, \qquad H_{2,n} = -\frac{\Omega T_{2,n}}{1+\Omega^2 T_{2,n}^2},$$

$$-\frac{x}{T_{1,n}(x)} = V_{1,n}(A_n^{e} - \frac{x}{T_{1,n}} + B_n^{e} - \frac{x}{T_{2,n}}) - P_{2,n}A_2 \frac{D_n}{k_{2,n}}(e^{-\frac{x}{T_{2,n}}} - e^{-\frac{x}{T_{1,n}}}) -$$

$$-\frac{P_{z,n}A_2}{R_h}(1-A_n^{e}) - \frac{x}{T_{1,n}} - B_n^{e} - \frac{x}{T_{2,n}} + \frac{P_wA_2}{R_h}(1-A_n^{e}) - \frac{x}{T_{1,n}} - B_n^{e} - \frac{x}{T_{2,n}} + \frac{P_wA_2}{R_h}(1-A_n^{e}) - \frac{x}{T_{1,n}} + \frac{P_wA_2}{R_h}(1-A_n^{e}) + \frac{P_wA_2}{R_h}(1-A_n^{e}) - \frac{x}{T_{2,n}} + \frac{P_wA_2}{R_h}(1-A_n^{e}) - \frac{P$$

+ $P_{w}A_{2} \frac{D_{n}}{k_{2,n}} = \frac{x}{T_{2,n}} + \frac{x}{T_{1,n}} + \frac{F_{n}}{F_{n}} \left[(A_{n}E_{1,n} + B_{n}E_{2,n}) \sin \Omega x + \frac{F_{n}}{F_{n}} \right]$

$$+ \frac{A_{n}G_{1,n} + B_{n}G_{2,n}}{\Omega} (1 - \cos\Omega x) + H_{1,n} (1 - e^{-\frac{x}{T_{1,n}}}) + H_{2,n} (1 - e^{-\frac{x}{T_{2,n}}}) \bigg] - \\ - \frac{F}{R_{n}} \bigg\{ (A_{n}E_{1,n} + B_{n}E_{2,n}) \sin\Omega (x - T) + \frac{A_{n}G_{1,n} + B_{n}G_{2,n}}{\Omega} \left[1 - \cos\Omega (x - T) \right] + \\ + H_{1,n} (1 - e^{-\frac{x - T}{T_{1,n}}}) + H_{2,n} (1 - e^{-\frac{x - T}{T_{2,n}}}) \bigg\} H(x - T) + \frac{F}{K_{2,n}} O_{n} + \\ \cdot \left[(E_{1,n} - E_{2,n}) \sin\Omega x + \frac{G_{1,n} - G_{2,n}}{\Omega} (1 - \cos\Omega x) + H_{1,n} (1 - e^{-\frac{x}{T_{1,n}}}) - \\ - H_{2,n} (1 - e^{-\frac{x}{T_{2,n}}}) \bigg] - \frac{F}{K_{2,n}} O_{n} \bigg\{ (E_{1,n} - E_{2,n}) \cdot \sin\Omega (x - T) + \\ + \frac{G_{1,n} - G_{2,n}}{\Omega} \Big[1 - \cos\Omega (x - T) \Big] + H_{1,n} (1 - e^{-\frac{x - T}{T_{1,n}}}) - H_{2,n} (1 - e^{-\frac{x - T}{T_{2,n}}}) \bigg\} H(t - T), ms^{-1}$$

2.3. Wymuszenie prędkością - przebieg sinusoidalny

Wyznaczone w podobny sposób zależności opisujące ciśnienie cieczy hydraulicznej oraz suw tłoczyska dla zaworu zamkniętego oraz przebiegu czasowego obciężenia przedstawionego na rys. 8 opisują zależności:

Rys. 8. Wymuszenie prędkością – przebieg sinusoidalny Fig. 8. Forcing by velocity, sinusoid course

(11)

I - zawór bezpieczeństwa zamknięty (wyłącznik w analogu w pozycji wyłączonej)

$$P_{2,m}(t) = P_{W} + \frac{V_{1}}{A_{2}} \frac{k_{2,m}}{\Omega} (1 - \cos\Omega t) + \frac{V_{1}}{A_{2}} \frac{k_{2,m}}{\Omega} \left[1 - \cos(t - \frac{T}{2}) \right] .$$

$$\cdot H(t - \frac{T}{2}), \quad Nm^{-2}$$

$$I_{1,m}(t) = \int_{\Omega}^{t} V_{1,m}(x) dx, \quad m$$

gdzie: $V_{1,m}(x) = V_1 \sin \Omega x \left[1 - H(x - \frac{T}{2})\right], ms^{-1}$

