

Koncepcja oraz badania wstępne stanowiska badania odporności na drgania mikrozaworów hydraulicznych

Marek Lubecki, Michał Stosiak, Krzysztof Towarnicki

Wprowadzenie

Pracujące maszyny i urządzenia wyposażone w układy mikrohydrauliczne są źródłem drgań mechanicznych (m.in. swobodnych, wymuszonych bądź samowzbudnych) w szerokim spektrum częstotliwości [1]. Źródła drgań w środowisku są bardzo różnorodne, a ogólnie podzielić je można na zdeterminowane i losowe, zewnętrzne i wewnętrzne. Źródła wewnętrzne drgań są wywołane pracą maszyn, które posadzone są na stropach i fundamentach. Do tego rodzaju drgań zaliczyć można też drgania wywołane przez urządzenia instalacji sanitarnej, choć przeważnie mają one charakter akustyczny. Drgania pochodzące z zewnątrz przenoszone są przez podłoże, a ich źródłami mogą być:

- ruch uliczny (przejeżdżające samochody, tramwaje), którego częstotliwość zależy od prędkości poruszania się pojazdu, a dla jadącego tramwaju częstotliwość drgań podłoża spowodowana takim wymuszeniem zawiera się zazwyczaj w granicach od 3 do 40 Hz [2];
- ruch kolejowy [3];
- maszyny pracujące z sąsiedztwie budynków, hal fabrycznych;
- wybuchy (np. w procesie pozyskiwania materiału kamiennego w wyrobiskach w kamieniołomach), eksplozje, implozje.

W wielu przypadkach praktycznych siły powodujące powstawanie drgań działają bezpośrednio na elementy maszyny bądź też mogą być wynikiem oddziaływania innych elementów maszyny lub urządzenia. Obok sił zmieniających okresowo w czasie swoją wartość, źródłem drgań mogą być siły, których wartość w czasie jest stała, lecz zmienia się ich kierunek lub punkt zaczepienia (np. odśrodkowe siły bezwładności). W maszynach i urządzeniach źródłem drgań są często wymuszenia kinematyczne (np. podczas przejazdu maszyny mobilnej po nierównym podłożu).

Zagadnienie koincydencji drgań mechanicznych i pulsacji ciśnienia w układach mikrohydraulicznych może być rozpatrywane na dwa sposoby. Pierwszy to drgania elementów układu mikrohydraulicznego wzbudzone przepływem pulsacyjnym (np. drgania mikroprzewodów, mikrozaworów), a drugi to pulsacja ciśnienia wzbudzona drganiami elementów układu mikrohydraulicznego i w szczególności wzbudzenie się elementów sterujących mikrozaworów (np. suwaków mikrorozdzielaczy lub grzybków mikrozaworów wzniosowych).

W układzie mikrohydraulicznym zmienne ciśnienie cieczy może być spowodowane m.in. pulsacją wydajności cieczy

Streszczenie: W artykule omówiono wymagania stawiane układowi mikrohydraulicznemu. Wskazano na występujące zakłócenia pracy. Zaprezentowano koncepcję stanowiska badawczego do identyfikacji wpływu zewnętrznych drgań mechanicznych na elementy mikrohydrauliczne. Jako przykładowy element mikrohydrauliczny poddawany drganiom mechanicznym wykorzystano mikrozawór maksymalny.

Słowa kluczowe: mikrohydraulika, zawór maksymalny, drgania, pulsacja ciśnienia

Abstract: The paper describes the requirements set for microhydraulic units. Disruptions that occur during use were pointed out. This paper shows the concept of test rig designed specifically, to identify an influence of external mechanical vibrations on microhydraulic elements. Microhydraulic pressure relief valve was used as an exemplary element on which external vibrations were applied.

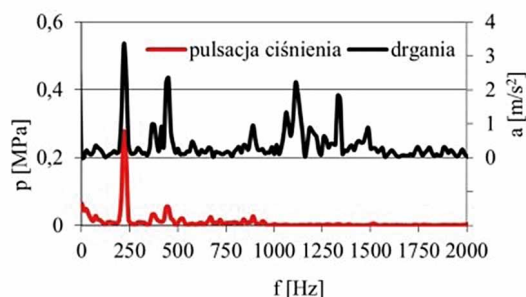
Keywords: microhydraulics, pressure relief valve, vibration, pressure pulsation.

robotycznej [4], będącej skutkiem kinematyki pracy elementów wyporowych mikropompy. Pulsacja wydajności mikropompy prowadzi w układzie mikrohydraulicznym do powstania okresowo zmiennych ciśnień o postaci funkcji harmonicznego. Częstotliwość takiej pulsacji ciśnienia odpowiada częstotliwości pulsacji wydajności [5]. Ponadto prowadzi ona do wzbudzenia się drgań mechanicznych m.in. przewodów mikrohydraulicznych. Przykład wzbudzenia takich drgań pokazano, na podstawie pomiarów własnych [1], na rys. 1.

