

## Budowa stanowiska oraz wstępne badania wpływu drgań mechanicznych na mikrozawory hydrauliczne

Michał Stosiak, Krzysztof Towarnicki, Marek Lubecki

Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering,  
Department of the Operation of Logistic Systems, Transport Systems and Hydraulic Systems,  
Lukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław, e-mail: michal.stosiak@pwr.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wymagania stawiane układom mikrohydraulicznym. Zwrócono uwagę na występujące zakłócenia pracy. Podano przykłady oraz źródła powodujące zaburzenia pracy układu hydraulicznego. Omówiono zostało wstępne stanowisko badawcze do identyfikacji wpływu zewnętrznych drgań mechanicznych na elementy mikrohydrauliczne. Przedstawiono zarówno schemat hydraulicznego układu pomiarowego, jak również blokowy układ aparatury pomiarowej. Jako reprezentatywny element mikrohydrauliczny który został poddany drganiom mechanicznym użyto mikrozaworu maksymalnego. Zawarto jego przekrój jego budowy oraz elementów składowych.

**Słowa kluczowe:** mikrohydraulika, zawór przelewowy, drgania, pulsacja ciśnienia

## The influence of external mechanical vibrations on hydraulic microvalves. Test stand design and preliminary tests

**Abstract:** Fluid pressure fluctuations in a microhydraulic system can be caused by fluctuations in the rate of fluid delivery, due to the operational kinematics of the micropump's displacement elements, as well as by external excitations. This paper presents the requirements for microhydraulic systems and indicates the disturbances that can occur during operation. A test stand was designed to identify the impact of external mechanical vibrations on microhydraulic elements. Test stand was equipped with a measuring system to generate and record vibrations and examine their effect on the operation of microhydraulic components. Set parameters and operating conditions of the system during measurements were given. A relief microvalve was chosen, as a representative microhydraulic component. Based on the measurements, additional component derived from external vibrations was identified in frequency spectrum of pressure pulsations.

**Keywords:** microhydraulics, pressure relief valve, vibration, pressure fluctuation

### 1. Wstęp

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 posadowione są na stropach i fundamentach. Do tego rodzaju drgań zaliczyć można też drgania wywołane przez urządzenia instalacji sanitarnej choć przeważnie mają one charakter

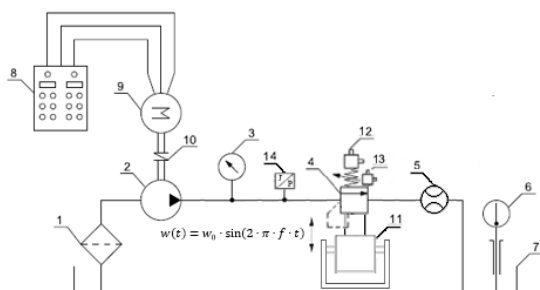
akustyczny. Drgania pochodzące z zewnątrz przenoszone są przez podłoże, a ich źródłami mogą być:

- 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 w 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 z (np. podczas przejazdu maszyny mobilnej po nierównym podłożu).

## 2. Materiały i metody

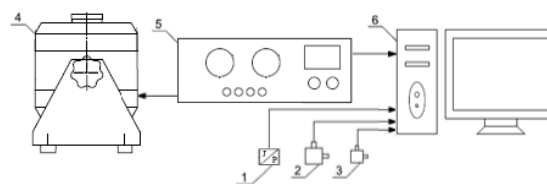
Dla przeprowadzenia badań wpływu zewnętrznych drgań mechanicznych na mikrozawory hydrauliczne oraz ich elementów sterujących zostało zbudowane stanowisko pomiarowe które przedstawiono poniżej na rys. 2.



Rys. 1. – 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, 11- elektrodynamiczny wzbudnik drgań mechanicznych TiraVib, 12,13- piezoelektryczne czujniki przyspieszenia PCB Piezotronics 340A16 i 356B21, 14- piezoelektryczny czujnik ciśnienia PCB Piezotronics 105C23.