II - zawór bezpieczeństwa otwarty (wyłącznik w analogu w pozycji wyłęczonej).

$$P_{2,n}(t) = V_{1}R_{n}\Omega\left\{\frac{L_{n}}{\Omega}\sin\Omega(t+\Delta T_{n}) + \frac{M_{n}}{\Omega^{2}}\left[1-\cos\Omega(t+\Delta T_{n})\right]^{+} + N_{n}(1-e^{-\frac{t+\Delta T_{n}}{T_{n}}})\right\} + \left(t+\Delta T_{n}\right) + V_{1}R_{n}\Omega\left\{\frac{L_{n}}{\Omega}\sin\Omega(t+\Delta T_{n}-\frac{T}{2}) + \frac{t+\Delta T_{n}-\frac{T}{2}}{T_{n}}\right\} + \frac{M_{n}}{\Omega^{2}}\left[1-\cos\Omega(t+\Delta T_{n}-T_{2})\right] + N_{n}(1-e^{-\frac{t+\Delta T_{n}-\frac{T}{2}}{T_{n}}})\right\} + \left(t-\Delta T_{n}-\frac{T}{2}\right) + \frac{t+\Delta T_{n}-\frac{T}{2}}{T_{n}} + P_{2,n}e^{-\frac{t}{T_{n}}} + P_{2,n}(1-e^{-\frac{t}{T_{n}}}), Nm^{-2}$$

l_{1.n}(t) - podane w relacji (11)

$$\begin{split} \mathbf{V}_{2,n}(t) &= \mathbf{V}_{1} \mathbf{\Omega} \left\{ \frac{\mathbf{L}_{n}}{\mathbf{\Omega}} \operatorname{sin} \mathbf{\Omega}(t + \Delta T_{n}) + \frac{M_{n}}{\mathbf{\Omega}^{2}} \left[1 - \cos \mathbf{\Omega}(t + \Delta T_{n}) \right] + \\ &+ N_{n} (1 - e^{-\frac{t + T_{n}}{T_{n}}}) \right\} H(t + \Delta T_{n}) + V_{1} \mathbf{\Omega} \left\{ \frac{\mathbf{L}_{n}}{\mathbf{\Omega}} \operatorname{sin} \mathbf{\Omega}(t + \Delta T_{n} - \frac{T}{2}) + \\ &+ \frac{M_{n}}{\mathbf{\Omega}^{2}} \left[1 - \cos \mathbf{\Omega}(t + \Delta T_{n} - \frac{T}{2}) \right] + N_{n} (1 - e^{-\frac{t + \Delta T_{n} - \frac{T}{2}}{T_{n}}}) \right\} H(t + \Delta T_{n} - \frac{T}{2}) + \\ &+ A_{2} (P_{2,n} - P_{z,n}) \frac{1}{R_{n}} e^{-\frac{t}{T_{n}}}, \quad \mathrm{ms}^{-1} \end{split}$$

gdzie:

$$T_{n} = \frac{1}{1+T^{2}\Omega^{2}}, \quad M_{n} = \frac{T_{n}\Omega^{2}}{1+T_{n}^{2}\Omega^{2}} s^{-1}, \quad N_{n} = -\frac{T_{n}}{1+T_{n}^{2}\Omega^{2}} s, \quad T_{n} = \frac{R_{n}}{R_{2,n}} s,$$

2.4. Wymuszenie siłą – przebieg trapezowy

Ciśnienie cieczy hydraulicznej oraz suw tłoczyska dla zaworu zamkniętogo oraz obciążenia przedstawionego na rys. 9 ma postać:

Rys. 9. Wymuszenie siłą – przebieg trapezowy Fig. 9. Forcing by strength, trapezoid course