W widmie przedstawionym na rys. 1 zaobserwować można składowe harmoniczne drgań mechanicznych odpowiadające pulsacji ciśnienia – pulsacja ciśnienia przepływającej cieczy wzbudziła drgania mechaniczne przewodu hydraulicznego.

Wśród wymagań, które stawia się elementom i układom mikrohydraulicznym, wymienić należy przede wszystkim:

- pewność działania;
- niski poziom hałasu (nieprzekraczający wartości dopuszczalnych, sukcesywnie obniżanych), [6];
- małe wymiary przy zachowaniu przenoszonych mocy;



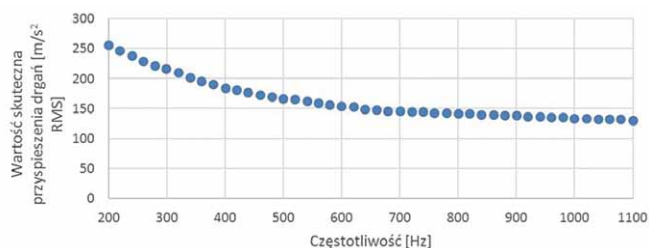
Rys. 1. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe pulsacji ciśnienia i drgań mechanicznych przewodu mikrohydraulicznego; $p_{sr} = 5 \text{ MPa}$, $Q = 1,83 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ($1,1 \text{ dm}^3/\text{min}$)

- ze względu na niektóre szczególne zastosowania wymaga się czystości napędu (brak wycieków).

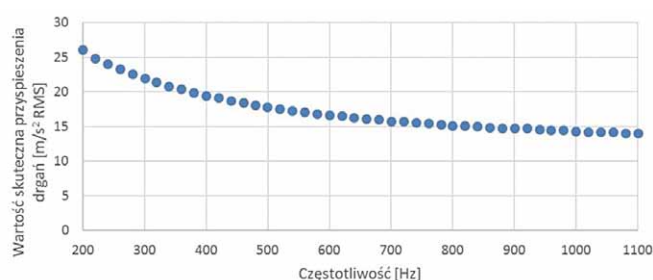
Nadmienić należy, że elementy i układy mikrohydrauliczne, z uwagi na średnice okien przelotowych, szczególnie wrażliwe są na zjawisko obliteracji. Ponadto dyrektywy Unii Europejskiej [7] odnoszą dopuszczalny poziom hałasu emitowanego przez urządzenie mechaniczne do przenoszonej mocy. Dopuszczalny hałas w układach mikrohydraulicznych ma stosunkowo niski poziom i mimo zalet tego rodzaju napędu nie zawsze może być on stosowany z powodu przekroczenia zalecanych wskaźników normatywnych [4]. Z tego powodu prowadzone są prace teoretyczne i doświadczalne nad opracowaniem i zastosowaniem w układach mikrohydraulicznych skutecznych biernych metod redukcji pulsacji ciśnienia i drgań mechanicznych.

Przygotowanie stanowiska badawczego

Badania wstępne na stanowisku badania odporności mikro-zaworów hydraulicznych na drgania rozpoczęły się od cechowania elementów układu. Przed zasadniczymi pomiarami należy sprawdzić, czy sposób przeprowadzania pomiarów jest prawidłowy. Z tego względu przeznaczony do badań jednoosiowy akcelerometr zamocowano mechanicznie na kalibratorze o znanej częstotliwości drgań oraz amplitudzie. Gdy wartości zmierzone przez akcelerometr i zapisane poprzez kartę pomiarową potwierdziły wartości generowane przez kalibrator, rozpoczęto kolejny etap pomiarów. Zamontowano jednoosiowy akcelerometr w linii generowanych drgań przez wzbudnik drgań. Przeprowadzono serię pomiarów dla stałego zasilania wzbudnika drgań, dla częstotliwości wymuszenia w zakresie 200–1100 Hz z krokiem 20 Hz, rys. 2. Następnie umieszczono na wzbudniku drgań masę wynoszącą 700 g, która jest równa masie mikro-zaworu przelewowego wraz z przewodami, użytego w dalszej części badań, rys. 2. Z kolei na masie umieszczono używany wcześniej jednoosiowy akcelerometr oraz wykonano pomiary przy identycznych zadawanych wartościach jak przy pomiarach bez masy. Celem tych badań było sprawdzenie pracy stanowiska generowania drgań dla zadanego obciążenia równego masie przeznaczonego do badań mikro-zaworu przelewowego. Poniżej zaprezentowano przykładowe wyniki badań przyspieszeń w domenie częstotliwości.



