

MICHAŁ STOSIAK, MYKOŁA KARPENKO

Zmiany w widmie pulsacji ciśnienia w układzie hydraulicznym wywołane zewnętrznymi drganiami mechanicznymi

Wprowadzenie

Specyficzną cechą układów hydraulicznych jest zależność ich pracy od warunków zewnętrznych oraz podstawowych parametrów, takich jak ciśnienie czy natężenie przepływu. Pracujący element hydrauliczny, np. zawór sterujący kierunkiem przepływu czy ciśnieniem, jest poddany nieustannie złożonym wymuszeniom różnego pochodzenia. Przykładając wymuszenie do jakiegokolwiek punktu układu hydraulicznego jest ono przekazywane na elementy tego układu przez elementy o różnej sztywności i tłumieniu, a skutki tego są uzależnione od miejsca działania wymuszenia, jego amplitudy, częstotliwości oraz cech fizycznych elementów przenoszących owe wymuszenia, konfiguracji układu hydraulicznego [10]. Obciążenia działające na zawory hydrauliczne oraz ich elementy sterujące często mają charakter stochastyczny, a w szczególnym przypadku mogą być harmoniczne. W ogólności wymuszenia działające na zawór hydrauliczny podzielić można na wymuszenia celowe i zakłócające. W grupie wymuszeń celowych znajdują się sygnały sterujące pracą zaworów będących w strukturze układu sterowania bądź regulacji. Do grupy wymuszeń zakłócających pracę zaworów zaliczyć można m.in. drgania działające na zawór. Drgania te mogą pochodzić od maszyny mobilnej wyposażonej w układ hydrauliczny.

Z praktyki eksploatacyjnej hydrostatycznych układów napędowych wynika, że pomimo poprawnie skompletowanego układu sterowania (realizowanego w szczególności w technice proporcjonalnej), następuje nieraz odstępstwo od założonych parametrów napędu wyrażające się nierównomiernym ruchem odbiornika, kłopotami z założoną dokładnością pozycjonowania i wzmożoną hałaśliwością. Przyczyn tego należy się dopatrywać w zakłóceniach zewnętrznych działających na element sterujący a nieuwzględnionych w trakcie projektowania układu

napędowego. Zjawisko to występuje częściej w przypadku zaworów sterowanych jednostopniowo, ponieważ siły elektromagnetyczne magnesów proporcjonalnych przemieszczające suwak rozdzielacza mają znacznie mniejsze wartości w stosunku do zaworów sterowanych dwustopniowo (np. elektrohydraulicznie) ze względu na specyfikę działania tych ostatnich. Już niewielkie wartości sił zakłócających mogą wytrącić suwak rozdzielacza jednostopniowego z położenia równowagi.

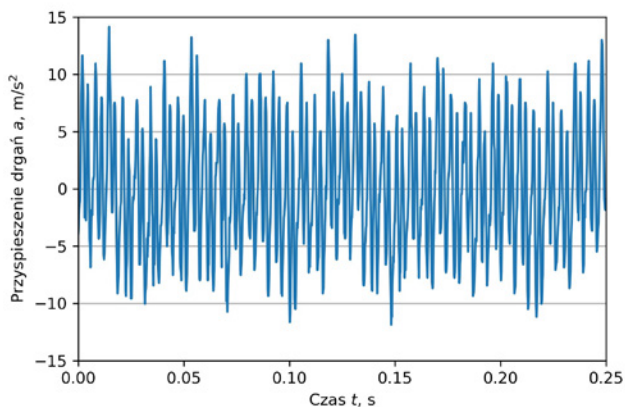
Układy zasilania wysokociśnieniowych pras kuzniczych

Do celów identyfikacji wymuszeń w postaci drgań mechanicznych występujących w układach hydraulicznych posłużyć mogą badania przyspieszenia drgań zbiornika zasilacza hydraulicznego (rys. 1) [1], wykonane w kierunku ruchu zamontowanego na nim elementu sterującego zaworu hydraulicznego (rys. 2 i rys. 3).