I - zawór bezpieczeństwa zamknięty (wyłącznik w analogu w pozycji wyłączonej)

$$\begin{split} \mathsf{P}_{2,m}(t) &= \frac{\mathsf{V}_{1,m}}{\mathsf{A}_2} \, \omega_{4,m} \mathsf{m}'_{2z,m} \mathsf{sin} \omega_{4,m} t - \mathsf{P}_{W,m} \mathsf{cos} \omega_{4,m} t + \mathsf{P}_{W} (1 - \mathsf{cos} \omega_{4,m} t) + \\ &+ (\frac{\mathsf{F}_1}{\mathsf{A}_2} - \mathsf{P}_W) \frac{1}{\mathsf{T}_1} (t - \frac{1}{\omega_{4,m}} \, \mathsf{sin} \omega_{4,m} t) - \\ &- (\frac{\mathsf{F}_1}{\mathsf{A}_2} - \mathsf{P}_W) \frac{1}{\mathsf{T}_1} \Big[t - \mathsf{T}_1 - \frac{1}{\omega_{4,m}} \, \mathsf{sin} (t - \mathsf{T}_1) \Big] \mathsf{H} (t - \mathsf{T}_1) - \\ &- (\frac{\mathsf{F}_1}{\mathsf{A}_2} - \mathsf{P}_W) \frac{1}{\mathsf{T}_3} \Big[t - \mathsf{T}_1 - \mathsf{T}_2 - \frac{1}{\omega_{4,m}} \, \mathsf{sin} \omega_{4,m} (t - \mathsf{T}_1 - \mathsf{T}_2) \Big] \\ &- (\frac{\mathsf{F}_1}{\mathsf{A}_2} - \mathsf{P}_W) \frac{1}{\mathsf{T}_3} \Big[t - \mathsf{T}_1 - \mathsf{T}_2 - \frac{1}{\omega_{4,m}} \, \mathsf{sin} \omega_{4,m} (t - \mathsf{T}_1 - \mathsf{T}_2) \Big] \\ &+ \mathsf{H} (t - \mathsf{T}_1 - \mathsf{T}_2) + (\frac{\mathsf{F}_1}{\mathsf{A}_2} - \mathsf{P}_W) \frac{1}{\mathsf{T}_3} \Big[t - \mathsf{T}_1 - \mathsf{T}_2 - \mathsf{T}_3 - \frac{1}{\omega_{4,m}} \, \mathsf{sin} \omega_{4,m} (t - \mathsf{T}_1 - \mathsf{T}_2 - \mathsf{T}_3) \Big] \\ &+ \mathsf{H} (t - \mathsf{T}_1 - \mathsf{T}_2 - \mathsf{T}_3), \quad \mathsf{Nm}^{-2} \end{split}$$

$$l_{1,m}(\tau) = \int_{0}^{\tau} V_{1,m}(x) dx, m$$

gdzie: v

$$V_{1,m}(x) = V_{1,m}\cos\omega_{4,m}t - \frac{P_{w,m}A_2}{\omega_{4,m}m_{2z,m}}\sin\omega_{4,m}t + \frac{P_{w}A_2}{\omega_{4,m}m_{2z,m}}\sin\omega_{4,m}t +$$

+
$$(P_{w,m} - P_{w}) \frac{A_{2}}{\omega_{4,m} T_{1} m_{2z,m}^{2}} \cdot (1 - \cos \omega_{4,m} t) +$$

+
$$(P_{w,m} - P_{w}) \frac{A_2}{\omega_{4,m} T_1 m_{2Z,m}^2} \left[1 - \cos \omega_{4,m} (t - T_1)\right] H(t - T_1 - T_2) - (P_{2,m} - P_w)$$

$$\cdot \frac{A_2}{\omega_{4,m}T_3^{m'}2_{2,m}} \left[1 - \cos\omega_{4,m}(t - T_1 - T_2 - T_3)\right] H(t - T_1 - T_2 - T_3), \text{ ms}^{-1}$$

$$\omega_{4,m} = \sqrt{\frac{k_{2,m}}{m'_{2z,m}}}, s^{-1}$$

II - zawór bezpieczeństwa otwarty (wyłącznik w analogu w pozycji wyłączonej).

