

Badania doświadczalne zminiaturyzowanych elementów hydraulicznych

Zygmunt Kudźma, Michał Stosiak

1. Wstęp

Istotną zaletą napędu hydrostatycznego jest, między innymi, możliwość uzyskiwania wyjątkowo dużej gęstości strumienia przekazywanej mocy w układzie napędowym, to znaczy małej masy na jednostkę generowanej lub przenoszonej mocy. Wartości ciśnień roboczych rzędu 35–40 MPa są obecnie czymś zupełnie normalnym. Moc 1 kW przy tych ciśnieniach można uzyskać ze strumienia cieczy roboczej o natężeniu przepływu objętościowego zaledwie 30–25 cm³/s (1,8–1,5 dm³/min). Przykładowo gęstość mocy dla pomp i silników hydraulicznych może dochodzić nawet do 10 kW/kg, podczas gdy gęstość mocy przeciętnych silników elektrycznych wynosi od 0,1 do 0,15 kW/kg.

W ostatnich latach zauważa się tendencję do miniaturyzacji elementów i układów hydraulicznych, powstaje nowa dziedzina napędów – mikrohydraulika. W napędach hydrostatycznych klasycznych stosuje się odpowiednie typoszeręgi wielkości nominalnych WN. I tak dla zaworów wielkością nominalną jest średnica nominalna otworów przepływowych. Wszystkie elementy hydrauliczne o średnicach nominalnych mniejszych od 6 mm [WN < 6 mm] zalicza się do mikrohydrauliki [2]. Wielkością nominalną [WN] dla mikropomp zębatych jest geometryczna objętość robocza V_g [cm³/obr.], którą w mikrohydraulicie przyjmuje się w zakresie od 1,2 cm³/obr. Mikrohydraulika charakteryzowana jest również przepływami małymi (< od 300 cm³/min) lub bardzo małymi (< od 120 cm³/min) [10].

Obszarami zastosowań mikrohydrauliki są te dziedziny, które wymagają przeniesienia dużej mocy, zapewnienia płynności ruchów przy znacznym ograniczeniu wymiarów geometrycznych. Postępujący rozwój elementów i układów mikrohydraulicznych powoduje, że coraz częściej układy mikrohydrauliczne wypierają układy pneumatyczne czy elektromechaniczne. Ponadto miniaturyzacja pozwala również mikrohydraulicie zastąpić klasyczną hydraulikę wszędzie tam, gdzie ze względu wymiarów czy masy nie może być ona zastosowana. Dzieje się tak, między innymi w inżynierii i technice medycznej np. w napędach stołów operacyjnych i rentgenowskich, foteli dentystrycznych; w motoryzacji, np. w serwomechanizmach wspomagających układy kierownicze i hamulcowe, w automatyzacji skrzyni biegów, w zawieszaniach hydropneumatycznych, w konstrukcji foteli kierowcy, w urządzeniach podnośnikowych, w przemyśle lotniczym, a także chemicznym i spożywczym do dokładnego dozowania strumienia płynu [1].

Streszczenie: W artykule przedstawiono wybrane przykłady zminiaturyzowanych elementów hydraulicznych. Zaprezentowano wyniki prac własnych dotyczących przepływów w mikroelementach hydraulicznych (mikrozaworze wzniosowym, mikroprzewodzie hydraulicznym) oraz wydzielenia obszaru pracy stabilnej mikrozaworu hydraulicznego. Zwrócono uwagę na hałaśliwość pracy układów mikrohydraulicznych, poddając, jako przykład, analizie mikrozasilacz hydrauliczny.