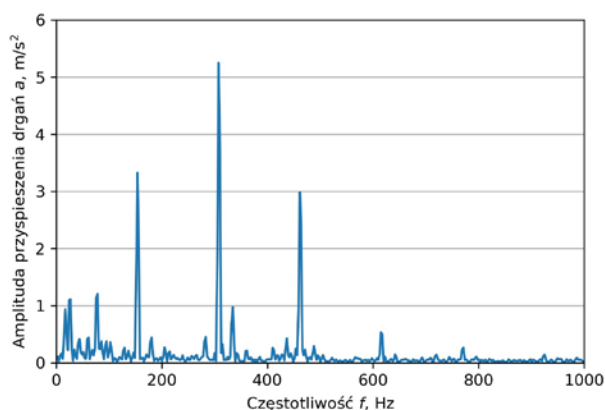


Rys. 1. Zasilacz hydrauliczny ze zintegrowanym rozdzielaczem na płycie

Dr hab. inż. Michał Stosiak, prof. PWr (michal.stosiak@pwr.edu.pl) – Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, dr Mykoła Karpenko, prof. Vilnius Tech (mykola.karpenko@vilniustech.lt) – Wydział Inżynierii Transportu, Wileński Uniwersytet Techniczny im. Giedymina, Wilno, Litwa



Rys. 2. Zarejestrowane przyspieszenie drgań płyty zbiornika zasilacza hydraulicznego (prędkość obrotowa wału pompy $n_p = 1450$ obr/min)



Rys. 3. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe przyspieszenia drgań płyty zbiornika zasilacza hydraulicznego.

Dominująca częstotliwość w widmie (rys. 3) wynika z zależności:

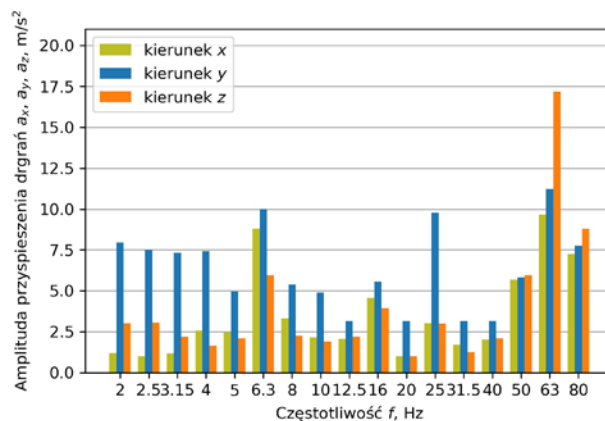
$$f = \frac{n_p \cdot z \cdot k}{60} \text{ Hz} \quad (1)$$

gdzie: n_p – prędkość obrotowa wału pompy [obr/min], z – liczba elementów wyporowych, k – numer kolejnej składowej 1 ... n .

W badanym zasilaczu była zamontowana pompa wielotłoczkowa typu PNZ-25 napędzana z prędkością obrotową $n_p = 1500$ obr/min i mająca $z = 7$ tłoczków, a więc zgodnie z zależnością (1) częstotliwość pierwszej składowej wynosi $f_1 = 175$ Hz.

Ponadto badania przyspieszeń drgań (rys. 4) ramy ładowni Fadroma Bumar Ł-220 wykazują obecność w widmie również składowych poniżej 100 Hz.

Przedstawione wyniki badań własnych [11] oraz dane literaturowe [2, 12, 13] wskazują, że w widmie amplitudowo-częstotliwościowym przyspieszenia drgań maszyn wyposażonych w układy hydrauliczne występują również częstotliwości poniżej 100 Hz o amplitudach sięgających kilkudziesięciu m/s^2 [14]. Spodziewać się należy, że przedstawione wymuszenia mogą mieć wpływ na zmiany w widmie amplitudowo-częstotliwościowym pulsacji ciśnienia w układzie hydraulicznym, którego zawory poddawane są takim wymuszeniom [15].



Rys. 4. Średnie tercjowe widmo przyspieszenia drgań ramy ładowni L-220 produkcji Bumar-Fadroma. Widmo ograniczone do częstotliwości 80 Hz. Pomiary własne.