$$\begin{split} P_{2,n}(t) &= P_{z,n} \frac{m'_{2z,n}}{R_n} \bigg[E_n (1 - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}) + D_n (1 - e^{-\frac{t}{T_{2,n}}}) \bigg] + \\ &+ V_{1,n} m'_{2z,n} \bigg[E_n (1 - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}) + D_n (1 - e^{-\frac{t}{T_{2,n}}}) \bigg] + \\ &+ P_{2,n} \bigg\{ 1 - \frac{m'_{2z,n}}{R_n} \bigg[E_n (1 - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}) + D_n (1 - e^{-\frac{t}{T_{2,n}}}) - \\ &- \frac{t}{T_{1,n}} \bigg] - B_n (1 - e^{-\frac{t}{T_{2,n}}}) \bigg] \bigg\} + P_w \bigg[A_n (1 - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}}) + \\ &+ B_n (1 - e^{-\frac{t}{T_{2,n}}}) \bigg] + (\frac{F_1}{A_2} - P_w) \frac{1}{T_1} \bigg[t - T_n + G_n (1 - e^{-\frac{t + T_n}{T_{1,n}}}) + \\ &+ H_n (1 - e^{-\frac{t + T_n}{T_{2,n}}}) \bigg] H (t - T_n) - (\frac{F_1}{A_2} - P_w) \frac{1}{T_1} \bigg[t + T_n - T_1 + G_n (1 - e^{-\frac{t + T_n - T_1}{T_{1,n}}}) + \\ \end{split}$$

$$\begin{array}{c} & & & & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ &$$

$$\begin{split} \mathbf{l}_{1,n}(t) &= \int_{0}^{t} \mathbf{V}_{1,n}(x) dx, \quad \mathbf{m} \\ \mathbf{V}_{2,n}(t) &= \frac{P_{z,n} A_{2}}{R_{h}} \left\{ \frac{m'_{2z,n}}{R_{n}} \left[D_{n} \left(e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} \right) - 1 \right] \right\} + \\ &+ \mathbf{V}_{1,n} \frac{m'_{2z,n}}{R_{n}} D_{n} \left(e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} \right) + \\ &+ \frac{P_{2,n} A_{2}}{R_{n}} \left[1 - \frac{m'_{2z,n}}{R_{n}} D_{n} \left(e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} \right) - \\ &- A_{n} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} \right) - B_{n} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} \right) + \frac{P_{w}}{R_{n}} \left[A_{n} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} \right) + \\ &+ B_{n} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} \right) \right] + \left(F_{1} - P_{t,t} A_{2} \right) \frac{1}{R_{n} T_{1}} \left[t + T_{n} + O_{n} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{1,n}}} \right) + \\ &+ B_{n} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{2,n}}} \right) \right] H \left(t + T_{n} \right) - \\ &- \left(T_{1,n} \right) + \\ &+ \left(T_{n} - T_{1} \right) + \left(T_{n} - T_{1} \right) \right] + \left(T_{n} - T_{n} \right) + \\ &+ \left(T_{n} - T_{1} \right) + \left(T_{n} - T_{1} \right) + \\ &+ \left(T_{n} - T_{1} \right) + \left(T_{n} - T_{1} \right) + \\ &+ \left(T_{n} - T_{1} \right) + \left(T_{n} - T_{1} \right) + \\ &+ \left(T_{n} - T_{1}$$

 $- (F - P_{W}A_{2}) \frac{1}{R_{n}T_{1}} \left[t + T_{n} - T_{1} + O_{n}(1 - e^{-\frac{T_{n}}{T_{1}}}) + \right]$

$$+ S_{n}(1-e^{-\frac{t+T_{n}-T_{1}}{T_{2,n}}})] H(t+T_{n}-T_{1}) - \frac{t+T_{n}-T_{1}-T_{2}}{T_{1,n}} - \frac{t+T_{n}-T_{1}-T_{2}}{T_{1,n}} + S_{n}(1-e^{-\frac{t+T_{n}-T_{1}-T_{2}}{T_{2,n}}})] H(t+T_{n}-T_{1}-T_{2}) + \frac{t+T_{n}-T_{1}-T_{2}-T_{3}}{T_{2,n}} +$$

+
$$(F - P_w A_2) \frac{1}{R_n T_3} \left[t + T_n - T_1 - T_2 - T_3 + O_n (1 - e^{-T_1 n}) \right]$$