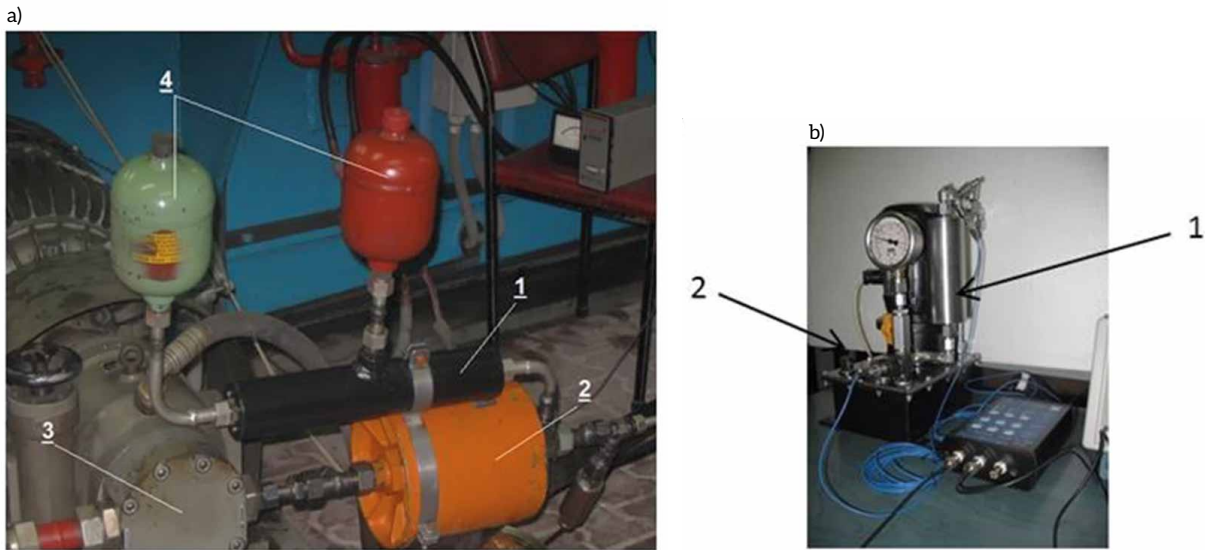
🇬🇧 MICROHYDRAULICS AND HYDROTRONICS DEVELOPMENT AREAS OF FLUID DRIVES

Abstract: In the paper some selected examples of miniaturized hydraulic components were presented. Some results of tests of flow in hydraulic microcomponents (lift microvalve, hydraulic micropipe) and creating of stable work of hydraulic microvalve were discussed. Special attention was focused on noise problem of microhydraulic systems. This problem was considered in example of microhydraulic power unit.

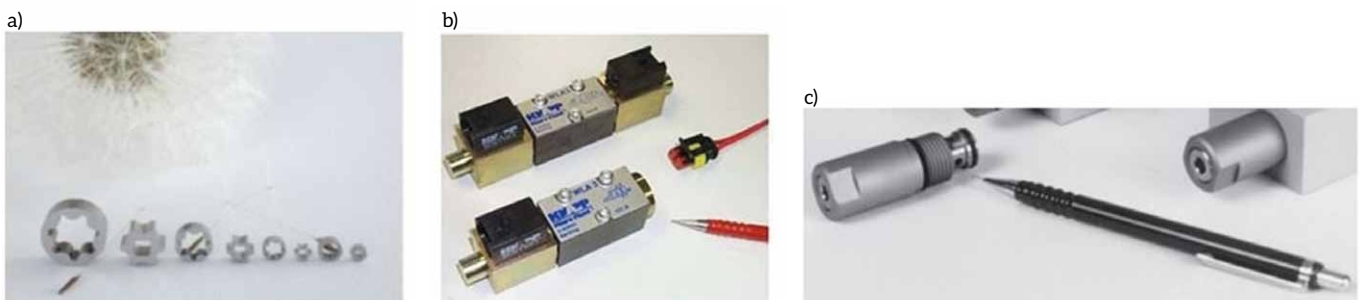
Wśród wymagań, które stawia się elementom i układom mikrohydraulicznym, wymienić należy przede wszystkim:

- pewność działania;
- niski poziom hałasu (nieprzekraczający wartości dopuszczalnych, sukcesywnie obniżanych) [3, 12];
- małe wymiary przy zachowaniu przenoszonych mocy;
- czystość 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 [3] 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 [12]. Z tego powodu prowadzone są prace teoretyczne i doświadczalne nad opracowaniem i zastosowaniem w układach mikrohydraulicznych tłumików pulsacji ciśnienia,



Rys. 1. Tłumiki pulsacji ciśnienia: a) skala makro (hydraulika konwencjonalna): 1 - tłumik czynny; 2 - tłumik bierny; 3 - pompa wyporowa; 4 - akumulatory hydropneumatyczne; b) skala mikro (mikrohydraulika): 1 - mikrołumik pulsacji ciśnienia (bierny); 2 - mikrozasilacz hydrauliczny



Rys. 2. Elementy mikroukładów hydraulicznych oferowane przez wyspecjalizowanych producentów: a) części składowe mikropomp gerotorowych HNP Mikrosysteme GmbH [14]; b) mikrorozdzielacz WLA3 niemieckiej firmy Hoerbiger Microfluid GmbH [15]; c) mikrozwór przelewowy [15]

które przyczynią się do obniżenia hałaśliwości pracy tych układów. Przykładowe wykonanie tłumika pulsacji ciśnienia w makro oraz mikro przedstawiono na rys. 1.

W hydraulice konwencjonalnej, z racji występowania wymuszeń w spektrum obejmującym również niskie częstotliwości (w zakresie infra), projektowane są tłumiki działające w szerszym zakresie, a składające się z tłumika biernego i czynnego, jak pokazano na rys. 1 a. W mikrohydraulice – ze względu m.in. na niewielkie masy elementów sterujących mikrozworów – częstotliwości wymuszeń są wyższe, toteż zazwyczaj wystarczające jest zastosowanie tłumika biernego (np. typu komorowego) działającego skutecznie w zakresie wyższych częstotliwości, rys.1 b.

2. Wybrane przykłady elementów i układów mikrohydraulicznych

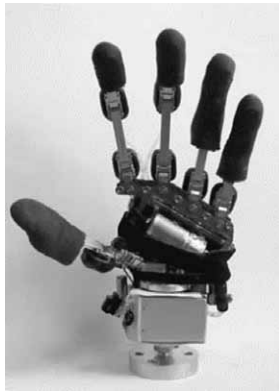
2.1. Elementy i układy mikrohydrauliczne oferowane przez wyspecjalizowanych producentów

Obecnie można już zauważyć, że na rynku światowym hydrauliki pojawiają się zminiaturyzowane wyroby: elementy i całe mikroukłady hydrauliczne.