Badania doświadczalne

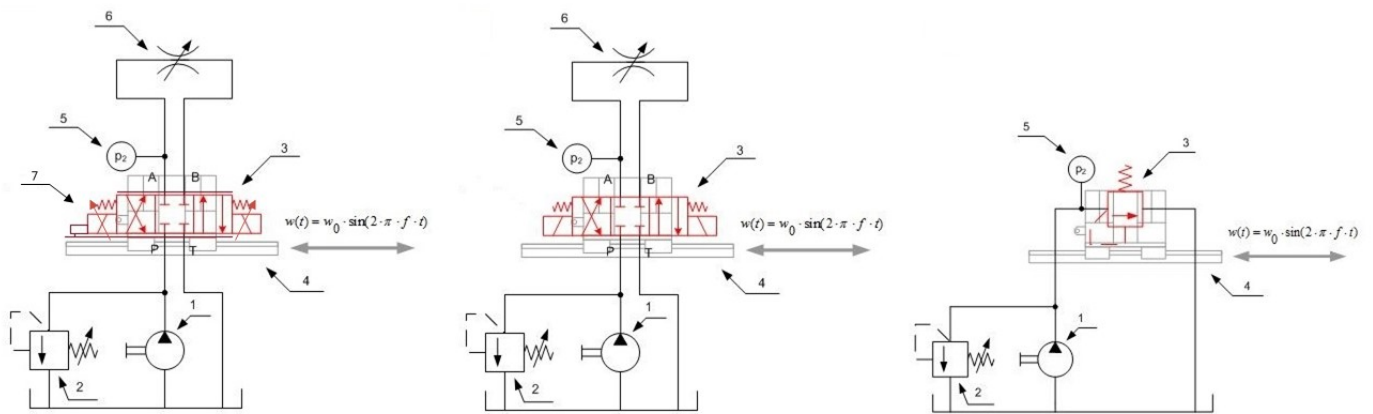
Celem ustalenia wpływu zewnętrznych drgań mechanicznych na zmiany w pulsacji ciśnienia przeprowadzono badania doświadczalne, które polegały na poddawaniu zewnętrznym drganiom mechanicznym wybranych zaworów hydraulicznych i rejestracji pulsacji ciśnienia w układzie pobudzanego zaworu. Częstotliwość zewnętrznych drgań mechanicznych oddziaływujących na badane zawory zawierała się w przedziale od 15 do 60 Hz. Do badań przyjęto podstawowe zawory hydrauliczne, a mianowicie:

- 1) jednostopniowy rozdzielacz proporcjonalny 4WRE 6 E08-12/24Z4/M,
- 2) jednostopniowy, konwencjonalny rozdzielacz 4/3 sterowany cewkami elektromagnetycznymi 4WE 6 E53/AG24NZ4,
- 3) jednostopniowy zawór przelewowy DBDH 6 G18/100.

Wszystkie badane zawory były produkcji Mannesmann-Rexroth. Źródłem drgań mechanicznych działających na rozpatrywane zawory hydrauliczne był symulator liniowego napędu hydrostatycznego HYDROPAX ZY25 odpowiednio przystosowany do celów badań (rys. 5). Podstawy teoretyczne symulatora podano w [3].



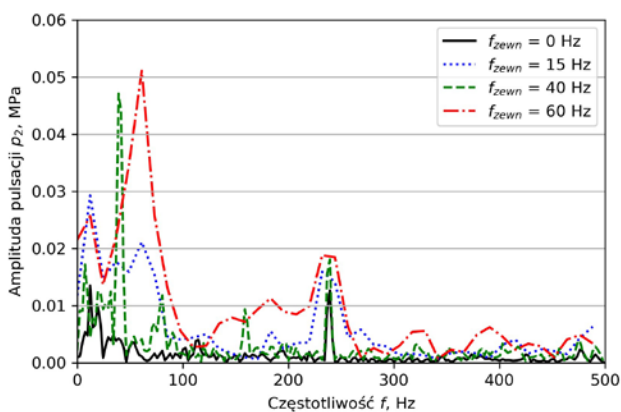
Rys. 5. Symulator hydrauliczny pracujący jako generator drgań mechanicznych (wymuszenia kinematycznego) działających na badany element hydrauliczny