+ $S_n (1 - e^{-T_1 n} - T_2 - T_3 - T_2 - T_3), ms^{-1}$

gdzie:

$$Q_n = \frac{T_{1,n}^2}{T_{2,n} - T_{1,n}}$$
, s $S_n = \frac{T_{2,n}^2}{T_{1,n} - T_{2,n}}$, s $T_n = \sum t_i$, s

$$\begin{split} \mathsf{V}_{1,n}(\mathbf{x}) &= -\mathsf{P}_{2,n} \frac{\mathsf{A}_{2}}{\mathsf{k}_{2,n}} \bigg[\mathsf{E}_{n} (1 - \mathsf{e}^{-\frac{\mathsf{x}}{\mathsf{T}_{1,n}}}) + \mathsf{D}_{n} (1 - \mathsf{e}^{-\frac{\mathsf{x}}{\mathsf{T}_{2,n}}}) \bigg] \\ &= \mathsf{P}_{2,n} \frac{\mathsf{A}_{2}}{\mathsf{R}_{n}} \bigg[\mathsf{A}_{n} (1 - \mathsf{e}^{-\frac{\mathsf{x}}{\mathsf{T}_{1,n}}}) + \mathsf{B}_{n} (1 - \mathsf{e}^{-\frac{\mathsf{x}}{\mathsf{T}_{2,n}}}) \bigg] \\ &+ \mathsf{V}_{1,n} + \mathsf{V}_{1} \bigg[\mathsf{A}_{n} (1 - \mathsf{e}^{-\frac{\mathsf{x}}{\mathsf{T}_{1,n}}}) + \mathsf{B}_{n} (1 - \mathsf{e}^{-\frac{\mathsf{x}}{\mathsf{T}_{2,n}}}) \bigg] \\ &+ \frac{\mathsf{P}_{w} \mathsf{A}_{2}}{\mathsf{R}_{n}} \bigg[\mathsf{A}_{n} (1 - \mathsf{e}^{-\frac{\mathsf{x}}{\mathsf{T}_{1,n}}}) + \mathsf{B}_{n} (1 - \mathsf{e}^{-\frac{\mathsf{x}}{\mathsf{T}_{2,n}}}) \bigg] \\ &+ \frac{\mathsf{P}_{w} \mathsf{A}_{2}}{\mathsf{R}_{n}} \bigg[\mathsf{A}_{n} (1 - \mathsf{e}^{-\frac{\mathsf{x}}{\mathsf{T}_{1,n}}}) + \mathsf{B}_{n} (1 - \mathsf{e}^{-\frac{\mathsf{x}}{\mathsf{T}_{2,n}}}) + \frac{\mathsf{R}_{n} \mathsf{E}_{n}}{\mathsf{K}_{2,n}} (1 - \mathsf{e}^{-\frac{\mathsf{x}}{\mathsf{T}_{1,n}}}) \\ &+ \frac{\mathsf{R}_{n} \mathsf{D}_{n}}{\mathsf{R}_{n}} (1 - \mathsf{e}^{-\frac{\mathsf{x}}{\mathsf{T}_{2,n}}}) \bigg] \\ &+ (\mathsf{R}_{2,n} \mathsf{D}_{n} \mathsf{D}_{n} (1 - \mathsf{e}^{-\frac{\mathsf{x}}{\mathsf{T}_{2,n}}}) \bigg] \\ &+ (\mathsf{R}_{2,n} \mathsf{D}_{n} \mathsf{D}_{n} (1 - \mathsf{e}^{-\frac{\mathsf{x}}{\mathsf{T}_{2,n}}}) \bigg] \\ &+ (\mathsf{R}_{2,n} \mathsf{D}_{n} \mathsf{D}_{n}$$

$$+ H_{n}(1-e^{-\frac{x-T_{n}-T_{1}}{T_{2,n}}}) H(x+T_{n}-T_{1}) - \frac{x+T_{n}-T_{1}-T_{2}}{T_{1,n}} + H_{n}(1-e^{-\frac{x+T_{n}-T_{1}-T_{2}}{T_{2,n}}}) H(x+T_{n}-T_{1}-T_{2}+G_{n}(1-e^{-\frac{x+T_{n}-T_{1}-T_{2}}{T_{1,n}}}) + H_{n}(1-e^{-\frac{x+T_{n}-T_{1}-T_{2}}{T_{2,n}}}) + H(x+T_{n}-T_{1}-T_{2}) + H_{n}(1-e^{-\frac{x+T_{n}-T_{1}-T_{2}}{T_{2,n}}}) + H_{n}(1-e^{-\frac{x+T_{n}-T_{2}}{T_$$