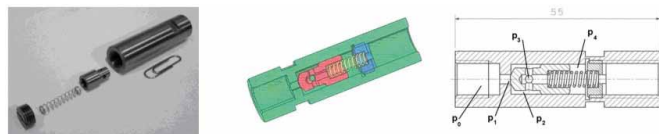
Najprostsze konstrukcje stanowią mikropompy zębate o zażębieniu zewnętrznym lub wewnętrznym oraz pompy gerotorowe. Nadają się idealnie do dozowania płynów o dużej lepkości. Można za pomocą nich dozować wodę, roztwory wodne olejów i klejów, farby, lakiery, silikony. Ruchome części składowe przykładowych mikropomp gerotorowych pokazano na rysunku 2 a.

W mikroukładach hydraulicznych również ważne zastosowanie jak mikropompy mają mikrozwory, służące do sterowania kierunkiem strumienia cieczy. Wśród podstawowych elementów mikrohydraulicznych niezbędnych do sterowania pracą mikroodbiorników hydraulicznych są zminiaturyzowane rozdzielacze suwakowe. Na rysunku 2 b zaprezentowano się mikrorozdzielacz suwakowy firmy Hoerbiger Microfluid GmbH [15]. Zasada działania mikrorozdzielacza suwakowego nie różni się zasadniczo od typowych rozwiązań.

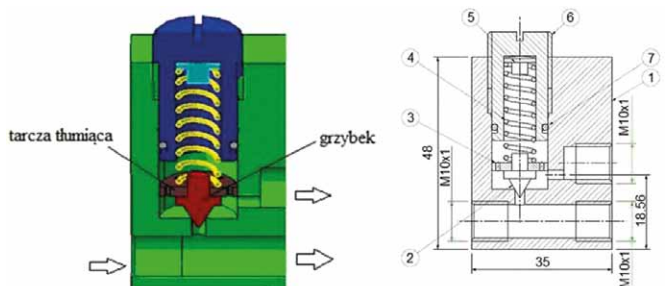
Przepływ maksymalny w prezentowanym mikrorozdzielaczu wynosi $8 \text{ dm}^3/\text{min}$. Ciśnienie robocze wynosi 25 MPa, a średnica nominalna 3 mm. W położeniu neutralnym suwak utrzymywany jest przez sprężyny, a skrajne położenie osiąga dzięki konwencjonalnym elektromagnesom zasilanym 12 lub 24 V o poborze mocy 10 W. Cechuje je budowa kompaktowa



Rys. 3. Sztuczna dłoń, w której wykorzystany został układ mikrohydrauliczny [4]



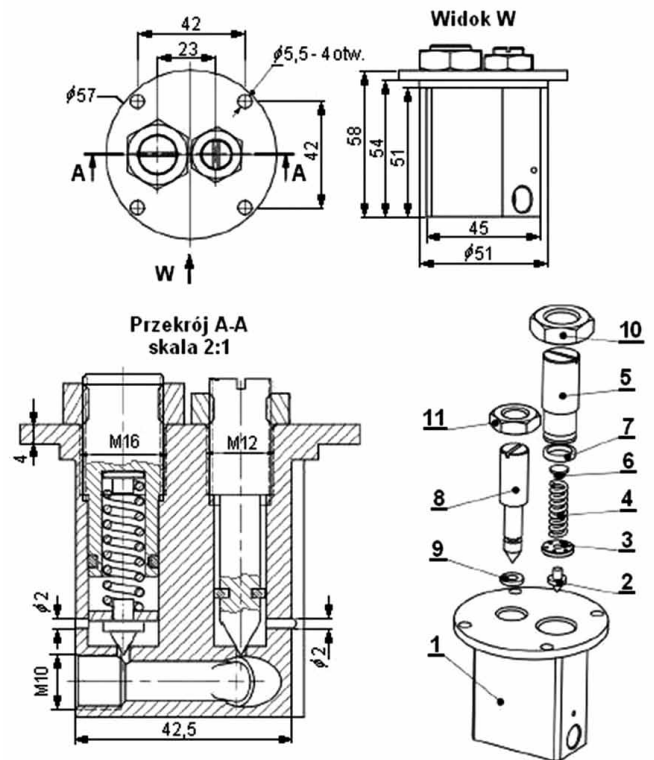
Rys. 4 a. Mikrozwór zwrotny [12]



Rys. 4 b. Mikrozwór maksymalny: 1 - korpus; 2 - grzybek; 3 - tarcza tłumiąca; 4 - sprężyna; 5 - talerz; 6 - śruba nastawcza; 7 - uszczelka [6]

i mała masa – korpus zaworu o powierzchni 26 mm², niewielkie przecieki od 3 do 30 cm³/min w zależności od warunków pracy. Zawór ten dzięki swoim małym wymiarom może być montowany bezpośrednio na cylindrze hydraulicznym, zmniejszając tym samym gabaryty całego układu hydraulicznego oraz podwyższając wartość częstotliwości drgań własnych nietłumionych odbiornika hydraulicznego, co jest szczególnie istotne przy zastosowaniu sterowania proporcjonalnego mikrorozdzielacza hydraulicznego [16]. Oferowane są również mikrozwory jednostopniowe przelewowe na przepływ nominalny 3 dm³/min, w których ciśnienia otwarcia dochodzą do 25 MPa, waga zaś wynosi ok. 50 g – rys. 2 c.