Rys. 6. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w układzie badawczym zaworu hydraulicznego: 1 – pompa zasilająca układ badawczy rozpatrywanego elementu, 2 – zawór bezpieczeństwa, 3 – badany zawór – kolejno: rozdzielacz proporcjonalny 4WRE 6 E08-12/24Z4/M, konwencjonalny rozdzielacz 4WE 6 E53/AG24NZ4, zawór przelewowy DBDH 6 G18/100, 4 – stół symulatora hydraulicznego HYDROPAX ZY25 stanowiący wymuszenie kinematyczne funkcją harmoniczną dla badanego elementu z punktem pomiaru położenia stołu, 5 – punkt pomiaru zmiany wartości ciśnienia czujnikiem piezoelektrycznym M101A04 firmy Piezotronics, 6 – nastawny zawór dławiący, jako obciążenie układu badawczego, 7 – czujnik indukcyjny do pomiaru położenia suwaka rozdzielacza proporcjonalnego

Schematy układów hydraulicznych badanych zaworów wraz z rozmieszczeniem punktów pomiarowych pokazano na rys. 6.

W przypadku badań rozdzielacza proporcjonalnego kierunku drgań mechanicznych (pochodzących od symulatora) zgodny był z kierunkiem ruchu suwaka badanego rozdzielacza. Wyniki badań w postaci zbiorczego widma amplitudowo-częstotliwościowego pulsacji ciśnienia w punkcie 5 (wg rys. 6) przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Porównanie widma amplitudowo-częstotliwościowego pulsacji ciśnienia p_2 dla różnych częstotliwości f_{zewn} działającego wymuszenia zewnętrznego. Ciśnienie średnie 2 MPa, $Q_{sr} = 6,5 \text{ dm}^3/\text{min}$

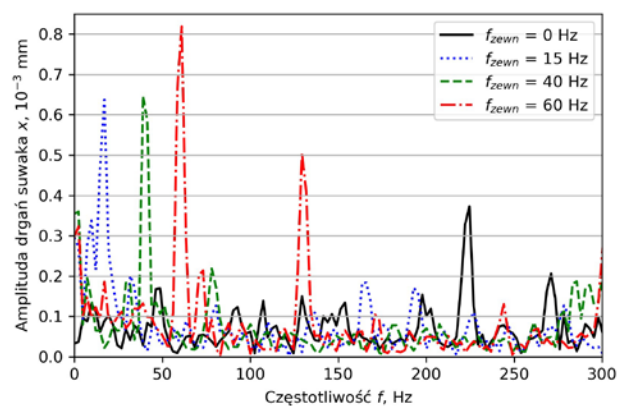
Zintegrowany czujnik przemieszczenia suwaka (7 wg rys. 6) wewnątrz korpusu badanego rozdzielacza proporcjonalnego pozwalał na równoczesną rejestrację drgań suwaka. Wyniki tej rejestracji przedstawiono w postaci zbiorczego widma amplitudowo-częstotliwościowego przemieszczenia suwaka na rys. 8.

Z rys. 7 wynika, że amplituda pulsacji ciśnienia p_2 wywołana drganiami zewnętrznymi o częstotliwości 60 Hz jest naj-

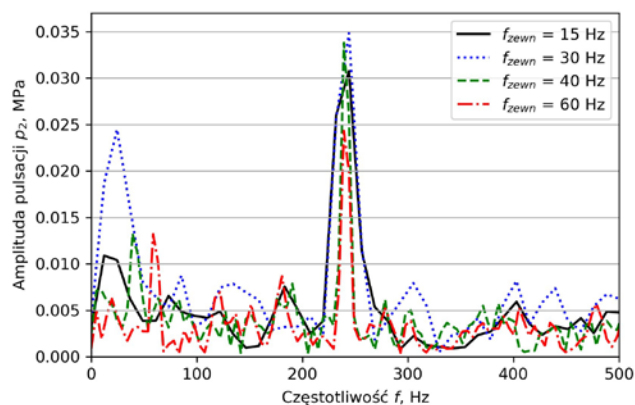
wieksza. Również maksymalna amplituda drgań suwaka x występuje dla częstotliwości wymuszenia zewnętrznego $f = 60 \text{ Hz}$ (rys. 8). Zatem przyczyną wzrostu amplitudy pulsacji ciśnienia jest wzbudzenie się suwaka rozdzielacza na skutek zewnętrznych drgań mechanicznych o częstotliwości zbliżonej do częstotliwości drgań własnych nietłumionych suwaka rozważanego rozdzielacza proporcjonalnego. W miarę zwiększania różnicy między częstotliwością drgań własnych nietłumionych suwaka a częstotliwością zewnętrznego wymuszenia kinematycznego, pulsacja ciśnienia maleje.