Rys. 2. Wartość skuteczna przyspieszenia drgań w funkcji częstotliwości dla kolejnych wymuszeń, przy wzbudniku nieobciążonym masą



Rys. 3. Wartość skuteczna przyspieszenia drgań w funkcji częstotliwości dla kolejnych wymuszeń, przy wzbudniku obciążonym masą

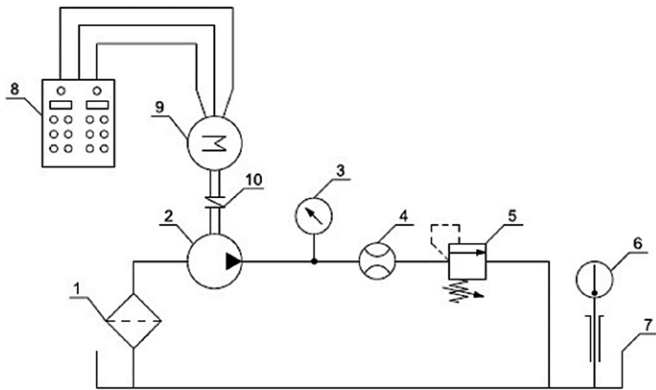
Pomiary zasadnicze

Zbudowane stanowisko badawcze wykorzystane podczas pomiarów zasadniczych podzielone jest na trzy główne układy:

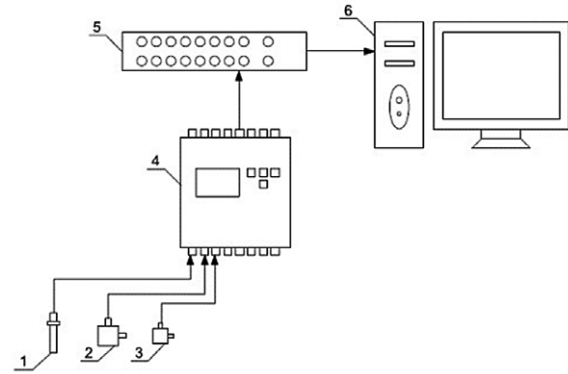
- układ hydrauliczny;
- układ generowania wymuszenia;
- układ pomiarowy.

Schemat układu hydraulicznego prezentuje rysunek 4. Trójfazowy silnik elektryczny (9), sterowany za pomocą falownika z szafy sterowniczej (8), napędza zębatą mikropompę hydrauliczną o zazębieniu zewnętrznym (2). Ciecz tłoczona jest następnie poprzez przepływomierz (4) do badanego zaworu (5) i z powrotem do zbiornika (7). Obecność w układzie manometru (3) pozwala na bieżącą kontrolę średniego ciśnienia w układzie, a umieszczony w zbiorniku termometr wskazuje temperaturę cieczy roboczej.

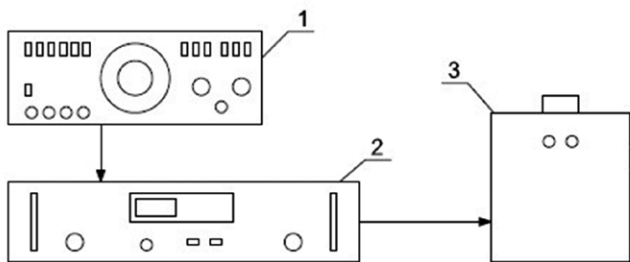
Drugim układem wchodzącym w skład zbudowanego stanowiska jest układ generowania drgań, którego schemat przedstawiony jest na rysunku 5. Generator funkcji (1) służy do generowania harmonicznym przebiegów czasowych o zadanym kształcie i częstotliwości. Kształt można wybrać spośród 3 predefiniowanych przez producenta (sinusoidalny, trójkątny, prostokątny), natomiast częstotliwość nastawiana jest za pomocą pokrętła w jednym z sześciu zakresów. Wzmacniacz drgań (2) umożliwi wzmocnienie sygnału płynącego z generatora, a co za tym idzie – uzyskanie pożądanej amplitudy. Wzmocnienie to ustawiane jest płynnie za pomocą pokrętła regulacji