Elementy i układy mikrohydrauliczne nadają się również do dobrze do odwzorowywania funkcji kończyn ludzkich, jako lekkie, trwałe i zdolne naśladować kinematykę ruchów organów człowieka. Przykładem takiego rozwiązania jest dłoń robota (rys. 3), która ma wygląd bardzo przypominający dłoń ludzką [4]. Jest zbudowana głównie ze stopów aluminium o podwyższonej wytrzymałości, zapewniających dużą wytrzymałość oraz sztywność konstrukcji. Dłoń składa się z 11 par kinematycznych,



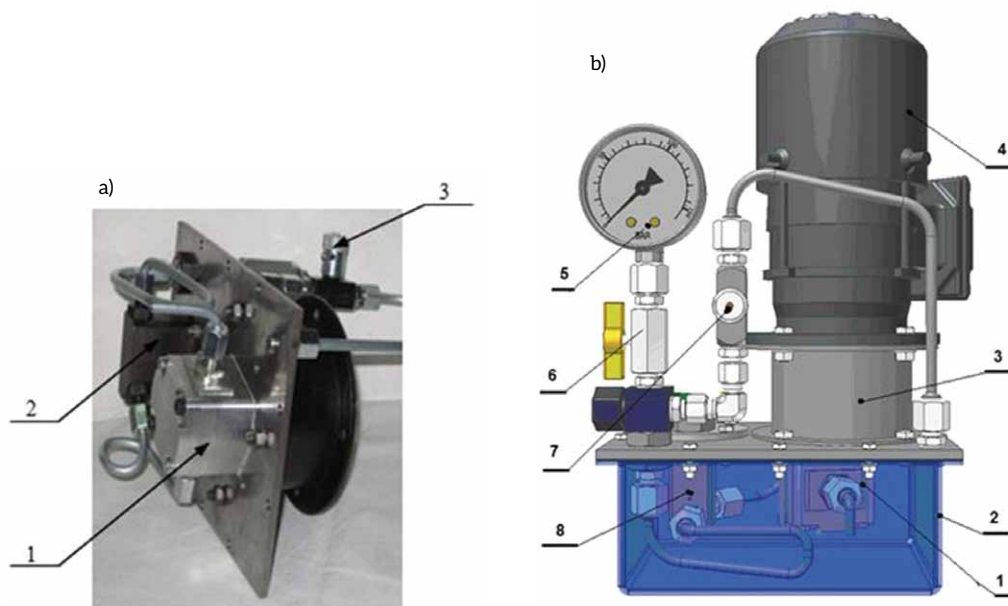
Rys. 5. Blok zaworowy montowany w płycie zbiornika mikrozasilacza hydraulicznego: 1 - korpus bloku zaworowego; 2 - grzybek; 3 - tarcza tłumiąca; 4 - sprężyna; 5 - śruba nastawiająca; 6 - talerzyk; 7 - uszczelnienie; 8 - iglica; 9 - uszczelnienie; 10, 11 - nakrętki konstruujące [6]

z czego 8 jest napędzanych przez mikrohydrauliczne elementy wykonawcze. Liczba par kinematycznych została zoptymalizowana pod kątem dynamiki oraz funkcjonalności mechanizmu sztucznej dłoni. Wszystkie pary kinematyczne oraz połączone z nimi elementy wykonawcze są zamienne, co ułatwia ewentualną naprawę układu oraz obniża koszty produkcji.

Zminiaturyzowany układ hydrauliczny sztucznej dłoni składa się m.in. z: mikroziornika, mikropompy zębatej o zazębieniu zewnętrznym, mikroprzewodów oraz mikrozworów. Układ sterowania elektrycznego silnikiem napędowym mikropompy i mikrozworów daje możliwości sterowania kierunkiem ruchu poszczególnych członów oraz w sposób płynny prędkością. W układzie sterującym wykorzystywane są sygnały pochodzące od czujników przemieszczenia par kinematycznych i panujących w tych parach sił. Ten zintegrowany układ, składający się z elementów mechanicznych, hydraulicznych i elektronicznych, znajduje się w śródreźcu.

2.2. Elementy i układy mikrohydrauliczne konstrukcji własnej

Prowadzone są również prace własne nad opracowaniem i doskonaleniem konstrukcji mikropomp zębatych o zazębieniu zewnętrznym. W wyniku tych prac stworzono szereg mikropomp o wydajnościach właściwych od 0,25 cm³/obr. do 1,2 cm³/obr. i ciśnieniach pracy przekraczających 20 MPa.