Wyniki badań, podczas których zewnętrznym drganiami mechanicznym poddawany był konwencjonalny rozdzielacz 4/3 przedstawiono na rys. 9 w postaci zbiorczego widma amplitudowo-częstotliwościowego pulsacji ciśnienia w punkcie pomiarowym 5 (wg rys. 6).

Natomiast zestawienie wyników badań dla przypadku, w którym zewnętrznym drganiami mechanicznym poddawany był jednostopniowy zawór przelewowy pokazano na rys. 10.

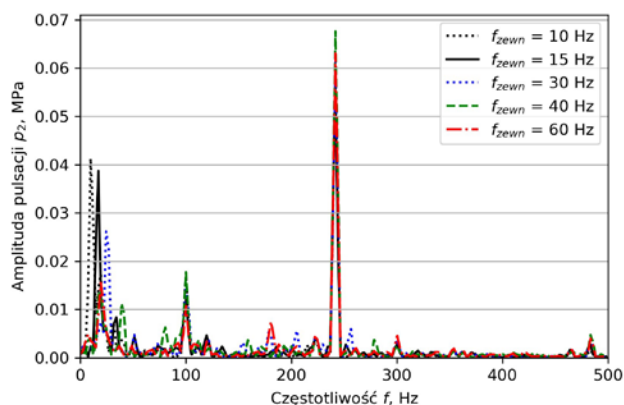


Rys. 8. Porównanie widma amplitudowo-częstotliwościowego drgań suwaka x (wokół położenia ustalonego) dla różnych częstotliwości f_{zewn} działającego wymuszenia zewnętrznego



Rys. 9. Porównanie widma amplitudowo-częstotliwościowego pulsacji ciśnienia p_2 dla różnych częstotliwości f_{zewn} działającego wymuszenia zewnętrznego. Ciężnienie średnie 2 MPa, $Q_{sr} = 6,5 \text{ dm}^3/\text{min}$

Widma zaprezentowane na rysunkach 7, 9 i 10 uzyskane podczas badań uwidaczniają, oprócz składowej pochodzącej od pulsacji wydajności i najogólniej ujętej impedancji układu, również składowe widma odpowiadające częstotliwościom zewnętrznych drgań mechanicznych, którym poddawane były wybrane zawory hydrauliczne.



Rys. 10. Porównanie widma amplitudowo-częstotliwościowego pulsacji ciśnienia p_2 dla różnych częstotliwości f_{zewn} działającego wymuszenia zewnętrznego. Ciężnienie średnie 2 MPa, $Q_{sr} = 6,5 \text{ dm}^3/\text{min}$

Podsumowanie

Z przeprowadzonej w pracy analizy wynika, że podczas pracy maszyn z napędem hydrostatycznym w całym spektrum częstotliwości drgań mechanicznych wyodrębnić możemy również te, których częstotliwości zawierają się poniżej 100 Hz (rys. 3 i 4). Częstość wymuszeń (pochodzenia zewnętrznego) pokrywać się mogą w takim przypadku z częstością drgań własnych elementów sterujących w podstawowych komponentach układu hydraulicznego. Kolejnym źródłem zakłóceń jest pulsacja ciśnienia będąca skutkiem pulsacji wydajności, która wynika z kinematyki pracy elementów wyporowych pompy.