+
$$\left(\frac{F_{1}}{A_{2}} - P_{w}\right)\frac{1}{R_{n}T_{3}}\left[x+T_{n}-T_{1}\cdot T_{2}-T_{3}+G_{n}(1-e^{-\frac{x+T_{n}-T_{1}-T_{2}-T_{3}}{T_{1,n}}) + \frac{x+T_{n}-T_{1}-T_{2}-T_{3}}{T_{2,n}}\right]$$
 + $H_{n}(1-e^{-\frac{x+T_{n}-T_{1}-T_{2}-T_{3}}{T_{2,n}}})$] + $H(x+T_{n}-T_{1}-T_{2}-T_{3})$ +

+
$$\left(\frac{F_{1}}{A_{2}} - P_{W}\right)\frac{1}{T_{3}k_{2,n}}\left[A_{n}(1-e^{-\frac{x+T_{n}}{T_{1,n}}}) + B_{n}(1-e^{-\frac{x+T_{n}}{T_{2,n}}})\right]H(x+T_{n}) -$$

$$\left(\frac{F_{1}}{A_{2}}-P_{W}\right)\frac{1}{T_{1}k_{2,n}}\left[A_{n}\left(1-e^{-\frac{x+T_{n}-T_{1}}{T_{1,n}}}\right)+B_{n}\left(1-e^{-\frac{x+T_{n}-T_{1}}{T_{1,n}}}\right)\right]H(x+T_{n}-T_{1})-\frac{F_{n}}{T_{n}}$$

$$- \left(\frac{F_{1}}{A_{2}} - P_{w}\right) \frac{1}{T_{3}k_{2,n}} \left[A_{n}\left(1 - \Theta\right) + \frac{x + T_{n} - T_{1} - T_{2}}{T_{1,n}}\right] + \frac{x + T_{n} - T_{1} - T_{2}}{T_{1,n}} + \frac{x + T_{n} - T_{1} - T_{2} - T_{3}}{T_{1,n}} + \frac{x + T_{n} - T_{n} -$$

UT T T

$$B_{n}(1-e^{T_{2,n}}) H(x+T_{n}-T_{1}-T_{2}) + (\frac{F_{1}}{\Lambda_{2}} - P_{w}) A_{n}(1-e^{T_{1,n}}) +$$

$$= \frac{x + T_n - T_1 - T_2 - T_3}{T_2, n}$$
 H(x+T_n - T_1 - T_2 - T_3), ms⁻¹

2.5. Wymuszanio prędkością - przebieg trapezowy

Podobnie jak poprzednio, ciśnienie cieczy i suw tłoczyska mają postać:

I – zawór bezpieczeństwa zamknięty (wyłącznik w analogu w pozycji wyłączonej)

(16)

Rys. 16. Jynuszenic prędkością – przebieg trapazowy Fig. 10. Forcing by velocity, trapczoid course

II - zowór bezpieczeństwa otwarty (wyłącznik w analogu w pozycji załączonej)

$$\begin{split} F_{2,n}(t) &= \frac{4}{h_2} \left\{ V_1 \frac{R_n}{T_1} \left[t + \Delta T - T_{a,n} (1 - e^{-\frac{t + \Delta T}{T_{a,n}}}) \right] H(t + \Delta T) - V_1 \frac{R_n}{T_1} \left[t + \Delta T - T_1 - \frac{t + \Delta T - T_1}{T_{a,n}} \right] \\ &= T_{a,n} (1 - e^{-\frac{t + \Delta T - T_1}{T_{a,n}}}) H(t + \Delta T - T_1) - V_1 \frac{R_n}{T_3} \left[t + \Delta T - T_1 - \frac{t + \Delta T - T_1 - T_2}{T_{a,n}} \right] \\ &= T_n (1 - e^{-\frac{t + \Delta T - T_1 - T_2}{T_{a,n}}}) H(t + \Delta T - T_1 - T_2) + V_1 \frac{R_n}{T_3} \left[t + \Delta T - T_1 - T_2 - T_3 - \frac{t + \Delta T - T_1 - T_2}{T_{a,n}} \right] H(t + \Delta T - T_1 - T_2) + V_1 \frac{R_n}{T_3} \left[t + \Delta T - T_1 - T_2 - T_3 - \frac{t + \Delta T - T_1 - T_2 - T_3}{T_{a,n}} \right] H(t - \Delta T - T_1 - T_2 - T_3) \right\} \\ &= T_n (1 - e^{-\frac{t + \Delta T - T_1 - T_2 - T_3}{T_{a,n}}}) H(t - \Delta T - T_1 - T_2 - T_3) \right\} + \\ &= \frac{t}{T_{a,n}} \frac{t}{T_{a,n}} + P_{2,n} (1 - e^{-\frac{t}{T_{a,n}}}) - Na^{-2} \end{split}$$