Rys. 6. Mikrozasilacz własnej konstrukcji: a) 1 - mikropompa zębata, $q_p = 0,8 \text{ cm}^3/\text{obr.}$; 2 - blok mikrozaworów; 3 - mikrozawór dławiący; b) 1 - mikropompa zębata $q_p = 0,8 \text{ cm}^3/\text{obr.}$; 2 - zbiornik o pojemności $0,95 \text{ dm}^3$; 3 - sprzęgło; 4 - silnik elektryczny; 5 - manometr; 6 - zawór odcinający; 7 - nastawny zawór dławiący; 8 - blok mikrozaworów: maksymalny, nastawny zawór dławiący [6]

Opracowano również i w przypadku grupy mikrozaworów hydraulicznych konstrukcje własne w postaci: mikrozaworu zwrotnego (rys. 4 a), mikrozaworu maksymalnego (rys. 4 b), bloku zaworowego, w którego skład wchodzi: mikrozawór przelewowy i nastawny mikrozawór dławiący (rys. 5).

Przykładem mikrozaworu hydraulicznego własnej konstrukcji jest mikrozawór zwrotny – rys. 4 a. Główne wymiary takiego mikrozaworu to: średnica przyłącza $D = 10 \text{ mm}$, średnica otworu środkowego wydrążonego w grzybku $D_g = 2,5 \text{ mm}$, średnica gniazda $D_t = 2,5 \text{ mm}$, długość gniazda $L_g = 3 \text{ mm}$ średnica wewnętrzna korpusu zaworu $D_k = 8,4 \text{ mm}$.

Na rys. 4 b przedstawiono mikrozawór maksymalny konstrukcji własnej wyposażony w tarczę tłumiącą drgania grzybka [6, 11].

Na rys. 5 w zintegrowanym bloku zaworowym przedstawiono mikrozawór przelewowy i nastawny mikrozawór dławiący. Średnica gniazda mikrozaworu dławiącego wynosi 2 mm .

Blok mikrozaworów hydraulicznych przedstawiony na rys. 5 wchodził w skład mikrozasilacza hydraulicznego własnej konstrukcji (rys. 6 a i 6 b).

Warto nadmienić, że podczas prób eksploatacji mikrozasilacza stwierdzono występowanie czasami nadmiernej hałaśliwości jego pracy. W dalszej części artykułu zaprezentowano wyniki badań świadczące o skutecznym obniżeniu hałaśliwości pracy mikrozasilacza poprzez redukcję drgań grzybka mikrozaworu maksymalnego.

3. Badania doświadczalne nad niektórymi problemami występującymi w mikrohydraulicce

3.1. Przepływ nieizotermiczny w mikroprzewodach hydraulicznych

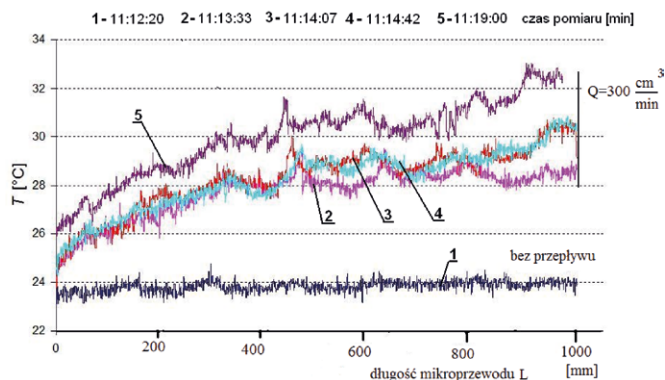
W opisie strat przepływu przez przewody hydrauliczne konwencjonalne przyjmuje się zazwyczaj przepływ izotermiczny

cieczy roboczej. W praktyce przyjęcie takiego założenia zazwyczaj nie prowadzi do powstawania istotnych rozbieżności między wynikami otrzymanymi z obliczeń teoretycznych a wynikami pomiarów rzeczywistych. W odniesieniu do mikrohydrauliki, a w szczególności do mikroprzewodów hydraulicznych, bezkrytyczne przyjęcie założenia o przepływie izotermicznym wydaje się dyskusyjne głównie z punktu widzenia opisu matematycznego przepływów niestacjonarnych. Aby określić, czy przepływ w mikroprzewodzie jest izotermiczny czy nie, należy określić rozkład temperatury wzdłuż mikroprzewodu podczas przepływu przez niego cieczy roboczej. Przeprowadzono badania doświadczalne, które polegały na pomiarze strat ciśnienia w funkcji natężenia przepływu oleju HL68 w przewodzie stalowym (materiał przewodu stal H18N9) o średnicy wewnętrznej $d = 1,1 \text{ mm}$ oraz na rozkładzie temperatury na długości przewodu o długości $l = 1 \text{ m}$ i natężeniu przepływu $Q = 300 \text{ cm}^3/\text{min}$. Rozkład temperatury wzdłuż przewodu mikrohydraulicznego pokazano na rys. 7, a świadczy on, że przepływ cieczy w mikroprzewodzie hydraulicznym ma charakter nieizotermiczny i przy wyprowadzaniu zależności matematycznych na straty przepływu w takim mikroelemente należy to uwzględnić.