Rys. 4. Schemat układu hydraulicznego do badania wpływu zewnętrznych drgań mechanicznych na mikrozawory hydrauliczne: 1 - filtr oleju; 2 - pompa zębata WPH PZ3A1G; 3 - manometr Parker ServiceJunior SCJN-400-01; 4 - przepływomierz Parker KSCVF-002-10-07X; 5 - badany mikrozawór; 6 - termometr Elmetron PT-217; 7 - zbiornik oleju; 8 - szafa sterownicza; 9 - trójfazowy silnik elektryczny; 10 - miernik momentu obrotowego



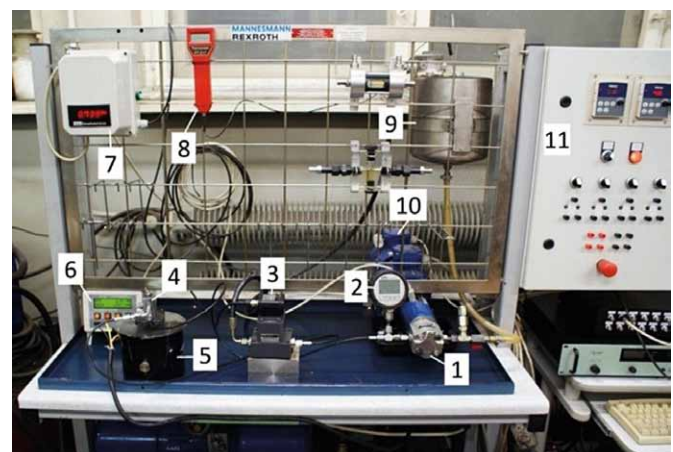
Rys. 6. Układ pomiarowy: 1 - piezoelektryczny czujnik ciśnienia PCB Piezotronics 105C23; 2, 3 - piezoelektryczne czujniki przyspieszenia PCB Piezotronics 340A16 i 356B21; 4 - kondycjoner sygnału EC Systems PA16000D; 5 - karta pomiarowa DaqBoard/2000; 6 - komputer PC



Rys. 5. Układ generowania wymuszenia kinematycznego: 1 - generator funkcji Meratronik G 432; 2 - wzmacniacz mocy Brüel & Kjaer Typ 2718; 3 - wzbudnik drgań Brüel & Kjaer Typ 4809

napięcia na wyjściu ze wzmacniacza. Wyświetlacz urządzenia pozwala na kontrolę parametrów pracy, a nastawiany płynnie ogranicznik prądowy zabezpiecza układ przed niepożądanym wzrostem natężenia prądu. Na wzbudniku (3) mocowany jest badany mikrozawór maksymalny (p. 5, rys. 4).

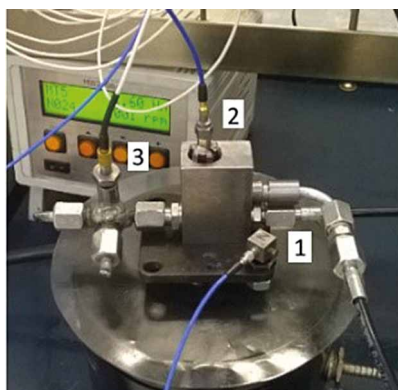
Aby mierzyć drgania oraz ich wpływ na pracę elementów mikrohydraulicznych, stanowisko badawcze wyposażono w układ pomiarowy, którego schemat zamieszczono na rysunku 6, a fotografia przedstawiona została na rysunku 7. Sygnał zbierany przez piezoelektryczny czujnik ciśnienia (1) oraz przyspieszeń (2, 3) przesyłany był do kondycjonera (4) celem wzmocnienia. Następnie trafiał do karty pomiarowej (5) połączonej z komputerem (6), gdzie zachodziła konwersja analogowo-cyfrowa i akwizycja danych. Do komunikacji z kartą pomiarową wykorzystano dedykowane oprogramowanie DaqView, pozwalające na zdalne rozpoczynanie, kończenie i zapisywanie pomiarów. Umożliwia ono także szybki podgląd wyników w formie przebiegów czasowych, jak i wykresów