Badania wstępne na stanowisku badania odporności mikrozaworów hydraulicznych na drgania rozpoczęły się od cechowania elementów układu, czyli od sprawdzenia prawidłowości przeprowadzania pomiarów. 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 wzmacniacz pomiarowy potwierdziły wartości generowane przez kalibrator, rozpoczęto kolejny etap pomiarów. Zamontowano jednoosiowy akcelerometr w linii generowanych drgań przez wzbudnik drgań. Przeprowadzono serie pomiarów dla stałego zasilania wzbudnika drgań, dla częstotliwości wymuszenia w zakresie 200-1100 Hz z krokiem 20 Hz. Olej użyty podczas badań to Azolla

22AF,  $\rho = 865$  [kg/m<sup>3</sup>],  $v(40^{\circ} \text{C}) = 22,5$  [mm<sup>2</sup>/s]. Do generowania drgań również służy wzmacniacz pomiarowy TiraVib. Służy do generowania harmonicznym przebiegów czasowych o zadanym kształcie i częstotliwości. Wzmacniacz drgań umożliwia wzmocnienie sygnału płynącego z generatora, a co za tym idzie uzyskanie pożądanej amplitudy. Wzmocnienie to ustawiane jest płynnie za pomocą pokrętła regulacji napięcia na wyjściu ze wzmacniacza. Wyświetlacz wzmacniacza pozwala na kontrolę parametrów pracy, a nastawiany płynnie ogranicznik prądowy zabezpiecza układ przed niepożądanym wzrostem natężenia prądu.



Rys. 2. Układ pomiarowy: 1 – piezoelektryczny czujnik ciśnienia PCB Piezotronics 105C23, 2,3 – piezoelektryczne czujniki przyspieszenia PCB Piezotronics 340A16 i 356B21, 4 – elektrodynamiczny wzbudnik drgań mechanicznych TiraVib, 5 – wzmacniacz pomiarowy BA 1000 TiraVib, 6 – komputer PC.

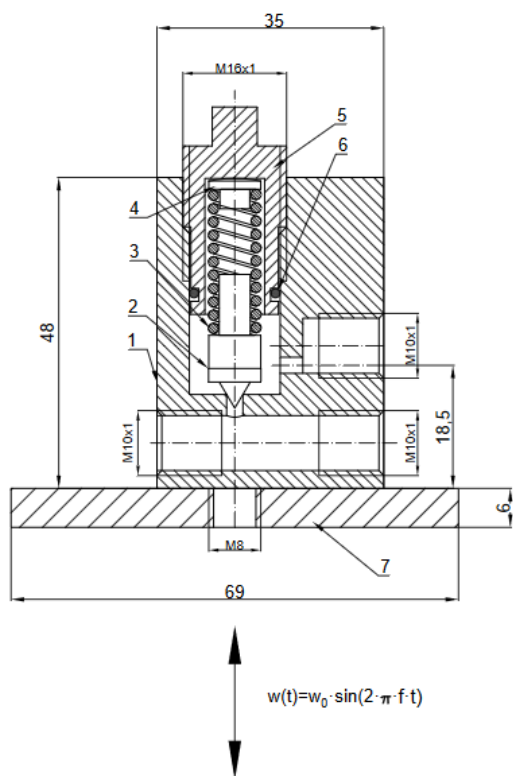


Rys. 3. Elektrodynamiczny wzbudnik drgań mechanicznych TiraVib

Aby mierzyć drgania oraz ich wpływ na pracę elementów mikrohydraulicznych stanowisko badawcze zawiera układ pomiarowy. Sygnał zbierany przez piezoelektryczne czujniki ciśnienia (1) oraz przyspieszeń (2,3) przesyłany był do komputera, który posiada wbudowaną kartę pomiarową, gdzie zachodziła konwersja analogowo-cyfrowa i akwizycja danych. Do komunikacji z kartą pomiarową wykorzystano dedykowane oprogramowanie PUMA pozwalające na zdalne rozpoczęcie, zakończenie i zapisywanie pomiarów. Dalsza obróbka danych przeprowadzona została w środowisku OriginPro 9.0.