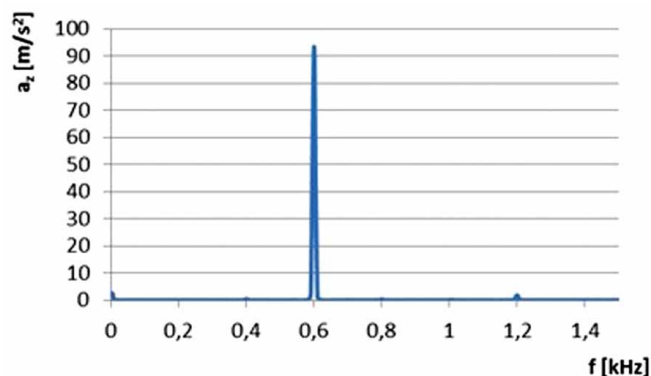
Z powodu stosunkowo wysokich strat ciśnienia i związanych z tym efektów cieplnych, jakie stwierdzono w trakcie badań mikroprzewodu, przy wymiarowaniu tego typu elementu należy zakładać prędkość przepływu nie większą niż $2\text{--}3 \text{ m/s}$ oraz stosować czynnik roboczy o możliwie niskiej lepkości, niższej niż np. lepkość oleju HL 68.

3.2. Oddziaływanie zewnętrznych drgań mechanicznych na mikrozawór przelewowy

Z uwagi na wymagania stawiane elementom i układom mikrohydraulicznym oraz na to, że siły zakłócające są niejednokrotnie rzędu sił sterujących, szczególną uwagę należy poświęcić oddziaływaniu zewnętrznych drgań mechanicznych



Rys. 7. Rozkład temperatury wzdłuż mikroprzewodu hydraulicznego: 1 – pomiar bez przepływu czynnika roboczego; 2, 3, 4 – pomiar z przepływem czynnika roboczego dokonywany co kilkadziesiąt sekund; 5 – pomiar z przepływem czynnika roboczego po ok. 6 min trwania przepływu [5]



Rys. 8. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe przyspieszenia drgań mechanicznych działających na mikrozwór przelewowy – częstotliwość drgań 600 Hz [9]

na te elementy [13]. Przeprowadzono badania doświadczalne, w których mikrozwór przelewowy własnej konstrukcji poddawany był zewnętrznym drganiom mechanicznym o określonej amplitudzie i częstotliwości. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe tych drgań przedstawiono na rys. 8.

Pomiary i rejestracji podlegała również pulsacja ciśnienia w układzie z pobudzonym do drgań mikrozworem przelewowym. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe pulsacji ciśnienia w układzie z drgającym mikrozworem przelewowym przedstawiono na rys. 9.

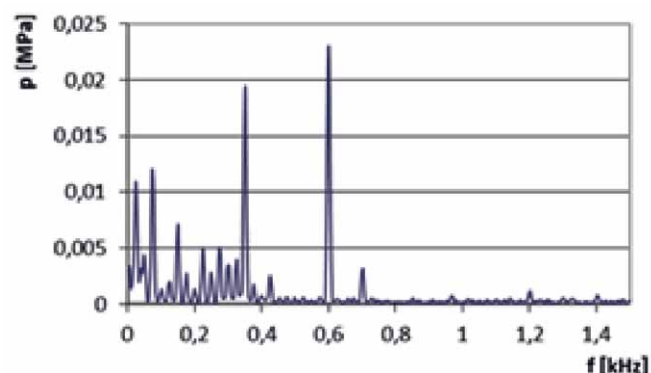
Jak wynika z rys. 9, oddziaływanie zewnętrznych drgań mechanicznych na mikrozwór przelewowy powoduje pojawienie się w widmie amplitudowo-częstotliwościowym pulsacji ciśnienia składowej o częstotliwości odpowiadającej tym drganiom i dominującej amplitudzie. Składowa widma o wartości 350 Hz odpowiada pulsacji ciśnienia będącej skutkiem pulsacji wydajności mikropompy wporowej i impedancji układu hydraulicznego.

W mikroukładzie hydraulicznym prowadzić to może m.in. do nierównomierności pracy odbiorników hydraulicznych, pogorszenia dokładności ich pozycjonowania, wzbudzenia drgań mikroprzewodów hydraulicznych i powstawania hałasu. Szczególnego znaczenia nabiera to w maszynach i urządzeniach precyzyjnych, np. w manipulatorach czy sprzęcie medycznym.

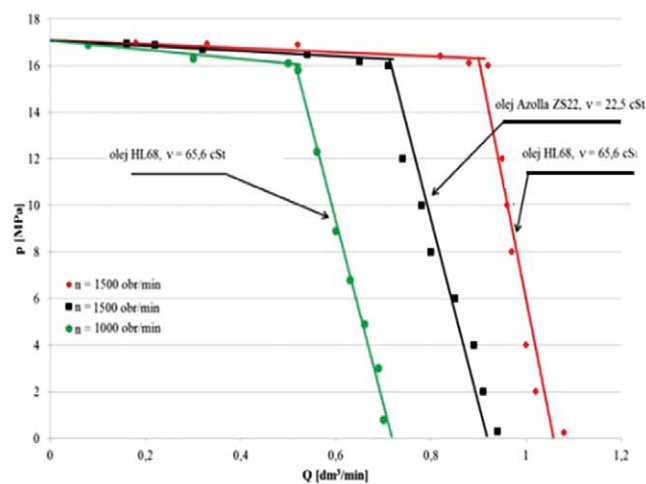
3.3. Badania hydrauliczne i akustyczne mikrozasilacza hydraulicznego

Wykonano badania doświadczalne, w których wyznaczono charakterystykę statyczną mikrozasilacza (z rys. 6) własnej konstrukcji, używając podczas badań olejów mineralnych o różnych lepkościach a badania przeprowadzając przy różnych prędkościach obrotowych na wałku mikropompy. Wyniki tych badań przedstawione zostały na rys. 10.