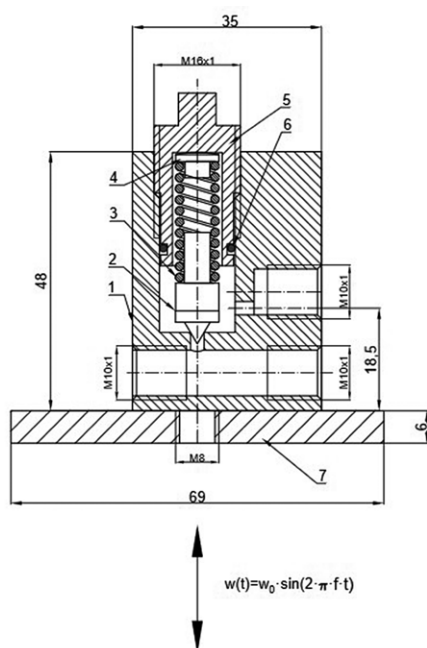
Rys. 7. Stanowisko do badań wpływu drgań na zawory mikrohydrauliczne: 1 - pompa zębata WPH PZ3A1G; 2 - manometr Parker ServiceJunior SCJN-400-01; 3 - przepływomierz Parker KSCVF-002-10-07X; 4 - badany zawór wraz z czujnikami ciśnienia i przyspieszeń; 5 - wzbudnik drgań Brüel & Kjaer Typ 4809; 6 - wyświetlacz obrotomierza i miernika momentu obrotowego; 7 - wyświetlacz przepływomierza; 8 - termometr Elmetron PT-217; 9 - zbiornik oleju; 10 - silnik elektryczny; 11 - szafa sterownicza

w domenie częstotliwości. Dalsza obróbka danych przeprowadzona została w środowisku Microsoft Excel.

Istotnym elementem układów mikrohydraulicznych są zawory hydrauliczne. Do badań wstępnych na stanowisku badania odporności mikrozaworów hydraulicznych na drgania użyto mikrozaworu przelewowego przedstawionego rys. 8 i rys. 9. Dla przeprowadzenia pomiarów na obudowie mikrozaworu zamontowano mechanicznie trójosiowy akcelerometr, na śrubie regulacyjnej został przymocowany jednoosiowy akcelerometr (o masie 2 g) oraz w linii ciśnieniowej zaworu



Rys. 8. Widok badanego mikrozaworu przelewowego: 1 - trójosiowy piezoelektryczny czujnik przyspieszenia PCB Piezotronics 356B21; 2 - jednoosiowy piezoelektryczny czujnik przyspieszenia PCB Piezotronics 340A16; 3 - piezoelektryczny czujnik ciśnienia PCB Piezotronics 105C23

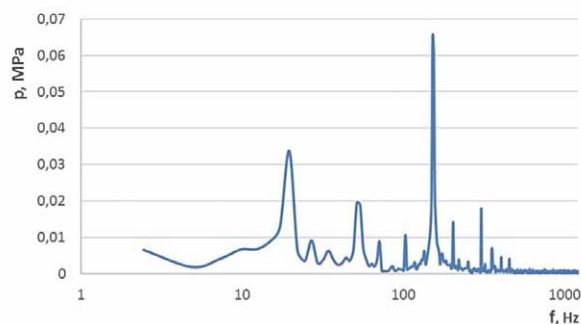


Rys. 9. Przekrój osiowy mikrozaworu maksymalnego: 1 - korpus; 2 - grzybek; 3 - sprężyna; 4 - talerz; 5 - śruba nastawcza; 6 - uszczelnienie; 7 - uchwyt

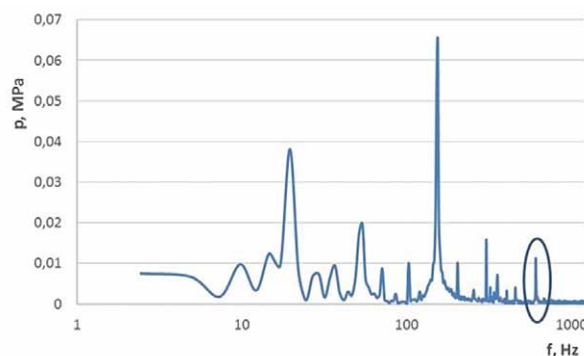
umieszczono piezoelektryczny miniaturowy czujnik pomiaru pulsacji ciśnienia.