Istotnym elementem układów mikrohydraulicznych są zawory hydrauliczne. Do badań wstępnych na stanowisku badania odporności mikrozaworów

hydraulicznych na drgania użyto mikrozaworu przelewowego przedstawionego poniżej na rys. 7. Dla przeprowadzenia pomiarów, na obudowie mikrozaworu zamontowano mechanicznie trójosiowy akcelerometr, na śrubie regulacyjnej został przymocowany jednoosiowy akcelerometr (o masie 2g) oraz w linii ciśnieniowej zaworu 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 dławiających. 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 przelewowym czyni go odpornym na zanieczyszczenia. Przekrój osiowy zaworu pokazano na rys. 4.



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

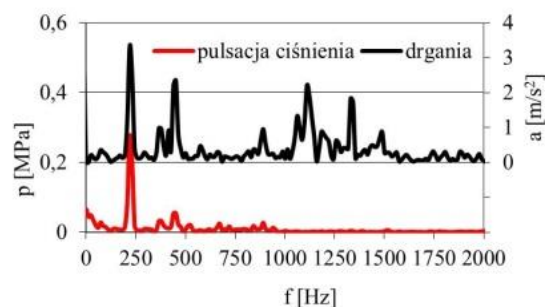
Grzybek, który jest dociskany od góry sprężyną, jest głównym elementem domykającym zaworu. Jego kąt rozwarcia wynosi  $30^\circ$ . Napięcie wstępne sprężyny ustawiane jest za pomocą śruby regulacyjnej, dzięki temu istnieje możliwość zmiany ciśnienia otwarcia zaworu. Dla stabilizacji sprężyny, pomiędzy 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.

### 3. Teoria

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 roboczej [4], będącej skutkiem kinematyki pracy elementów wyporowych mikropompy. Pulsacja wydajności mikropompy prowadzi w układzie mikrohydraulicznym do powstania okresowo zmiennych ciśnień o postaci funkcji harmonicznej. 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. 5.



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

W widmie przedstawionym na rys. 3.3 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.:

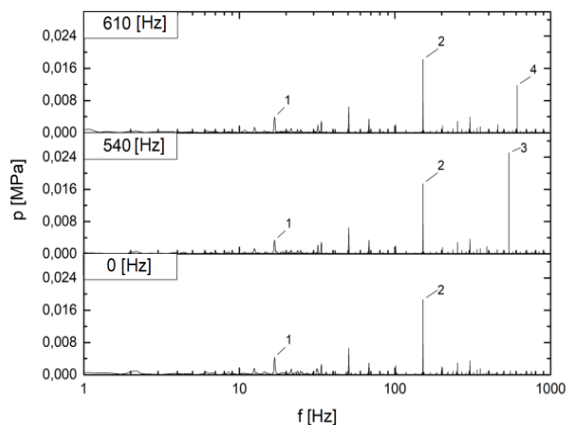
- pewność działania,
- niski poziom hałasu (nie przekraczający wartości dopuszczalnych sukcesywnie obniżanych), [6],
- małe wymiary przy zachowaniu przenoszonych mocy,

- 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.

#### 4. Wyniki

Do przeprowadzenia zasadniczych badań został uruchomiony układ hydrauliczny. Wykonano pomiary pulsacji ciśnienia, bez zadawania zewnętrznych drgań mechanicznych na korpus mikrozaworu.



Rys. 6. Wykres amplitudy pulsacji ciśnienia w funkcji częstotliwości  $n=1000$  obr/min,  $p_{sr} = 11$  MPa,  $Q = 1 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s (0,6 dm<sup>3</sup>/min).