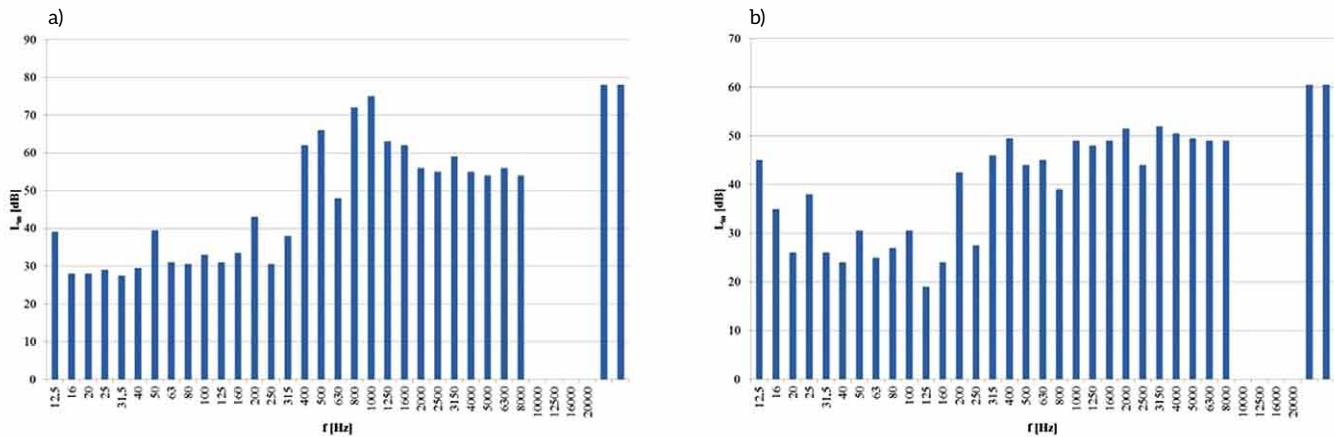
Porównanie wyników z rys. 10 dla tej samej prędkości obrotowej wałku mikropompy wskazuje na spadek sprawności objętościowej w przypadku zastosowania oleju o mniejszej lepkości. Tak więc – wymagany ze względów minimalizacji strat przepływu oraz wzrostu temperatury cieczy roboczej – olej



Rys. 9. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe pulsacji ciśnienia w układzie hydraulicznym, w którym na mikrozwór przelewowy działały drgania mechaniczne o częstotliwości 600 Hz [9]



Rys. 10. Charakterystyki statyczne mikrozasilacza hydraulicznego, $q_p = 0,8 \text{ cm}^3/\text{obr.}$ [7]



Rys. 11. Widmo tercjowe hałas mikrozasilacza: a) przed modernizacją (praca niestabilna), b) po modernizacji (praca stabilna) [7]

o obniżonej lepkości prowadzi w mikropompach wyporowych do spadku sprawności objętościowej.

Jak wspomniano, w trakcie pracy mikrozasilacza stwierdzono jego nadmierną hałaśliwość. Zidentyfikowano, że odpowiada za to mikrozwór maksymalny, którego element zamykający (grzybek stożkowy) wpada w drgania mechaniczne. Zdecydowano się wprowadzić do zaworu, pomiędzy sprężynę a grzybek stożkowy, specjalną tarczę tłumiącą wykonaną w taki sposób, że

przeptywająca przez nią ciecz jest źródłem siły tłumiącej o wartości różnej i uzależnionej od kierunku ruchu tarczy i związanego z nim grzybka stożkowego. Rozwiązanie to jest przedmiotem ochrony w ramach udzielonego przez Urząd Patentowy RP patentu nr 221214 [11].

Celem weryfikacji skuteczności przeprowadzonego zabiegu zdecydowano się przeprowadzić pomiary, w rezultacie których otrzymano widmo tercjowe hałas (poziomu ciśnienia

akustycznego Lm [dB]) mikrozasilacza przed modernizacją (bez tarczy tłumiącej) i po modernizacji (z zamontowaną tarczą tłumiącą drgania grzybka stożkowego) – rys. 11 a i 11 b.

Jak pokazuje porównanie widm tercjowych z rys. 11 a i 11 b, wprowadzenie specjalnej tarczy tłumiącej drgania grzybka doprowadziło do obniżenia poziomu ciśnienia akustycznego o prawie 20 dB.