l_{1.n}(t) - podane relacją (15)

$$V_{2,n}(t) = V_{1} \left\{ \frac{1}{T_{1}} \left[t + \Delta T - T_{n} (1 - e^{-\frac{t + \Delta T}{T_{a,n}}}) \right] H(t + \Delta T) - \frac{1}{T_{1}} \left[t + \Delta T - T_{1} - \frac{t + \Delta T - T_{1}}{T_{a,n}} \right] \right] H(t - \Delta T - T_{1}) - \frac{1}{T_{3}} \left[t + \Delta T - T_{1} - T_{2} - T_{n} (1 - e^{-\frac{t + \Delta T - T_{1} - T_{2}}{T_{a,n}}}) \right] H(t - \Delta T - T_{1}) - \frac{1}{T_{3}} \left[t + \Delta T - T_{1} - T_{2} - T_{n} (1 - e^{-\frac{t + \Delta T - T_{1} - T_{2}}{T_{a,n}}}) \right] H(t - \Delta T - T_{1} - T_{2}) + \frac{1}{T_{3}} \left[t + \Delta T - T_{1} - T_{2} - T_{3} - \frac{t + \Delta T - T_{1} - T_{2} - T_{3}}{T_{a,n}} - \frac{t + \Delta T - T_{1} - T_{2} - T_{3}}{T_{a,n}} \right] H(t + \Delta T - T_{1} - T_{2} - T_{3}) \right\} + \left\{ (P_{2,n} \stackrel{c}{=} P_{w}) \frac{A_{2}}{R} e^{-\frac{T}{T_{a,n}}} ms^{-1} \right\}$$

gdzie:
$$T_{a,n} = \frac{\kappa_n}{k_{2,n}}$$
, s $\Delta T = \sum (\Delta t + t_1 + t_{oz})$, s

3. Wnioski końcowe

Wyprowadzone zależności pozwalają wyznaczyć analitycznio przebiegi czasowe ciśnienia cieczy hydraulicznej oraz suw tłoczyska podpory jednoteleskopowej wyposażonej w zawór bezpieczeństwa dla wybranych rodzajów obciążeń dynamicznych. Zależności wyprowadzono posługując się modelem zastępczym podpory o jednym stopniu swobody dla dyskretnego rozłożenia masy i sprężystości. Stałe skupione niezbędne do wyliczeń wyznacza się na podstawie dokumentacji technicznej podpory. Przypadki obciążeń przyjęto najczęściej stosowane w badaniach: udar masy, wymuszenie siły i prędkości o przebiegu sinusoidalnym i trapezowym. Szczególnie przydatny jest przypadek trapezowy, przy użyciu którego możemy przedstawiać przebieg o kształcie impulsowym, trójkątnym, prostokątnym czy skoku jednostkowego.

Relacje analityczne opisujące ciśnienie cieczy hydraulicznej oraz suw tłoczyska wyprowadzono dla przypadku, gdy zawór bezpieczeństwa jest otwarty oraz zamknięty. Wymagało to rozwiązania równań różniczkowych w przypadku pierwszym liniowych, w drugim nieliniowych o zmiennych parametrach. Równania różniczkowe o zmiennych parametrach, trudne do rozwiązania, zastąpiono liniowym, przyjmując w dostatecznie małym przedziale czasu Δt , stałcść parametrów i liniowość charakterystyki zaworu. Zamknięcie lub otwarcie zaworu bezpieczeństwa zmienia przyjęte modele matematyczne wykorzystywane do wyprowadzenia relacji analitycznych. Powiązanie pomiędzy relacjami dla otwartego i zamkniętego zaworu następuje przez warunki początkowe. Zawór przyjęto jako oporność wypżywu cieczy nydraulicznej włączanej i wyłączanej do obwodu hydraulicznego podpory z opóźnioniami wynikającymi z charakterystyk dynamicznych. Przyjęcie prostych modeli podpory i zaworu jest uzasadnione również faktem, że wyniki będą wykorzystane w analizach dynamicznych układów fizycznych o dużych masach, w których występują przebiegi o niewielkich prędkościach.