Następnie wykonano kolejne pomiary z zewnętrznymi drganiami mechanicznymi na obudowie mikrozaworu maksymalnego. Parametry drgań były identyczne jak podczas badań rozpoznawczych toru generowania drgań. Uzyskane wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 6. Do badań została użyta pompa zębata o ząbieniu zewnętrznym o liczbie zębów  $z=9$ . Na wykresie na rys. 6. można zauważyć dodatkową składową (3) w widmie amplitudowo-częstotliwościowym pulsacji ciśnienia, pochodzącą od oddziaływań zewnętrznych drgań mechanicznych. Jej stosunkowo wysoka wartość wynika z wzbudzenia się drgań grzybka mikrozaworu powodując dodatkową pulsację ciśnienia. Na wykresie można zauważyć dodatkową składową (4) pochodzącą od zewnętrznych drgań mechanicznych ale o niższej wartości, gdyż

częstotliwość drgań znacząco odbiega od częstotliwości rezonansowej mikrozaworu. Kolejne niższe składowe widma pulsacji ciśnienia odpowiadają: (2) - pulsacji wydajności mikropompy wyporowej oraz (1) - nierównoważeniu wału napędowego.

#### 5. Wnioski

Mikrohydraulika stanowi jeden z najintensywniej rozwijających się obszarów hydrauliki. Pojawiają się co raz to nowe jej zastosowania. Jednak pracy elementów i układów mikrohydraulicznych towarzyszą pewne problemy, które wynikają również ze specyficznych wymagań stawianych tym układowi, a wśród nich odporności na drgania mechaniczne i niskiego poziomu hałaśliwości. Zbudowane stanowisko doświadczalne oparte jest na elementach wykonawczych Bruel&Kjaer i wyposażone jest w kartę pomiarowo-sterującą IO Tech DaqBoard 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 [7]. Prowadzić to może do pojawienia się dodatkowych drgań mechanicznych mikroprzewodów hydraulicznych, nierównomierności pracy odbiorników mikrohydraulicznych oraz zwiększonej hałaśliwości pracy tych układów. Nadmienić należy, że elementy i układy mikrohydrauliczne, z uwagi na średnice okien przelotowych szczególnie wrażliwe są na zjawisko obliteracji. Ponadto dyrektywy Unii Europejskiej [8] 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.

#### Finansowanie

Badania zostały sfinansowane ze środków statutowych Katedry Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej.

## Literatura

- [1] Stosiak M. *Identification of impact of vibrations and their reduction in selected hydraulic valves*, Wrocław University of Technology Publishing House, Wrocław 2015 (in Polish)
- [2] Engel Z., Zawieska M., *Noise and Vibration in Work Processes: Sources, Assessment, Hazards*, Central Institute for Labour Protection, National Research Institute, Warsaw, 2010 (in Polish).
- [3] Grajner J., *Vibration Insulation of Machines and Vehicles*, Wrocław University of Technology Publishing House, Wrocław, 1997 (in Polish).
- [4] Kollek W. et al. *Microhydraulic components and systems – fundamentals of design, modelling and operation*, Wrocław University of Technology Publishing House, Wrocław, 2011, (in Polish)
- [5] Kudźma Z., Kułakowski K., Stosiak M.: *Selected issues regarding exploitation of microhydraulic drives*. Napędy i sterowanie 2014, Vol 16, 78-83 (in Polish)
- [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] Figiel A., Kudźma Z., Stosiak M.: *Evaluation of the dynamic properties of the maximum microvalve*. Problemy rozwoju maszyn roboczych: XXIX scientific conference: papers, Zakopane, 25-27 stycznia 2016: Institute of Mechanised Construction and Rock Mining, 2016. p. 1-12 (in Polish)
- [8] Directive 2000/14/EC of the European Parliament and of the Council of 8 May 2000 on the approximation of the laws of the Member States relating to the noise emission in the environment by equipment for use outdoors.