4. Dyskusja wyników badań i wnioski

Mikrohydraulika jest i w najbliższych latach niewątpliwie nadal będzie obszarem hydrauliki rozwijającym się bardzo intensywnie m.in. z uwagi na rosnące wymagania dotyczące głównie minimalizacji gabarytów i masy układów hydraulicznych. Układy mikrohydrauliczne posiadają szereg zalet, jednak występują w nich pewne wady, które muszą zostać zidentyfikowane i zminimalizowane bądź całkowicie usunięte, jeśli to możliwe. Istotnym problemem w eksploatacji układów mikrohydraulicznych jest ich hałaśliwość. Podczas badań stwierdzono nadmierną hałaśliwość mikrozasilacza hydraulicznego i wprowadzono modernizację polegającą na umieszczeniu specjalnie wykonanej tarczy tłumiącej drgania grzybka mikrozasilacza maksymalnego. Zabieg ten doprowadził do obniżenia poziomu ciśnienia akustycznego o prawie 20 dB. W odniesieniu do mikroukładów hydraulicznych istotnym problemem jest zjawisko obliteracji. Z tego względu szczególną uwagę zwrócić należy na czystość oleju hydraulicznego i zakres zmian jego lepkości. Nadzieje na ograniczenie występowania tego zjawiska można wiązać z ewentualnym wprowadzeniem mikrodrgań elementów sterujących mikrozasilaczy, analogicznie jak to rozwiązano w rozdzielaczach proporcjonalnych konwencjonalnych, pod warunkiem, że wykorzystywane będzie sterowanie elektryczne [8, 16]. Alternatywnym rozwiązaniem tego problemu, to znaczy oczyszczenia szczelin przepływowych, może też być wykorzystanie pulsacji ciśnienia wynikającej z wahań wydajności pompy wyporowej i wykorzystanie zjawisk rezonansowych w przewodzie mikrohydraulicznym [6].

Stwierdzono, że przepływ cieczy w mikroprzewodach hydraulicznych ma charakter nieizotermiczny, co prowadzi do konieczności uściślenia modeli matematycznych opisujących niestacjonarny ruch cieczy w mikroprzewodach hydraulicznych będących podstawą do projektowania skutecznych tłumików pulsacji ciśnienia, spełniających w układach mikrohydraulicznych również rolę filtra akustycznego.

Niewątpliwie w celu dalszego rozwoju obszaru mikrohydrauliki niezbędne jest prowadzenie dalszych szczegółowych badań mających na celu poprawę właściwości statycznych i dynamicznych elementów i układów mikrohydraulicznych prowadzących do poprawy ich cech eksploatacyjnych.

Literatura

- [1] 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.
- [2] DINDORF R., WOŁKOW J.: *Mikroukłady płynowe. Mikrohydraulika*. X Ogólnopolska Konferencja Cylinder 2000. Szczyrk, 27–29 września 2000.

- [3] 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.
- [4] KARGOV A., ASFOUR T., PYLATIUK C., OBERLE R., KLOSEK H., SCHULZ S., REGENSTEIN K., BRETTHAUER G., DILLMANN R.: *Development of an Anthropomorphic Hand for a Mobile Assistive Robot*. IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics: Frontiers of the Human–Machine Interface, June 28 – July 1, 2005 Chicago, Illinois, USA.
- [5] KOLLEK W., KUDŹMA Z., ŁOMOTOWSKI G., STOSIAK M.: *Przeptywy nieizotermiczne w układach mikrohydraulicznych*, [w:] *Podstawy projektowania, modelowania, eksploatacji elementów i układów mikrohydraulicznych*, KOLLEK W. [RED.]. Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2011.
- [6] KUDŹMA Z.: *Tłumienie pulsacji ciśnienia i hałasu w układach hydraulicznych w stanach przejściowych i ustalonych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
- [7] KUDŹMA Z., KUŁAKOWSKI K., STOSIAK M.: *Wybrane problemy w eksploatacji układów mikrohydraulicznych*. „Napędy i Sterowanie” 4/2014.
- [8] KUDŹMA Z., STOSIAK M.: *Wpływ metod sterowania dławieniowego na hałaśliwość przekładni hydrostatycznej*. „Hydraulika i Pneumatyka” 1/2013.
- [9] KUDŹMA Z., STOSIAK M.: *Eksperymentalne określenie wpływu drgań mechanicznych na przebiegi ciśnień w wybranych układach mikrohydraulicznych*, [w:] *Podstawy projektowania, modelowania, eksploatacji elementów i układów mikrohydraulicznych*, W. KOLLEK (RED.), Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2011.
- [10] ŁAWNICZAK A.: *Napędy hydrauliczne o małych prędkościach*. Politechnika Poznańska, Rozprawy Nr 154, Poznań 1988.
- [11] Patent nr 221214: Zawór mikromaksymalny, twórcy: Kudźma Z., Stosiak M.
- [12] KOLLEK W. (RED.): *Podstawy projektowania, modelowania, eksploatacji elementów i układów mikrohydraulicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
- [13] STOSIAK M.: *Identyfikacja oddziaływania drgań i metody ich redukcji w wybranych zaworach hydraulicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2015.
- [14] Strona internetowa, <http://www.hnp-mikrosysteme.de/>, data dostępu: 12.02.2016.
- [15] Strona internetowa, www.hoerbiger.com, data dostępu: 16.05.2016.
- [16] TOMASIAK E.: *Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.

dr hab. inż. Zygmunt Kudźma, prof. nadzw. PWR. – Wydział Techniczno-Inżynierski Politechniki Wrocławskiej

dr hab. inż. Michał Stosiak – Katedra Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, e-mail: michal.stosiak@pwr.edu.pl