Wymienione zakłócenia powodować mogą nierównomierne ruch odbiorników, kłopoty z osiągnięciem założonej dokładności pozycjonowania i wzmogoną hałaśliwość [4]. Powstała pulsacja ciśnienia powodować może drgania przewo-

dów i ich uszkodzenia, np. poprzez przecieranie się. Drgania o częstotliwościach poniżej 100 Hz szkodliwe są również dla człowieka, ponieważ ich częstotliwości są zbliżone do częstotliwości rezonansowych organów wewnętrznych człowieka.

W celu ograniczenia wpływu zewnętrznych drgań mechanicznych należy uwzględnić podczas eksploatacji układu hydraulicznego kierunek wzajemnego położenia ruchu elementu sterującego zaworu hydraulicznego oraz kierunek działających drgań. Ponadto stosować można metody wibroizolacji opisane w [5, 6]. Ze względu na rezonans ciśnienia w przewodzie (układzie) hydraulicznym konieczne jest właściwe dobranie jego długości oraz materiału, z którego jest wykonany (przewód stalowy bądź elastyczny) [7, 8].

W celu zmniejszenia pulsacji ciśnienia, również w zakresie niskich częstotliwości, w układzie hydraulicznym stosuje się m.in. tłumiki pulsacji ciśnienia opisane w pracy [9].

LITERATURA

- [1] W. Kollek, Z. Kudźma, P. Osiński, J. Rutański. *Lokalizacja i próby redukcji hałasu w zasilaczu hydraulicznym*. Problemy Maszyn Roboczych, 15, 2000.
- [2] J. Sadowski, R. Rogiński. *Walka z hałasem w komunikacji miejskiej*. WKŁ, Warszawa, 1965.
- [3] W. Kollek, Z. Kudźma, M. Stosiak. *Symulator liniowego napędu hydrostatycznego źródłem nowych możliwości badawczych*. Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne 2005. Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna, Wrocław, 2005.
- [4] W. Kollek, Z. Kudźma, P. Osiński, J. Rutański. *Próby redukcji hałasu w zasilaczu hydraulicznym*. Problemy Maszyn Roboczych, Kolegium Twórczości Technicznej Akademii Inżynierskiej w Polsce, Instytut Technologii i Eksploatacji Maszyn, Radom z. 15, Warszawa 2000.
- [5] W. Kaliński, A. Nowak, J. Wojnarowski. *Wibroizolacja maszyn roboczych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1996.
- [6] Z. Engel, J. Kowal. *Sterowanie procesami wibroakustycznymi*. Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków 1995.
- [7] Z. Kuźma. *Właściwości dynamiczne przewodów hydraulicznych*. Hydraulika i Pneumatyka, 6, 2005.
- [8] Z. Kuźma. *Wpływ rodzaju przewodów zasilających na działanie układów hydraulicznych*. Napędy i sterowania hydrauliczne 2005, Wrocław, 2005.
- [9] Z. Kuźma. *Tłumik pulsacji ciśnienia o przestrajalnej częstotliwości własnej*. Konferencja naukowo-techniczna 2001. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2001.
- [10] M. Karpenko, O. Prentkovskis, Š. Šukevičius. *Research on high-pressure hose with repairing fitting and influence on energy parameter of the hydraulic drive*. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability. Lublin: Polish Maintenance Society. vol. 24(1), p. 25-32, 2022.
- [11] M. Stosiak. *Identyfikacja oddziaływania drgań i metody ich redukcji w wybranych zaworach hydraulicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2015
- [12] Z. Engel. *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*, Warszawa, PWN, 2001.
- [13] Z. Engel, M. Zawieska. *Hałas i drgania w procesach pracy: źródła, ocean, zagrożenia*. Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2010
- [14] M. Stosiak., M. Karpenko, A. Deptuła. *Coincidence of pressure pulsations with excitation of mechanical vibrations of hydraulic system components. An experimental study*. Cognitive sustainability. Budapest, vol. 1, no. 2, s. 1-11, 2022.
- [15] M. Stosiak. *Ways of reducing the impact of mechanical vibrations on hydraulic valves*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, s. 1-9, 2014.