Masa mikrozaworu z przewodami wynosi 700 g. Jego budowa jest zbliżona do zaworu przelewowego stosowanego w klasycznej hydraulice. Występuje w nim gniazdo oraz element domykający w kształcie stożka, tzw. grzybek. Taka konstrukcja znajduje zastosowanie do mikrozaworów maksymalnych lub dławiących. Wynika to z wysokiej szczelności w fazie zamknięcia oraz z prostych do wykonania kształtów geometrycznych, co niesie ze sobą niski koszt produkcji. Ponadto zastosowanie grzybka stożkowego w zaworze maksymalnym czyni go odpornym na zanieczyszczenia. Przekrój osiowy zaworu pokazano na rys. 9.

Grzybek, który jest dociskany od góry sprężyną, jest głównym elementem domykającym zaworu. Jego kąt rozwarcia wynosi



Rys. 10. Wykres amplitudy pulsacji ciśnienia w funkcji częstotliwości bez wymuszenia zewnętrznego (czas próbkowania - 1 s, częstotliwość próbkowania - 10 kHz)

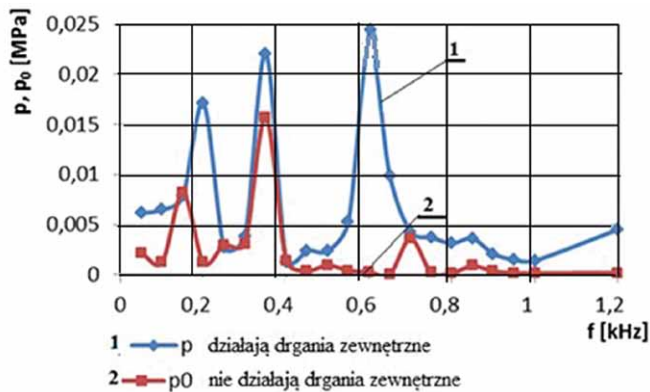


Rys. 11. Wykres amplitudy pulsacji ciśnienia w funkcji częstotliwości z wymuszeniem zewnętrznym 600 Hz (czas próbkowania - 1 s, częstotliwość próbkowania - 10 kHz)

60°. Napięcie wstępne sprężyny ustawiane jest za pomocą śruby regulacyjnej, dzięki czemu istnieje możliwość zmiany ciśnienia otwarcia zaworu. Dla stabilizacji sprężyny pomiędzy sprężyną a śrubą regulacyjną zastosowano talerz. Dla zachowania szczelności pomiędzy śrubą regulacyjną a korpusem zastosowano uszczelnienie pierścieniem o przekroju kołowym typu „Oring”. Do zamocowania zaworu na wzbudniku drgań na zaworze został umieszczony za pomocą śrub specjalny uchwyt.

Wyniki badań

Badania zasadnicze przeprowadzono w układzie mikrohydraulicznym przedstawionym schematycznie na rysunku 4. Wykonano pomiary pulsacji ciśnienia bez zadawania zewnętrznych drgań mechanicznych na korpus mikrozaworu. Następnie wykonano kolejne pomiary z wymuszonymi zewnętrznymi drganiami mechanicznymi mikrozaworem maksymalnym. Parametry drgań były identyczne jak podczas badań rozpoznawczych toru generowania drgań, których wyniki przedstawiono na rysunku 2 i 3. Uzyskane wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 10 i 11.



Rys. 12. Zbiorczy wykres amplitudy pulsacji ciśnienia w funkcji częstotliwości [8]

Na rys. 11 można zauważyć, w odróżnieniu od widma prezentowanego na rys. 10, dodatkową składową w widmie amplitudowo-częstotliwościowym pulsacji ciśnienia, spowodowaną oddziaływaniem zewnętrznych drgań mechanicznych na badany mikrozawór o częstotliwości 600 Hz. Kolejne, niższe składowe widma pulsacji ciśnienia odpowiadają m.in. pulsacji ciśnienia wynikającej z pulsacji wydajności mikropompy wporowej oraz niewyrównoważenia wału napędowego.