Praca stanowi wycinek rozważan teoretycznych związanych z tematyką prowadzoną w Głównym Instytucie Górnictwa, a dotyczącą doboru obudów do warunków ścian zagrożonych tąpaniami oraz atestacji maszyn i urządzeń górniczych. Wykorzystanie wyprowadzonych zależności oraz ich woryfikacja będzie następowała stosownie do potrzeb prowadzonej działalności merytorycznej. Przedstawienie analitycznego sposobu wyznaczania ciśnienia cieczy hydraulicznej oraz suwu tłoczyska podpory wyposażonej w zawór bezpieczeństwa ma również na celu ewentualne skorygowanie przez czytelników przyjętych założeń, wyprowadzonych zależności przed ich praktycznym stosowaniem.

LITERATURA

- [1] Olaszowski W., Stałęga S., Wachelka L.: Zasady modelowania współpracy obudowy z górotworem w czasie drgań stropu w wyrobiskach eksploatacyjnych, "Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa" 1977, nr 3.
- [2] Guillon M.: Etude et dètermination des systèmes hydrauliques, Dunod, Paris 1961.
- [3] Stoiński K.: Metody wyznaczania obciążeń dynamicznych stojaków hydraulicznych oraz obudów ścianowych. GIG, Katowice 1985, seria dodatkowa.
- [4] Tomski L.: Dynamika stojaków hydraulicznych obudów górniczych. Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1979, nr 17.

atopiono linice, przyżnyłac w dostarecznie wsłym przedziele oznaw - 67,

5] Wegrzyn S.: Rachunek operatorowy, PWN, Warszawa 1960.

[6] Wegrzyn S.: Podstawy automatyki. PWN, Warszawa 1974.

Recenzent: Prof. dr inż. Włodzimierz Sikora

Wpłynęło do Redakcji w styczniu 1987 r.

Резюме

Настоящая работа касается аналитического определения временных ходов давления гидравлической жидкости, а также хода поршня однотелескоповой опоры снабженной клапаном безопасности для избранных видов динамической нагрузки. Зависимости были выведены с помощью опорной модели с одним градусом свободы для дискретнего размещения массы и упругости. Кланан принят как сопротивление истечения вводимой и выпускаемой жидкости в гидравлическую цепь опоры с замедлениями вытекающими из динамических характристик.

Были приняты наиболее часто применяемые в исследованиях случаи нагрузки: удар массы, принуждение силы и скорости с синусоидальным и трапецеидальным пробегами. Аналитические соотношения определены с помощью дифференциальных уравнений определяющих опорную модель - линейные для замкнутого клапана и нелинейные с переменными параметрами для откоытого клапана.

Аналитические зависимости будут использованы в работах Главного института горного дела кас. подбора крепи для лав опасных горными ударами, а также для аттестации.

ONE - TELESCOPE HYDRAULIC TOWER WITH A SAFETY VALVE -ANALYTICAL DEPENDENCIES FOR SELECTED DYNAMIC LOADS

Summary

The present work deals with analytical determination of time course for hydraulic liquid pressure and piston stroke in a single-telescope prop, provided with safety valve, for the chosen types of dynamic load.

The dependencies have been evaluated employing the prop model of one degree of freedom, for discrete distribution of mass and elasticity. It has been assumed that the value imposes resistive effect upon the flow of liquid entering and leaving the prop's hydraulic circuit, with delays as determined by the dynamic characteristics.

The load cases considered in the investigations were principally: mass stroke and forcing of strength and velocity of sinusoid and trapezoid course.

Analytical relations were determined from the differential equation describing the prop's model: linear, for the closed value and non-linear for the opened value.

The analytical dependencies will be employed in the research of the Central Mining Institute on the selection of support for longwalls in rockburst conditions, and for certification purposes.