Podsumowanie

Mikrohydraulika stanowi jeden z najintensywniej rozwijających się obszarów hydrauliki. Pojawiają się coraz to nowe jej zastosowania. Jednak pracy elementów i układów mikrohydraulicznych towarzyszą pewne problemy, które wynikają również ze specyficznych wymagań stawianych tym układom, a wśród nich odporności na drgania mechaniczne i niskiego poziomu hałasowości. Zbudowane stanowisko doświadczalne oparte jest na elementach wykonawczych Bruel&Kjaer i wyposażone jest w kartę pomiarowo-sterującą IO Tech DaquBoard 2000. Posłużyć może do badań wpływu zewnętrznych drgań mechanicznych na elementy mikrohydrauliczne. Przedstawione wyniki badań doświadczalnych wskazują, że badany mikrozawór wzniosowy poddawany zewnętrznym drganiom mechanicznym jest źródłem dodatkowych składowych widma pulsacji ciśnienia w układzie mikrohydraulicznym. Wartość amplitud tych dodatkowych składowych widma pulsacji ciśnienia wzrasta w pobliżu rezonansu grzybka badanego mikrozaworu, rys. 12 [8]. Na rysunku 12 zaprezentowano porównanie amplitud pulsacji ciśnienia w układzie z mikrozaworem maksymalnym dla dwóch przypadków: mikrozawór poddawany zewnętrznym drganiom mechanicznym – krzywa 1, oraz przypadek braku zewnętrznych drgań mechanicznych – krzywa 2. Wykres ten prezentuje skutki oddziaływania zewnętrznych drgań mechanicznych na mikrozawór maksymalny. Maksymalna wartość amplitudy pulsacji ciśnienia występuje przy częstotliwości wymuszeń $f = 630$ Hz. Odpowiada to częstotliwości własnej mikrozaworu maksymalnego, wyznaczonej w sposób analityczno-doświadczalny w pracy [8].

Wzbudzenie się drgań grzybka mikrozaworu oraz powstająca pulsacja ciśnienia prowadzić mogą do pojawienia się dodatkowych drgań mechanicznych mikroprzewodów hydraulicznych, nierównomierności pracy odbiorników mikrohydraulicznych oraz zwiększonej hałasowości pracy tych układów. Należałoby kontynuować prace zmierzające do redukcji oddziaływania zewnętrznych drgań mechanicznych na mikrozawory hydrauliczne np. metodami wibroizolacji biernej.

Literatura

- [1] STOSIAK M.: *Identyfikacja oddziaływania drgań i metody ich redukcji w wybranych zaworach hydraulicznych*. Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2015.
- [2] ENGEL Z., ZAWIESKA M.: *Hałas i drgania w procesach pracy: źródła, ocena, zagrożenia*. CIOP-PIB, Warszawa 2010.
- [3] GRAJNERT J.: *Izolacja drgań w maszynach i pojazdach*. Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 1997.
- [4] KOLLEK W. (RED.): *Podstawy projektowania, modelowania, eksploatacji elementów i układów mikrohydraulicznych*. Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2011.
- [5] KUDZMA Z., KUŁAKOWSKI K., STOSIAK M.: *Wybrane problemy w eksploatacji układów mikrohydraulicznych*. „Napędy i Sterowanie” 4/2014.
- [6] BYUNG-PHIL M., MI-YOUNG S., HO-SEUNG J., CHUL-JU K.: *Fabrication of a No-Leakage Micro-Valve with a Free-Floating Structure for a Drug-Delivery System*. „Journal of the Korean Physical Society” Vol. 43, No. 5, November 2003, pp. 930–934.
- [7] Dyrektywa nr 2000/14/EC Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 8 maja 2000 r. W sprawie zbliżenia przepisów prawnych państw członkowskich dotyczących emisji hałasu do środowiska przez urządzenia używane na zewnątrz pomieszczeń.
- [8] FIGIEL A., KUDZMA Z., STOSIAK M.: *Ocena właściwości dynamicznych mikrozaworu maksymalnego*. Problemy rozwoju maszyn roboczych: XXIX Konferencja Naukowa, Zakopane, 25–27 stycznia 2016: Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, cop. 2016. s. 1–12.

Inż. Marek Lubecki – magistrant Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, e-mail: 205493@student.pwr.edu.pl;
dr hab. inż. Michał Stosiak, prof. PWR – Z-ca Kierownika Katedry Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, e-mail: michal.stosiak@pwr.edu.pl;
mgr inż. Krzysztof Towarnicki – doktorant na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej, Katedra Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych, Wydział Mechaniczny, e-mail: krzysztof.towarnicki@pwr.edu.pl